

UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

Spécialité : Micro et nano technologies, acoustique et télécommunication

présentée par

Estelle MAIRIAUX

Développement d'une nouvelle filière de transistors bipolaires à hétérojonction
AlIn(As)Sb/GaInSb en vue applications térahertz

Soutenue le 7 octobre 2010

Membres du jury :

<i>Président</i>	Mr Didier Decoster	Professeur, Université de Lille I (USTL)
<i>Rapporteurs</i>	Mr Yvon Cordier	Chargé de Recherche, CRHEA-CNRS
	Mr Roland Tessier	Directeur de Recherche, IES-CNRS
<i>Examineurs</i>	Mr Aziz Benlarbi Delaï	Professeur, Université Pierre et Marie Curie
	Mr Emilien Peytavit	Chargé de Recherche, IEMN-CNRS
<i>Directeur de thèse</i>	Mr Gilles Dambrine	Professeur, Université de Lille I (USTL)
<i>Co-directeur de thèse</i>	Mr Mohammed Zaknounge	Chargé de Recherche, IEMN-CNRS
<i>Responsable industriel</i>	Mr André Scavenec	Ingénieur de Recherche, Alcatel-Thales III-V Lab

A André

Remerciements

Cette thèse a été menée à l'Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologies (IEMN) dans le cadre d'une convention CIFRE avec Alcatel-Thalès III-V Lab. Je tiens donc à remercier Monsieur Alain Cappy, ex-Directeur de l'IEMN, pour m'avoir accueillie dans son laboratoire.

Monsieur Gilles Dambrine, Professeur à l'Université des Sciences et Technologies de Lille (USTL) a dirigé cette thèse. Je le remercie pour la confiance qu'il m'a témoignée en m'accueillant au sein de son équipe et pour ses conseils éclairés.

Mes plus vifs remerciements vont à Monsieur Mohammed Zaknoute, Chargé de Recherche à l'IEMN, qui a co-encadré ce travail. Je le remercie pour sa disponibilité et pour m'avoir initiée au monde de la technologie des composants. Son expérience a largement contribué à la réussite de cette étude.

Je remercie également mes responsables industriels au sein d'Alcatel-Thalès III-V Lab : Monsieur André Scavenec, ex-Directeur Adjoint du groupe Microélectronique, pour la richesse et la pertinence de ses conseils et Monsieur Sylvain Delage, Directeur du groupe Microélectronique, pour sa gentillesse et son suivi administratif.

Je remercie sincèrement les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail de thèse :

- Monsieur Didier Decoster, Professeur à l'Université des Sciences et Technologies de Lille, pour me faire l'honneur de présider ce jury,
- Monsieur Roland Tessier, Directeur de Recherche à l'Institut d'Electronique du Sud (IES) et Monsieur Yvon Cordier, Chargé de Recherche au Centre de Recherche sur l'HétéroEpitaxie et ses Applications (CRHEA), qui ont accepté de juger ce travail de thèse,
- et enfin, Monsieur Aziz Benlarbi Delai, Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie, et Monsieur Emilien Peytavit, Chargé de Recherche à l'IEMN, pour faire partie de ce jury en tant qu'examineurs.

De nombreuses personnes ont contribué de près ou de loin à ce travail :

Je remercie particulièrement Xavier Wallart, Ludovic Desplanque et leur équipe « Epitaxie », pour la croissance des couches épitaxiales ainsi que pour les fructueuses discussions qui en ont résulté. Merci également à Sylvie Godey pour les analyses XPS.

Je remercie vivement le personnel de la centrale de caractérisation, dont Sylvie Lepillet et Vanessa Sbrugnera, ainsi que Nicolas Waldhoff dont l'expérience en caractérisation des composants m'a été d'une grande aide pour mener à bien ce projet. Je remercie également Virginie Nodjiadjim d'Alcatel-Thalès III-V Lab pour son aide sur l'extraction du schéma équivalent.

Je n'oublie bien sûr pas l'ensemble des personnes de la centrale de technologie que je remercie pour l'assistance et les conseils avisés qu'ils m'ont apportés et en particulier : Yves Deblock, Marc François et François Vaurette pour leur aide sur le masqueur électronique, Pascal Tilmant pour ses conseils en lithographie, Annie Fattorini, Jonhatan Lemaitre et André Leroy pour les métallisations, David Troadec pour les coupes FIB, Christophe Boyaval et Bertrand Grimbert.

Je tiens également à remercier les membres du groupe ANODE : François Danneville, Henry Happy, Sylvain Bollaert, Nicolas Wichmann et tout particulièrement Yannick Roelens pour son écoute et ces relectures.

Un grand merci à toutes les personnes du laboratoire avec lesquelles j'ai partagé des moments très agréables : Cristian, Cyrille, Aurélien, Nan, Nico W., Nico D., Salim, Alex, Malek, Romain, Virginie, Arame, François L., François V., Karine, ceux qui sont partis vers des horizons plus ou moins lointains : Arnaud, Andrey, Jean-Claude, Tao et particulièrement Laurianne, et tous ceux que j'aurai oubliés...

Je remercie également Arnaud, Bruno, Carole, Delphine, Jérôme, Marc, Nicolas et Nicolas, Romain et Teddy, pour leurs encouragements, même s'ils n'ont jamais compris un mot de mon sujet de thèse.

Enfin, je remercie mes parents pour leur soutien et pour tout ce que je leur dois, et bien sûr Cédric, sans qui rien de tout ça n'aurait été possible.

Table des matières

INTRODUCTION.....	1
1. INTRODUCTION AUX TBH RAPIDES	3
1.1. Applications « ultra-rapides »	3
1.1.1. Télécommunication optique à très haut débit.....	3
1.1.2. Imagerie et spectroscopie térahertz	5
1.2. Le transistor bipolaire à hétérojonction.....	6
1.2.1. Evolution historique	7
1.2.2. Silicium versus III-V	8
1.2.3. Principe de fonctionnement du transistor bipolaire	9
1.2.4. Limitation du transistor bipolaire à homojonction	11
1.2.5. Hétérojonction émetteur-base	12
1.2.5.A. Apport de l'hétérojonction	12
1.2.5.B. Hétérojonction de type I abrupte	13
1.2.5.C. Transport électronique dans le cas de l'hétérojonction abrupte.....	14
1.2.5.D. Hétérojonction graduelle.....	16
1.2.6. Transistor bipolaire à double hétérojonction	16
1.2.6.A. Limitation du transistor à simple hétérojonction.....	16
1.2.6.B. Optimisation de l'hétérojonction base-collecteur de type I.....	17
1.2.6.C. Hétérojonction base-collecteur de type II.....	18
1.2.7. Structure de couche et fabrication d'un TBH.....	19
1.3. Fonctionnement en régime statique du TBH.....	21
1.3.1. Bilan des différents courants du transistor	21
1.3.1.A. Courant direct d'électrons injecté de l'émetteur vers la base : I_{nEB}	22
1.3.1.B. Courant direct de trous injecté de la base vers l'émetteur : I_{pEB}	22
1.3.1.C. Courant inverse électrons-trous injecté à la jonction base-collecteur : I_{CB0}	23
1.3.1.D. Courant de recombinaison électron-trou en volume de base : $I_{rB,vol}$	23
1.3.1.E. Courant de recombinaison électron-trou à l'interface émetteur-base : $I_{rEB,interf}$	24

1.3.1.F. Courant de recombinaison électron-trou dans la ZCE émetteur-base : $I_{rEB,zce}$	24
1.3.1.G. Courant de recombinaison électron-trou en surface de base extrinsèque : $I_{rB,surf}$	24
1.3.1.H. Courant de recombinaison électron-trou au niveau du contact de base : $I_{rB,cont}$	25
1.3.2. Gains en courant statique	25
1.3.3. La courbe de Gummel : $(I_B, I_C) = f(V_{BE})$ à tension V_{CE} constante	26
1.3.4. Les caractéristiques $I_C(V_{CE})$: $I_C = f(V_{CE})$ à courant I_B constant	28
1.3.4.A. Régime inversé	28
1.3.4.B. Régime saturé	29
1.3.4.C. Régime normal direct	29
1.3.4.D. Claquage	30
1.3.5. Effets limitatifs en régime de forte injection	30
1.3.5.A. Effet Kirk	30
1.3.5.B. Auto-échauffement	32
1.4. Fonctionnement en régime dynamique	33
1.4.1. Paramètres S et gains dynamiques	33
1.4.1.A. Théorie des quadripôles et matrice [S]	33
1.4.1.B. Gains dynamiques	34
1.4.2. Fréquences de coupure f_T et f_{MAX}	35
1.4.2.A. Expression de la fréquence de transition f_T	35
1.4.2.B. Expression de la fréquence maximale d'oscillation f_{MAX}	38
1.5. Etat de l'art des TBH pour applications ultra-rapides	39
1.5.1. TBH InP/InGaAs	39
1.5.2. TBH InP/GaAsSb	41
1.5.3. TBH SiGe	42
1.5.4. Structures à petites bandes interdites	43
1.5.4.A. TBH à bases InAs et $In_{0,86}Ga_{0,14}As$	44
1.5.4.B. TBH à base GaInSb	46
1.6. Conclusion	47

2. MATERIAUX POUR TBH RAPIDES : LE SYSTEME 6,1 – 6,48 Å	49
2.1. Propriétés structurales	50
2.2. Structure de bande d'énergie	50
2.2.1. Composés binaires : InAs, GaSb, AlSb, InSb	50
2.2.2. Composés ternaires	51
2.2.3. Cas du quaternaire AlInAsSb	52
2.2.4. Alignement des bandes	53
2.3. Propriétés de transport électronique.....	55
2.3.1. Masses effectives	55
2.3.2. Mobilité	56
2.3.3. Vitesse électronique de dérive	56
2.4. Choix du système pour TBH ultra-rapide	58
2.4.1. Sélection du matériau de base : $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$	58
2.4.2. Sélection du matériau d'émetteur : $\text{Al}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Sb}$ ou $\text{Al}_{0,33}\text{In}_{0,67}\text{As}_{0,31}\text{Sb}_{0,69}$	59
2.4.2.A. Cas de l'alliage $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$	60
2.4.2.B. Cas de l'alliage $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{Sb}$	60
2.4.2.C. Cas de l'alliage $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$	61
2.4.2.D. Niveau de dopage et épaisseur de l'émetteur	62
2.4.3. Sélection du matériau de collecteur : $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$ ou $\text{Al}_{0,33}\text{In}_{0,67}\text{As}_{0,31}\text{Sb}_{0,69}$	62
2.4.4. Sélection du contact émetteur et du sous-collecteur : $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$	63
2.4.5. Résumé sur les structures retenues	63
2.5. Croissance des hétérostructures antimoniées	65
2.5.1. Epitaxie par jets moléculaires (EJM).....	65
2.5.2. Croissance métamorphique.....	66
2.5.3. Dopage de type n des antimoniures	67
2.5.4. Croissance des structures TBH : caractéristiques des couches épitaxiées.....	68
2.5.4.A. Croissance des couches d'alliage quaternaire	68
2.5.4.B. Croissance de la base.....	69
2.5.4.C. Croissance des couches de contact	70
2.5.4.D. Buffer métamorphique et morphologie des couches	71
2.6. Conclusion.....	73

3. TECHNOLOGIE DE FABRICATION : MISE EN ŒUVRE ET OPTIMISATION 75

3.1. Procédé de fabrication pour TBH de petites dimensions	76
3.2. Développement de gravures sélectives	79
3.2.1. Introduction aux gravures humides de semiconducteurs III-V	80
3.2.1.A. Mécanisme limitant et profil de gravure	80
3.2.1.B. Contamination et oxydation	81
3.2.1.C. Sélectivité de gravure et problématique liée à la fabrication de TBH	81
3.2.2. Procédé expérimental	82
3.2.3. Gravure humide de GaInSb	82
3.2.3.A. Etude de la solution $C_4H_6O_6:H_2O_2:HCl:H_2O$	83
3.2.3.B. Etude de la solution $C_4H_6O_6:H_2O_2:H_2O$	85
3.2.3.C. Conclusion.....	87
3.2.4. Gravure du mesa d'émetteur.....	87
3.2.4.A. Cas d'un émetteur AlInSb (Structures S090114 et S090413).....	88
3.2.4.B. Cas d'un émetteur AlInAsSb (Structures S090411 et S090412).....	91
3.2.4.C. Sous-gravure d'émetteur	92
3.2.5. Conclusion	93
3.3. Optimisation des contacts ohmiques	93
3.3.1. Mécanisme du contact ohmique	94
3.3.2. Caractérisation de la résistivité de contact par mesures TLM.....	97
3.3.3. Etat de l'art du contact ohmique sur Ga(In)Sb	98
3.3.3.A. Contact ohmique sur p-GaSb et p-GaInSb	99
3.3.3.B. Contact ohmique sur n-GaSb.....	100
3.3.4. Etude d'optimisation des contacts ohmiques sur $Ga_{0,35}In_{0,65}Sb$	101
3.3.4.A. Procédé expérimental	102
3.3.4.B. Le contact de type n : émetteur et collecteur	104
3.3.4.C. Le contact de base	105
3.3.4.D. Influence de la préparation de surface.....	107
3.3.4.E. Conclusion sur l'étude d'optimisation.....	111
3.3.5. Applications aux TBH à base $Ga_{0,65}In_{0,35}Sb$ de petites dimensions	111
3.4. Connexion du transistor par ponts à air	112
3.4.1. Connexion par vias ou arasement	112
3.4.2. Lithographie électronique.....	114
3.4.2.A. Principe	114
3.4.2.B. Paramètres d'exposition	115
3.4.2.C. Effets de proximité	116
3.4.2.D. Résines électro-sensibles.....	118
3.4.2.E. Développement de la résine exposée	119
3.4.3. Réalisation technologique des ponts à air par lithographie électronique	120
3.4.3.A. Définition du support de pont et ouverture des vias : PMMA 950K.....	122
3.4.3.B. Définition de la structure des ponts : copolymère PMMA/MAA(33%).....	123
3.5. Conclusion	126

4. CARACTERISATIONS ELECTRIQUES DE TBH DE PETITES DIMENSIONS 127

4.1. Caractéristiques statiques des TBH de petites dimensions	127
4.1.1. Caractéristiques $I_C(V_{CE})$	128
4.1.2. Courbes de Gummel	131
4.1.2.A. Structure avec émetteur en AlInSb.....	131
4.1.2.B. Structure avec émetteur en AlInAsSb	132
4.1.3. Analyse des courants de recombinaison dans les TBH à base $Ga_{0,65}In_{0,35}Sb$	134
4.1.3.A. Composantes du courant de base	135
4.1.3.B. Résultats expérimentaux.....	136
4.1.3.C. Mécanismes de recombinaison en surface.....	140
4.1.3.D. Conclusion	141
4.2. Comportement dynamique des TBH à base $Ga_{0,65}In_{0,35}Sb$.....	142
4.2.1. Fréquences de coupure (f_T, f_{MAX}).....	142
4.2.2. Influence des conditions de polarisation	143
4.2.3. Extraction du modèle petit signal	144
4.2.3.A. Extraction des éléments localisés	144
4.2.3.B. Extraction du temps de transit base-collecteur	146
4.2.4. Influence des dimensions sur les performances dynamiques	147
4.2.4.A. Influence des dimensions d'émetteur	148
4.2.4.B. Influence de la distance émetteur-base	149
4.2.5. Synthèse sur la répartition du temps de transit total	150
4.2.6. Origine des éléments localisés en excès et voies d'amélioration	151
4.2.6.A. Capacité base-collecteur.....	151
4.2.6.B. Résistances d'émetteur et de collecteur.....	153
4.3. Conclusion.....	154
<u>CONCLUSION ET PERSPECTIVES</u>	<u>155</u>
<u>ANNEXES.....</u>	<u>159</u>
<u>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</u>	<u>171</u>

Introduction

La croissance spectaculaire du trafic Internet et l'augmentation de la demande de transmission de données obligent les opérateurs de réseaux à augmenter toujours plus la capacité de transmission. Au cœur des systèmes de télécommunications se trouvent les réseaux de fibre optique sur laquelle des débits de transmission très importants peuvent être atteints. La bande passante potentielle d'une fibre optique, définie comme la fenêtre sur laquelle l'atténuation reste suffisamment faible pour permettre la transmission, est en effet remarquable : 15 THz autour de 1,3 μm et autant autour de 1,5 μm . L'utilisation de cette capacité théorique reste cependant limitée par le traitement électronique du signal en entrée et en sortie du système de transmission optique.

La réalisation de circuits électroniques exécutant les fonctions essentielles de tout système de transmission (multiplexage, démultiplexage, amplification, remise en forme...) et, de façon plus générale, manipulant des signaux de fréquences élevées, requiert l'utilisation de composants extrêmement rapides. Les composants à base d'alliages semiconducteurs III-V, qui ont bénéficié d'un important effort de recherche depuis les années 80, sont devenus l'une des alternatives aux circuits électroniques classiques sur silicium pour ces applications où de très hautes fréquences de fonctionnement sont requises. Si le développement des composants sur GaAs a sans doute atteint un stade plus avancé que sur InP, c'est toutefois sur ces derniers que les performances les plus prometteuses sont atteintes, et que la plus grande partie des efforts de recherche se concentre actuellement.

Néanmoins, pour répondre à la demande en perpétuelle croissance du secteur des télécommunications mais également pour satisfaire d'autres applications utilisant des fréquences au-delà de 100 GHz comme dans les domaines de l'environnement avec la détection de pollution, de la sécurité, du contrôle industriel et de la médecine, ce sont des composants ayant des fréquences de coupure voisines du THz qui deviennent nécessaires. Pour atteindre ces exigences, il est indispensable de faire encore progresser la technologie des

composants, et notamment du transistor bipolaire à hétérojonction (TBH) qui reste l'un des meilleurs candidats pour les applications microélectroniques ultra-rapides.

Ce travail de thèse s'inscrit dans ce contexte et propose d'explorer une nouvelle filière de TBH qui repose sur l'utilisation d'hétérostructures innovantes à base d'antimoine. Ce système de matériaux de paramètre de maille supérieur à 6,1 Å suscite un intérêt grandissant pour l'application aux composants électroniques, tant dans les milieux académiques qu'industriels. Il offre en effet des mobilités trois à quatre fois plus importantes que dans le système InP/InGaAs mais également une souplesse inégalée pour l'ingénierie des bandes qui peuvent être mises à profit dans la conception de composants rapides. L'objectif de cette thèse est d'évaluer la faisabilité et les potentialités des TBH antimoniés en s'appuyant sur l'hétérostructure originale AlIn(As)Sb/GaInSb. Pour cela, ce manuscrit se décompose en quatre chapitres :

Le premier chapitre présente, après une description plus précise des applications visées, les principes de fonctionnement du transistor bipolaire à hétérojonction. L'objectif est de donner les bases théoriques permettant de comprendre et d'analyser les résultats expérimentaux obtenus pendant ces travaux. Un état de l'art des principales filières de TBH rapides est également exposé.

Dans le deuxième chapitre, les propriétés essentielles des matériaux antimoniés sont passées en revue afin de guider la définition des structures de couche des TBH étudiés. Quelques aspects spécifiques liés à la croissance de ces hétérostructures antimoniées sont également évoqués et les caractéristiques des matériaux élaborés par épitaxie par jets moléculaires sont détaillées.

Le troisième chapitre concerne le développement des éléments de technologie propres à cette nouvelle filière de composants. Nous y détaillons plus particulièrement la mise au point du procédé de gravure pour les mesas, l'optimisation des métallisations de contact et la technique de réalisation des ponts à air pour la connexion finale des composants.

Enfin, le quatrième chapitre traite de la caractérisation statique et dynamique des transistors fabriqués et valide les approches technologiques utilisées. A partir des résultats obtenus, nous déterminons les principales limitations des dispositifs et proposons les développements envisageables afin d'améliorer les performances.

1 ■ Introduction aux TBH rapides

Ce travail de thèse se focalise sur le transistor bipolaire à hétérojonction (TBH), composant de base pour la réalisation de circuits électroniques rapides. Dans ce chapitre, nous présentons en premier lieu les potentiels domaines d'application du TBH, en mettant l'accent sur le domaine des télécommunications optiques et de l'imagerie et de la spectroscopie térahertz. Nous décrivons ensuite le principe de fonctionnement du TBH et précisons l'intérêt de l'hétérojonction, puis nous expliquons les caractéristiques statiques et dynamiques de ce composant en insistant sur les paramètres importants. Enfin, nous présentons les principales filières de TBH rapides, caractérisées par la nature des matériaux constituant et nous reportons pour chacune l'état de l'art en termes de performances fréquentielles.

1.1. Applications « ultra-rapides »

L'intérêt pour les applications au-delà de 100 GHz commence à émerger dans le monde de l'électronique pour des applications dans des domaines variés du civil (transport, médical, télécommunication...) et du militaire (détection-guidage, communications sécurisées, guerre électronique...). De nombreux projets de recherche sont ainsi menés afin de repousser plus loin les limites des transistors bipolaires à hétérojonctions avec comme but ultime l'obtention de fréquences de fonctionnement de l'ordre du térahertz.

1.1.1. Télécommunication optique à très haut débit

Le développement des télécommunications à l'échelle mondiale et l'exploitation des réseaux de communication qu'ils soient longues distances (WAN : Wide Area Network), métropolitains (MAN : Metropolitan Area Network) ou locaux (LAN : Local area Network) exige l'amélioration permanente des performances, en particulier en terme de débits de transmission. De nombreux services et applications multimédia se sont développées, et

nécessitent aujourd'hui d'importantes capacités de transmission. A ce jour, les technologies parmi les plus adaptées pour adresser ce besoin sont les systèmes de transmission par fibre optique : la bande passante des fibres optiques permet l'établissement de systèmes de transmission à des débits très élevés.

Cependant, le traitement électronique des données, à l'émission et à la réception, impose des limitations en termes de débits, dues aux composants électroniques dont la bande passante reste bien en deçà de celle accessible par l'optique. L'augmentation du nombre d'utilisateurs et de la quantité d'informations échangées dans les réseaux de communication a poussé au développement de solutions pour augmenter la capacité des réseaux, et profiter de l'avantage en bande qu'offre la fibre optique. Ainsi, des techniques de multiplexage qui consistent à faire passer dans une seule fibre optique les signaux de plusieurs canaux ont été développées. Parmi ces techniques, on peut citer le multiplexage temporel (TDM : Time Division Multiplexing) et le multiplexage en longueur d'onde (DWDM : Dense Wavelength Division Multiplexing) (Figure 1.1). La combinaison de ces techniques a récemment permis à Alcatel-Lucent d'établir un nouveau record de transmission de données à 15,5 Tb/s sur une distance de 7000 km en multiplexant en longueur d'onde 155 canaux de 100 Gbit/s chacun [Alcatel09].

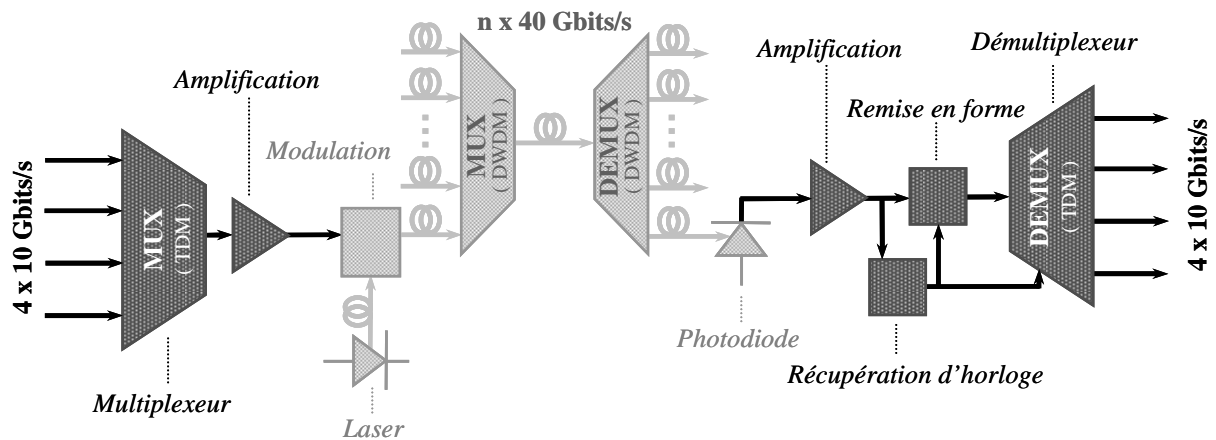


Figure 1.1 : Schématisation simplifiée d'un système de transmission avec multiplexage temporel et en longueur d'onde (traits noirs : signal électrique, traits gris : signal optique)

Dans un système de transmission à haut débit, le signal porteur de l'information subit de nombreux traitements lorsqu'il est sous forme électrique (multiplexage, démultiplexage, amplification, remise en forme, récupération d'horloge...). Le traitement de ces signaux ultrarapides n'est réalisable qu'avec des circuits numériques ou mixtes qui fonctionnent à des fréquences très élevées. Par exemple, pour traiter des signaux numériques à 40-50 Gb/s, il faut des circuits dont l'horloge va de 20 à 50 GHz. La réalisation de tels circuits requiert l'utilisation de composants électroniques extrêmement rapides : on considère en effet que la fréquence de coupure des transistors unitaires qui composent le circuit doit être 2 à 3 fois

supérieure à la fréquence du signal à traiter. Ainsi, avec les perspectives de débits à 100 Gbits/s sur une seule longueur d'onde (la prochaine génération en Ethernet) voire même à 160 Gbits/s (en 2015), ce sont des composants avec des fréquences de coupures de 300 GHz et 500 GHz qui deviennent nécessaires. Parmi les composants les plus prometteurs pour satisfaire ce besoin, on trouve les HEMT et les TBH en matériaux III-V. Ce dernier, et plus précisément le TBH à base de Phosphore d'Indium (InP), a déjà fait l'objet d'un travail important pour la conception et la réalisation de circuits ultra-rapides et il permet d'ores et déjà de réaliser toutes les fonctions nécessaires à la constitution d'une ligne complète à 40 Gbits/s.

1.1.2. Imagerie et spectroscopie térahertz

Traditionnellement réservées à quelques applications très spécifiques notamment la radioastronomie millimétrique et submillimétrique [Beaudin08], les technologies THz sont en pleine évolution avec l'apparition d'applications émergentes dans des domaines variés de la chimie à la biologie en passant par la métallurgie. Néanmoins, le développement industriel des THz demeure confidentiel, faute de sources et de détecteurs compacts, fiables et à faible coût.

La bande THz connaît plusieurs définitions, mais celle couvrant la bande de 0,1 à 10 THz semble être la mieux acceptée par différentes communautés scientifiques. L'intérêt des ondes THz pour la spectroscopie et l'imagerie est multiple :

- de nombreux matériaux opaques optiquement (tissus, cartons, plastiques...) sont très transparents dans cette gamme de fréquence,
- beaucoup de molécules intéressantes présentent une signature spectrale spécifique qui souvent n'existe pas dans d'autres parties du spectre électromagnétique comme le proche ou le moyen infrarouge (NH₃, par exemple),
- le rayonnement THz est faiblement énergétique et non-ionisant, ce qui le rend sans danger pour les tissus biologiques,
- les ondes THz permettent une résolution submillimétrique.

L'imagerie THz d'objets inhomogènes est basée sur l'absorption différenciée des matériaux. Alors que les zones métalliques, humides, etc., sont opaques aux ondes THz, les parties diélectriques sont généralement transparentes. Tout comme pour l'imagerie rayons X, infrarouge ou visible, les mesures dans le domaine THz peuvent être employées dans presque tous les secteurs de l'industrie (contrôle industriel, sécurité et défense, biologie et biomédical...). Nous donnons par la suite et à la Figure 1.2 quelques exemples de ces applications, qui ne sauraient constituer une liste exhaustive.

Les premières images de la teneur en eau de feuilles [Hu95] (Figure 1.2.a) ont ouvert la voie aux applications biologiques, chimiques et à des applications dans le domaine de

l'agroalimentaire comme la détection de la teneur en eau des aliments ou encore de l'agriculture avec la détection de la teneur en eau des feuilles pour optimiser l'irrigation des cultures.

L'imagerie THz est également applicable dans le domaine de la sécurité. Elle peut être utilisée comme moyen de détection d'individus portant des armes (par exemple aux portiques des aéroports). La plupart de ces armes étant métalliques, et les vêtements ou enveloppes sous lesquels elles sont dissimulées étant transparents, on peut visualiser l'arme sur un cliché THz (Figure 1.2.b). En ce qui concerne la détection de produits dangereux ou prohibés (explosifs, drogues...), leur discrimination par rapport à d'autres produits inoffensifs est basée sur une analyse spectrale. Par exemple, les explosifs montrent des profils d'absorption spectrale très caractéristiques dans le domaine THz (Figure 1.2.c).

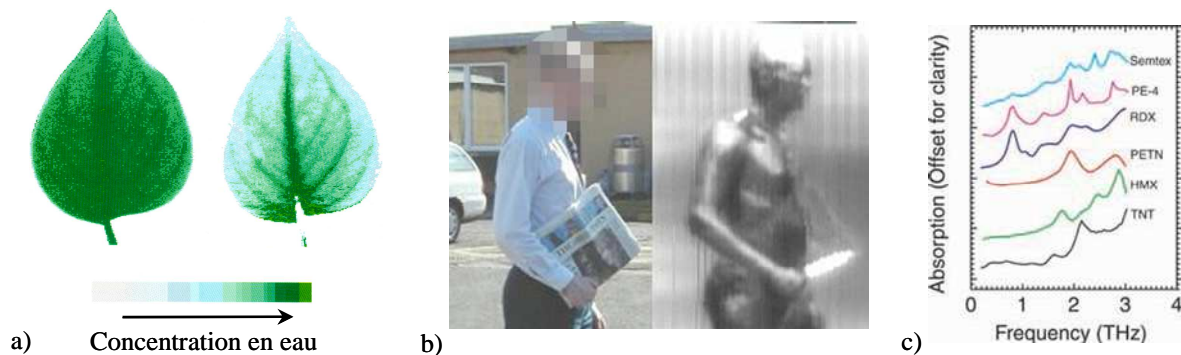


Figure 1.2 : Exemples d'imagerie et de spectroscopie THz - a) Images THz d'une feuille fraîche (à gauche) et après 48 heures (à droite) [Hu95] - b) Photographie (à gauche) et image à 94 GHz (à droite) d'un homme dissimulant un couteau [Qinetiq] - c) Spectres d'absorption THz de substances explosives [Teraview]

Dans le domaine des diagnostics biomédicaux, la forte absorption de l'eau dans la bande THz joue un rôle central, mais limite fortement la profondeur de pénétration du rayonnement. Les principales applications consistent donc en des examens de surface, en particulier de peau et dents [Humphreys04].

Enfin, les applications industrielles se déclinent principalement autour de l'observation à l'intérieur ou au travers d'objets opaques (détection de défauts dans la matière sur une chaîne de production, détection de corrosion sous une couche de peinture...).

1.2. Le transistor bipolaire à hétérojonction

Après un bref historique, nous décrivons le principe de fonctionnement du transistor bipolaire et expliquons l'intérêt d'introduire des hétérojonctions pour l'amélioration des performances.

1.2.1. Evolution historique

L'invention des transistors bipolaires remonte à 1947. J. Bardeen et W. H. Brattain mettent en évidence l'effet d'amplification à l'aide d'un petit dispositif composé de germanium et de deux contacts en or : le « transistor à pointes » (cf. Figure 1.3.a) [Bardeen48]. L'année suivante, les travaux de W. Shockley ouvrent la voie pour la réalisation d'un nouveau concept de transistor basé sur la jonction p-n (cf. Figure 1.3.b) et mènent au dépôt en 1951 du brevet fondateur du principe de l'hétérojonction [Shockley51]. En 1957, H. Kroemer pose les bases théoriques du fonctionnement du transistor bipolaire et démontre l'intérêt d'utiliser un matériau ayant une plus large bande interdite pour émetteur [Kroemer57].

A cours des années 50, le silicium remplace rapidement le germanium pour la fabrication des transistors bipolaires à jonction du fait de sa plus large bande interdite qui facilite son fonctionnement à température élevée (entre -55 et 125°C). Il faut par contre attendre les années 70 et l'essor des technologies de fabrication des hétérostructures par les techniques d'épithaxie pour voir apparaître les premières réalisations expérimentales de transistors à hétérojonctions. Réalisés sur substrat d'arséniure de gallium, ces premiers transistors bipolaires à hétérojonction utilisent une hétérostructure AlGaAs/GaAs fabriquée par épithaxie en phase liquide [Dumke72].

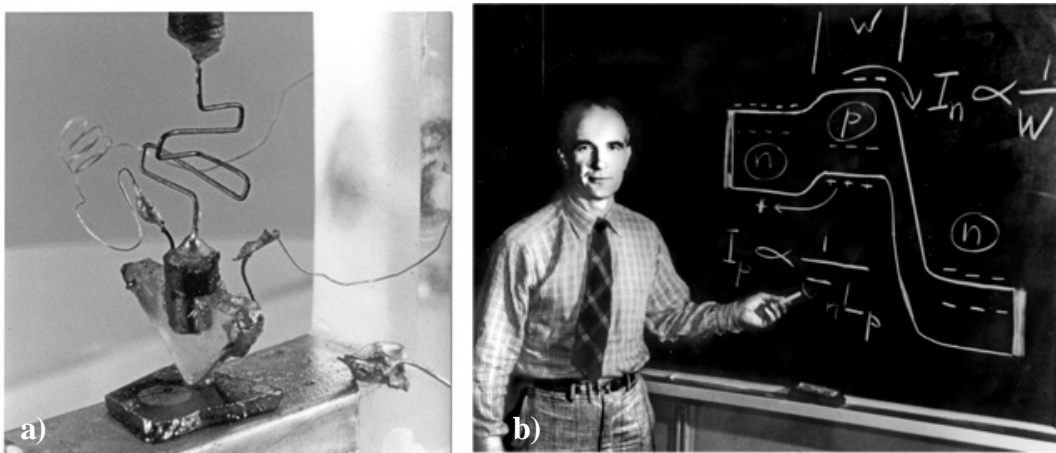


Figure 1.3 : a) Premier dispositif amplificateur à base de semiconducteur (décembre 1947).
b) W. Shockley présentant l'effet transistor (~ 1949-50).

Dans les années 80, le développement de l'épithaxie par jets moléculaires en phase gazeuse (GS-MBE pour *Gas Source Molecular Beam Epitaxy*) rend possible la fabrication de transistors bipolaires à hétérojonction InP avec une base $\text{Ga}_{0,47}\text{In}_{0,53}\text{As}$ [Nottenburg86]. En raison de sa possible intégration avec des composants optoélectroniques et de propriétés de transport électronique supérieures, ce système montre rapidement sa supériorité face à la

filière AlGaAs/GaAs. Il devient ainsi, avec AlInAs/InGaAs, le système privilégié pour la réalisation de transistors rapides.

1.2.2. Silicium versus III-V

Depuis les années 50, le silicium demeure le matériau le plus répandu dans les systèmes électroniques et ce, malgré des propriétés physiques limitées en terme de transport des porteurs ou de tenue au champ électrique. Plusieurs avantages lui confèrent cette position dominante. Premièrement, la matière première du silicium, la silice, est naturellement abondante et est disponible à faible coût. Par ailleurs, en raison de son histoire industrielle, la filière silicium bénéficie d'une très grande maturité technologique, fruit de plus de 40 ans de développement.

Ainsi, le MOSFET (architecture CMOS) est le composant de choix pour les applications logiques et circuits à forte densité d'intégration où une faible consommation est requise (ex : microprocesseur). Devant la concurrence de ces structures MOS, la fin du transistor bipolaire silicium était annoncée. Cependant la technologie des transistors bipolaires a bénéficié des mêmes avancées techniques, lui permettant de se maintenir dans les applications analogiques rapides et faible bruit et dans les applications mixtes logique-analogique en association avec des transistors CMOS dans les circuits BiCMOS. Cette technologie permet, au prix d'une fabrication complexe, d'allier les fréquences élevées des TBH à la très forte densité d'intégration et au faible coût du CMOS.

Les HEMT et TBH à base de matériaux III-V ont bénéficié, pendant de nombreuses années, d'un effort de recherche important pour les applications hyperfréquences ultra-rapides qui n'ont pu être satisfaites par la technologie classique silicium. Ils restent très importants dans ces marchés de niche où ils ont su s'imposer grâce à leurs performances inégalées. Cependant, il est important de noter que les transistors III-V souffrent de plus en plus de la concurrence de la filière silicium.

En termes de performances fréquentielles, on a longtemps considéré les transistors InP comme les composants les plus rapides, suivis par les transistors GaAs alors que les transistors à base de silicium étaient relégués au dernier rang. Depuis quelques années, cette tendance n'est plus réellement de mise en raison d'avancées technologiques qui ont permis d'améliorer considérablement les performances des transistors MOSFET (diminution de la longueur de grille jusqu'à 35 nm pour les dispositifs industriels et 25 nm dans certains laboratoires académiques) et des TBH SiGe. Cela associé aux solutions d'intégration bas coût de la filière silicium rend ces transistors silicium extrêmement compétitifs.

Intéressons-nous de plus près aux transistors bipolaires. La Figure 1.4 présente un état de l'art des TBH en 2007. Les performances des transistors bipolaires silicium ont été grandement améliorées grâce à l'utilisation d'une base en SiGe [Iyer87]. Plus récemment, l'introduction

de carbone dans la base des TBH SiGe a permis d'affiner l'épaisseur de la base SiGe:C et par conséquent une nouvelle montée en fréquence et en rapidité des TBH Si/SiGe:C. Leurs performances surpassent à l'heure actuelle celles des TBH GaAs qui restent toutefois largement utilisés dans les amplificateurs de puissance à des fréquences de quelques gigahertz. Néanmoins, les transistors à base de silicium souffrent d'une faible tenue en tension. Les transistors InP, qui eux présentent des tensions de sortie élevées, restent à ce jour les transistors les plus rapides existants comme le montre la Figure 1.4.

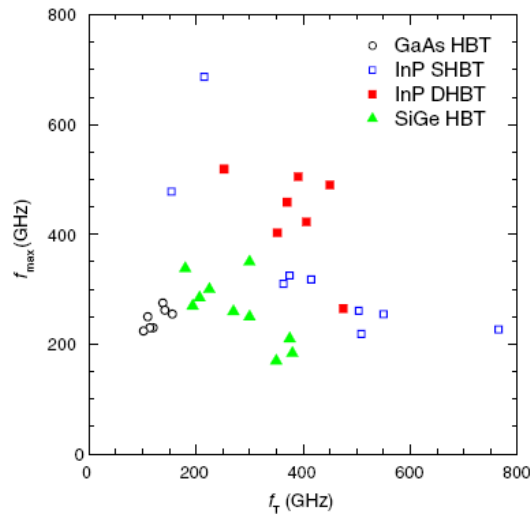


Figure 1.4 : Etat de l'art des TBH en 2007 [Schwierz07]

1.2.3. Principe de fonctionnement du transistor bipolaire

Le transistor bipolaire est un composant actif qui repose sur la juxtaposition, dans un même monocristal, de trois zones semiconductrices dopées successivement N^+ , P et N dans le cas du transistor NPN et P^+ , N et P dans le cas du transistor PNP, ces régions étant appelées respectivement émetteur, base et collecteur. Ce composant peut être considéré comme l'assemblage de deux jonctions PN montées tête-bêche qui partagent une région commune : la base.

Contrairement au transistor à effet de champ qui fait appel à un seul type de porteur de charge, les différents courants dans le transistor bipolaire résultent du déplacement des deux types de porteurs (électrons et trous), d'où le terme « bipolaire ». Néanmoins, en fonction de la configuration du transistor, la conduction repose principalement sur l'un ou l'autre type de porteurs, à savoir les électrons dans le transistor NPN et les trous dans le cas du transistor PNP. Dans la suite de ces travaux de thèse, nous nous focaliserons sur le fonctionnement du transistor de type NPN. Ce choix est naturel dans un objectif fréquentiel, étant donné que la mobilité des électrons dans les matériaux III-V est supérieure à la mobilité des trous.

Le Tableau 1.1 résume les différents modes de fonctionnement d'un transistor bipolaire et les conditions de polarisation des jonctions qui leurs sont associées.

Pour les applications logiques, on exploite la commutation du transistor avec un passage du mode bloqué (état logique 0) au mode saturé (état logique 1). Dans le cas des applications analogiques et radio-fréquences, le mode de fonctionnement le plus utilisé est le mode direct dans lequel la jonction émetteur-base (E/B) est polarisée en direct et la jonction base-collecteur (B/C) est polarisée en inverse, comme illustré sur la Figure 1.5.

Tableau 1.1 : Modes de fonctionnement d'un transistor bipolaire

Mode de fonctionnement	Polarisation de la jonction émetteur-base	Polarisation de la jonction base-collecteur
Direct (ou normal)	Direct	Inverse
Bloqué	Inverse	Inverse
Saturé	Direct	Direct
Inverse	Inverse	Direct

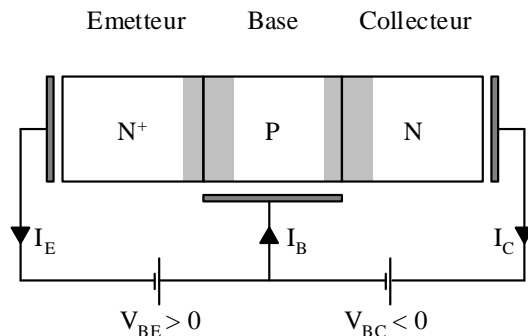


Figure 1.5 : Représentation schématique d'un transistor bipolaire NPN polarisé en mode direct. Les zones grisées correspondent aux zones de charge d'espace des jonctions émetteur-base et base-collecteur

En mode de fonctionnement normal, la polarisation en direct de la jonction émetteur-base ($V_{BE} > 0$) permet d'abaisser les barrières de potentiel pour les électrons et pour les trous, favorisant le passage du courant (Figure 1.6). Les électrons majoritaires dans l'émetteur traversent la zone de charge d'espace (ZCE) de la jonction EB et sont injectés dans la base où ils s'accumulent dans la zone quasi-neutre (ZQN). Grâce au gradient de concentration électronique généré par leur propre injection, une grande proportion de ces électrons diffusent jusqu'à la ZCE de la jonction base-collecteur. Cette seconde jonction étant sous polarisation inverse ($V_{BC} < 0$), les électrons sont accélérés par le fort champ électrique jusqu'au collecteur. Ainsi, la majorité des électrons injectés à l'émetteur se retrouve au collecteur : c'est l'effet transistor. Ce dispositif réalise une fonction d'amplification de courant dont la rapidité de réaction à une variation de la commande définit une fréquence limite de fonctionnement.

Le bon fonctionnement du transistor nécessite que les électrons, injectés de l'émetteur vers la base, atteignent la jonction base-collecteur. Il est donc impératif que ces porteurs minoritaires

ne se recombinent pas pendant la traversée de la base dont l'épaisseur doit, par conséquent, être inférieure à la longueur de diffusion des électrons ($w_B \ll L_{nB}$). En d'autres termes, il est indispensable que la durée de vie des électrons (τ_{nB}) dans la ZQN de la base soit sensiblement plus élevée que leur temps de transit (τ_B).

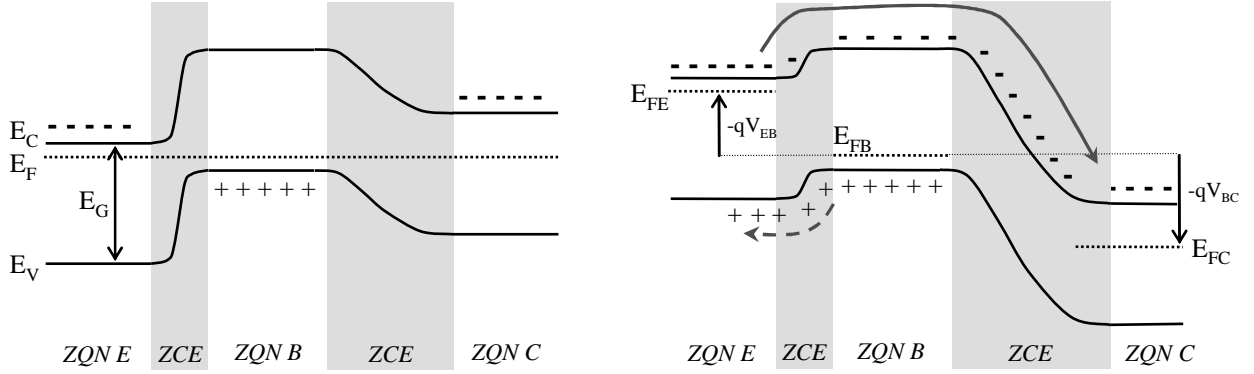


Figure 1.6 : Diagramme de bande d'un transistor bipolaire NPN à l'équilibre thermodynamique (à gauche) et en mode de fonctionnement normal (à droite)

1.2.4. Limitation du transistor bipolaire à homojonction

L'effet transistor est conditionné par l'efficacité d'injection γ à la jonction émetteur-base. Comme indiqué précédemment, l'injection d'électrons de l'émetteur vers la base (I_n) s'accompagne de l'injection de trous de la base vers l'émetteur (I_p) qui crée un courant parasite. L'efficacité d'injection est définie par :

$$\gamma = \frac{I_n}{I_n + I_p} = \left(1 + \frac{I_p}{I_n}\right)^{-1} \quad (1.1)$$

Un transistor est d'autant plus performant que la valeur de l'efficacité d'injection est proche de 1. Or, on constate que l'efficacité maximale est obtenue lorsque le rapport I_p/I_n est minimum. D'après les formules de Schokley, dans le cas d'un transistor bipolaire à homojonction, ce rapport dépend du rapport des niveaux de dopage de base N_{AB} et d'émetteur N_{DE} .

$$\frac{I_p}{I_n} = \frac{D_p \cdot W_B \cdot N_{AB}}{D_n \cdot W_E \cdot N_{DE}} \quad (1.2)$$

En effet, les coefficients de diffusion des porteurs D_n et D_p sont fixes et dépendent des matériaux considérés. Les épaisseurs d'émetteur W_E et de base W_B étant du même ordre de grandeur, seuls les dopages d'émetteur et de base permettent d'optimiser l'efficacité d'injection. Ceci impose le profil de dopage de la jonction émetteur-base qui doit être fortement dissymétrique avec un dopage de base très inférieur au dopage d'émetteur, afin de minimiser le courant de trous de la base vers l'émetteur.

En contrepartie, l'utilisation d'un faible dopage de la couche de base implique l'augmentation de son épaisseur pour diminuer la résistance de base jusqu'à des valeurs acceptables. Les temps de transit des porteurs dans la base s'en trouvent alors fortement accrus. Or, nous le verrons dans le chapitre 1.4, les performances fréquentielles d'un transistor bipolaire dépendent des temps de charge aux jonctions et des temps de transit à travers la base et le collecteur.

C'est ici que repose la limitation intrinsèque de ce composant : la conservation du gain dans un transistor bipolaire à homojonction impose un temps de transit de base élevé excluant ainsi tout fonctionnement à très hautes fréquences.

1.2.5. Hétérojonction émetteur-base

1.2.5.A. Apport de l'hétérojonction

Pour se libérer de cette contrainte, il est nécessaire de modifier la structure de couche. Dès 1957, Kroemer démontre l'intérêt d'utiliser une hétérojonction à la jonction émetteur-base [Kroemer57]. Dans un transistor bipolaire à hétérojonction, l'introduction dans l'émetteur d'un matériau ayant une largeur de bande interdite (gap) E_{gE} supérieure à celle de la base E_{gB} résulte en une dissymétrie des barrières de potentiel vues par les électrons (courant I_n) injectés dans la base et des trous (courant I_p) injectés dans l'émetteur. Cette dissymétrie introduit un facteur de forte valeur dans l'expression de l'efficacité d'injection qui devient :

$$\gamma = \left(1 + \frac{D_p \cdot W_B \cdot N_{AB}}{D_n \cdot W_E \cdot N_{DE}} \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{kT}\right) \right)^{-1} \quad \text{avec } \Delta E_g = E_{gE} - E_{gB} \quad (1.3)$$

où T est la température, k la constante de Boltzmann.

Par exemple, dans le système InP/In_{0,53}Ga_{0,47}As, $\Delta E_g = 0,59$ eV ($\sim 23kT$), le terme en exponentiel est de l'ordre de 10^{-10} . L'efficacité d'injection est donc améliorée et devient peu dépendante du rapport N_{AB}/N_{DE} . L'existence de l'hétérojonction offre ainsi un degré de liberté sur les dopages qui permet, contrairement au cas des transistors à homojonction, de doper très fortement la base et faiblement l'émetteur, tout en préservant l'efficacité d'injection et donc le gain en courant statique.

L'utilisation d'une base fortement dopée permet alors de réduire l'épaisseur de base (et par conséquent de diminuer les temps de transit dans la base) tout en conservant une résistance de base faible, autorisant ainsi le fonctionnement du TBH à très hautes fréquences.

Au final, l'injection sélective permet dans un TBH de concilier gain en courant statique et performances fréquentielles.

1.2.5.B. Hétérojonction de type I abrupte

Dans une hétérojonction abrupte de type I, le matériau à petite bande interdite (la base dans notre étude) représente un puits de potentiel à la fois pour les électrons et pour les trous. La formation d'une telle hétérojonction peut être décrite par le modèle d'Anderson [Anderson62]. L'intégration de l'équation de Poisson à l'hétérojonction conduit au diagramme de bandes de la Figure 1.7, où apparaissent des courbures de bandes et des discontinuités ΔE_V et ΔE_C au niveau des bandes de valence et de conduction telles que :

$$\Delta E_C = \chi_E - \chi_B \quad (1.4)$$

$$\Delta E_V = \Delta E_g - \Delta E_C \quad (1.5)$$

avec χ_E et χ_B , les affinités électroniques des matériaux d'émetteur et de base.

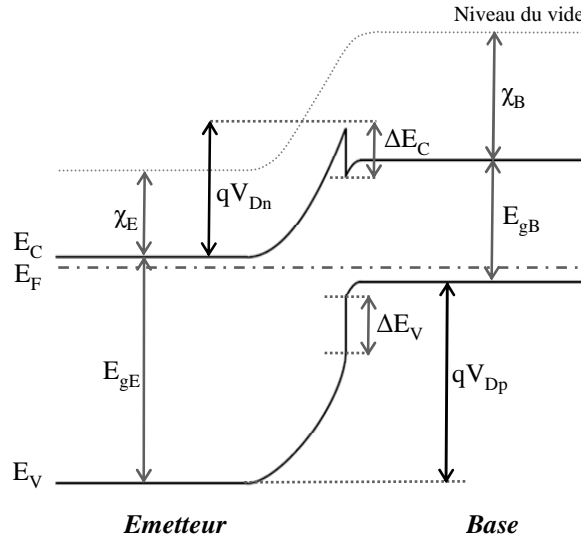


Figure 1.7 : Hétérojonction abrupte de type I à l'équilibre thermodynamique

Une zone de charge d'espace apparaît de part et d'autre de l'hétérojonction et crée un champ électrique qui vient s'opposer à la diffusion des porteurs entre les deux matériaux. On note la formation d'un puits de potentiel (notch) coté base et d'une barrière de potentiel (spike) côté émetteur dont les caractéristiques sont liées aux dopages N_{DE} et N_{AB} et à leur rapport N_{AB}/N_{DE} . Comme le dopage de l'émetteur est moins important que celui de la base, la barrière est très marquée et le puits quasiment inexistant. La barrière de potentiel ($\sim \Delta E_C$) s'ajoute donc dans la première estimation de l'efficacité d'injection de l'équation (1.3) [Kroemer82] :

$$\gamma \approx \left(1 + \frac{D_p \cdot W_B \cdot N_{AB}}{D_n \cdot W_E \cdot N_{DE}} \exp\left(-\frac{\Delta E_g - \Delta E_C}{kT}\right) \right)^{-1} = \left(1 + \frac{D_p \cdot W_B \cdot N_{AB}}{D_n \cdot W_E \cdot N_{DE}} \exp\left(-\frac{\Delta E_V}{kT}\right) \right)^{-1} \quad (1.6)$$

L'efficacité d'injection dans le cas d'une hétérojonction abrupte n'est donc plus gouvernée par la différence de bande interdite ΔE_g mais par la discontinuité ΔE_V qui n'est plus qu'une fraction de la première.

Notons que dans la pratique, la formation d'une hétérojonction suppose un accord de maille ou tout du moins un désaccord modéré des paramètres de maille cristalline des matériaux d'émetteur et de base afin d'obtenir une très faible densité de défauts à l'interface. Les discontinuités ΔE_V et ΔE_C sont des constantes du couple de matériaux et sont données dans le Tableau 1.2 pour plusieurs systèmes de matériaux III-V utilisés dans la fabrication de TBH.

Tableau 1.2 : Discontinuités des bandes de conduction et de valence de quelques hétérojonctions émetteur-base

Hétérojonction E/B	ΔE_C (eV)	ΔE_V (eV)
$\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As} / \text{GaAs}$	0,22	0,15
$\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As} / \text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$	0,48	0,24
$\text{InP} / \text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$	0,25	0,34

1.2.5.C. Transport électronique dans le cas de l'hétérojonction abrupte

On l'a vu, la formation d'un couple barrière/puits dans l'hétérojonction abrupte de type I réduit l'efficacité d'injection donnée par l'équation (1.3). Néanmoins, la présence du spike résulte en une action positive : il permet l'injection des électrons avec une énergie cinétique importante [kroemer82]. La vitesse de déplacement des porteurs dans la base est par conséquent supérieure à celle du régime de diffusion ce qui contribue à diminuer le temps de transit de base et favorise des fréquences de fonctionnement élevées du TBH.

Alors que dans le cas de l'homojonction, le mécanisme de transport des charges est régi par la diffusion, dans l'hétérojonction de type I abrupte, le transport à l'interface métallurgique est régi par deux effets supplémentaires :

- l'effet thermoïonique : les électrons passent au dessus du spike par excitation thermique. Ils ont une très faible probabilité de revenir dans l'émetteur et participent donc tous au courant.
- l'effet tunnel : les électrons d'énergie inférieure à la hauteur de barrière passent par effet tunnel à travers le spike. Le courant tunnel est significatif uniquement si la barrière est suffisamment mince. Il demeure plus faible que le courant thermoïonique, sauf lorsque l'activation thermique est très faible (i.e. à basse température) où il est prédominant.

Par conséquent, une grande majorité des électrons est injectée de l'émetteur vers la base du haut du spike qui joue le rôle de « rampe de lancement ». Le passage des porteurs du matériau à grand gap vers le matériau à petit gap se traduit par une brusque variation de leur énergie potentielle qui se transforme en énergie cinétique. Les électrons sont donc injectés dans la base avec un excès d'énergie cinétique qui conduit à un état hors équilibre et à un transport non-stationnaire, perpendiculairement aux jonctions.

Selon l'épaisseur de la base, une fraction des porteurs parcourt la base sans interagir avec le réseau et sans transférer leur excès d'énergie cinétique : c'est le cas des électrons balistiques. Dans $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$, leur vitesse est proche des 10^8 cm/s (soit 10 fois supérieure à celle des électrons diffusifs) [Katz92, Baquedano93]. Seul un processus de recombinaison peut les empêcher d'atteindre le collecteur. C'est finalement peu probable même avec les dopages p^{++} employés et ceci grâce aux faibles épaisseurs de base des TBH très hautes fréquences : dans une base en $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ de 40 nm, le temps de traversée des électrons balistiques est de 40 fs, soit plus de 50 fois inférieur à leur durée de vie pour un dopage p de 5×10^{19} cm^{-3} [Lefebvre05].

Pour une base d'épaisseur inférieure ou proche du libre parcours moyen inélastique, une partie des porteurs se déplacent dans un deuxième régime de transport hors équilibre : les électrons chauds ou quasi-balistiques. Leur vitesse initiale est proche de celle des balistiques mais ils subissent des interactions avec le réseau qui modifient quelque peu leur énergie et la direction de leur vecteur vitesse. Ils gardent néanmoins une distribution en vitesse proche des conditions initiales de leur injection dans la base et restent donc attrayants dans un objectif de performances fréquentielles. De plus, pour renouveler continuellement l'énergie perdue par les électrons au cours d'un déplacement quasi-balistique, on peut avoir recours à l'ingénierie des bandes. La maîtrise des techniques d'épitaxie permet d'introduire un pseudo-champ électrique grâce à une gradualité en composition et/ou en dopage (Figure 1.8) qui accélère les électrons dans la base. Par exemple une base graduelle de 65 nm en $\text{In}_{0,46}\text{Ga}_{0,54}\text{As} \rightarrow \text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ introduit un champ de 6 kV/cm qui permet de diminuer le temps de transit dans la base de 0,22 ps [Kurishima95].

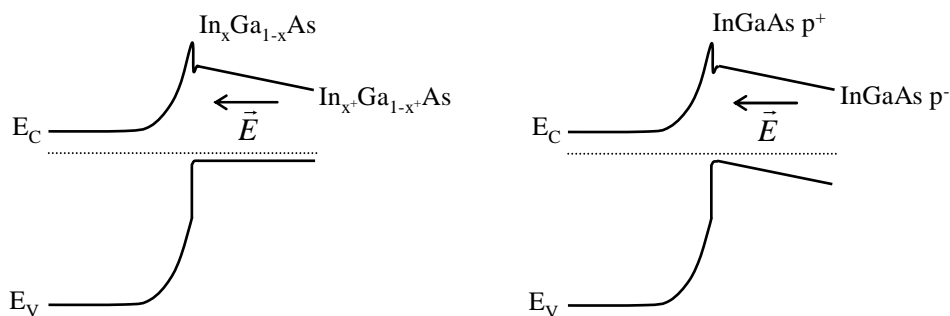


Figure 1.8 : Pseudo-champ électrique sous l'effet d'une gradualité en composition (gauche) et en dopage (droite) dans la base – cas de l'InGaAs

Enfin, si les TBH à hétérojonction abrupte de type I bénéficient de l'injection de porteurs rapides dans la base, il est cependant à noter que la différence d'énergie intervallée $\Delta E_{\Gamma-L}$ de la base est décrite comme la limite pour la hauteur possible de spike [Ankri82]. En effet, si la hauteur de spike est supérieure à $\Delta E_{\Gamma-L}$, les électrons transfèrent de la vallée Γ vers la vallée L et perdent de la vitesse du fait d'une masse devenue plus importante et donc d'une mobilité

diminuée. Pour des performances fréquentielles optimales, il faut donc que le couple de matériaux émetteur-base réponde à la condition : $\Delta E_C < \Delta E_{\Gamma-L}$.

1.2.5.D. Hétérojonction graduelle

L'introduction d'un aménagement structurel à la jonction émetteur-base permet de tirer parti de l'hétérojonction sans être pénalisé par l'efficacité d'injection γ réduite de l'hétérojonction abrupte. Il faut supprimer le spike pour les électrons à la bande de conduction, tout en conservant la barrière pour les trous à la bande de valence.

Pour se faire, une solution consiste à insérer une couche avec un gap intermédiaire entre ceux d'émetteur et de base. Les différentiels ΔE_g doivent se reporter principalement à la bande de valence pour atténuer le spike (exemple des quaternaires $\text{Ga}_{0,47-x}\text{Al}_x\text{In}_{0,53}\text{As}$ pour l'hétérojonction $\text{Al}_{0,48}\text{In}_{0,52}\text{As}/\text{Ga}_{0,47}\text{In}_{0,53}\text{As}$ [Malik83]). Une solution plus évoluée consiste à lisser la seule bande de conduction à l'aide d'une structure de type super-réseau qui utilise les matériaux d'émetteur et de base [Metzger92].

Si le spike est complètement lissé, l'injection électronique redevient majoritairement diffusive et l'efficacité d'injection est gouvernée par ΔE_g comme pour l'équation (1.3). Ce type d'aménagement est favorable à une faible consommation du composant, la tension de polarisation V_{BE} étant diminuée pour un même niveau d'injection [Yang02] mais il se fait au détriment du temps de traversée des porteurs.

1.2.6. Transistor bipolaire à double hétérojonction

Nous venons de décrire l'avantage d'utiliser une hétérojonction à la jonction émetteur-base. Nous montrons ici, qu'il peut également être intéressant d'appliquer ce principe à la jonction base-collecteur.

1.2.6.A. Limitation du transistor à simple hétérojonction

Un transistor bipolaire à simple hétérojonction (TBSH) comporte une hétérojonction émetteur-base comme nous venons de le voir et une homojonction base-collecteur. Le collecteur est donc réalisé dans le même matériau à petit gap que celui de la base.

En régime de fonctionnement normal, la jonction base-collecteur est polarisée en inverse. L'utilisation d'un matériau collecteur avec une faible bande interdite rend la diode base-collecteur très sensible au phénomène de claquage qui intervient pour une faible tension de polarisation inverse V_{BC} . Ceci constitue la principale limitation du TBSH et restreint son utilisation aux applications basses puissances.

Pour accroître la tension de claquage, il faut augmenter l'épaisseur du collecteur. Cela se fait au détriment du temps de transit à travers le collecteur et donc du fonctionnement

hyperfréquence (chapitre 1.4). Dans le TBSH, il faut donc envisager un compromis sur cette épaisseur afin de concilier tenue en tension et performances fréquentielles.

Il est possible de dépasser ce compromis en tirant avantage du concept de l'hétérojonction à la diode base-collecteur, plus précisément en utilisant un matériau à large bande interdite dans le collecteur. On obtient alors un transistor bipolaire à double hétérojonction (TBDH). La présence d'un matériau grand gap dans le collecteur autorise ainsi le fonctionnement du TBDH sous une plus forte tension de polarisation inverse V_{BC} que dans le cas du TBSH. Cela permet de conserver une tension de claquage élevée, même pour de faibles épaisseurs de collecteur. On peut ainsi minimiser le temps de transit de collecteur tout en conservant une bonne tenue en tension.

1.2.6.B. Optimisation de l'hétérojonction base-collecteur de type I

La mise en œuvre d'une hétérojonction à la diode base-collecteur implique l'existence d'une barrière de potentiel à l'entrée du collecteur. La présence du spike, bénéfique à la jonction émetteur-base, n'a que des conséquences néfastes à la jonction base-collecteur. Il empêche en effet la collection des électrons en sortie de base par le blocage du flux d'électrons à faible polarisation base-collecteur (Figure 1.9.a). L'effet de blocage des électrons rencontré dans un TBDH se manifeste sur les caractéristiques $I_C = f(V_{CE})$ par une faible pente en régime saturé, repoussant l'apparition du régime de fonctionnement normal vers les plus fortes tensions V_{CE} (chapitre 1.3.4).

Sans une optimisation de la transition base-collecteur, les performances des TBDH sont pénalisées. Ainsi, pour contourner l'effet de la barrière de potentiel, plusieurs stratégies d'optimisation structurelle ont été proposées :

- Un espaceur (Figure 1.9.b) : la première partie du collecteur est réalisée dans le matériau de la base non intentionnellement dopé ou dopé n. La jonction électrique pn est séparée de l'hétérojonction, repoussant ainsi la discontinuité dans le collecteur [Su85]. Les porteurs, accélérés dans l'espaceur, ont une énergie suffisante pour franchir la barrière. Cet aménagement est souvent utilisé dans les structures avec collecteur composite, en association avec l'une ou l'autre des optimisations décrites par la suite.
- Un plan de dopage n (Figure 1.9.c) : l'introduction d'un plan de dopage n à la sortie de la base abaisse la bande de conduction ce qui empêche l'accumulation des électrons dans le puits de l'hétérojonction et affine la barrière pour permettre leur passage par effet tunnel [Sugiura88, Fujihara01]. Cette solution a l'avantage de conserver un collecteur entièrement en InP qui favorise l'évacuation de la chaleur par rapport aux aménagements qui mettent en jeu des alliages ternaires ou quaternaires (cf. paragraphe 1.3.5.B).

- Une paire p^+/n^+ (Figure 1.9.d) : l'insertion devant la barrière d'un plan de dopage n associé à un plan de dopage p repose sur le même principe que précédemment : la paire p^+/n^+ crée localement un potentiel qui abaisse et affine la barrière, favorisant le passage des électrons par effet tunnel et réduisant par la même occasion leur accumulation dans le puits [Kurishima93, McAlister97].
- Une transition graduelle peut être introduite pour minimiser l'effet de blocage des électrons via des couches à gap intermédiaire entre celui de la base et du collecteur (Figure 1.9.e). Dans le cas de l'hétérojonction InGaAs/InP, le quaternaire InGaAsP est souvent utilisé [Chor96a]. Celui-ci permet de répartir la discontinuité de bande de conduction sur l'épaisseur du collecteur. Cette solution, associée à un espaceur et un plan de dopage, s'est révélé efficace [Ida02] mais présente néanmoins un inconvénient lié à une plus faible conductivité thermique de l'InGaAsP par rapport à l'InP et entraîne des difficultés d'ordre technologiques (gravure). Enfin, l'introduction d'un super-réseau permet d'améliorer encore la gradualité (Figure 1.9.f) [Griffith07].

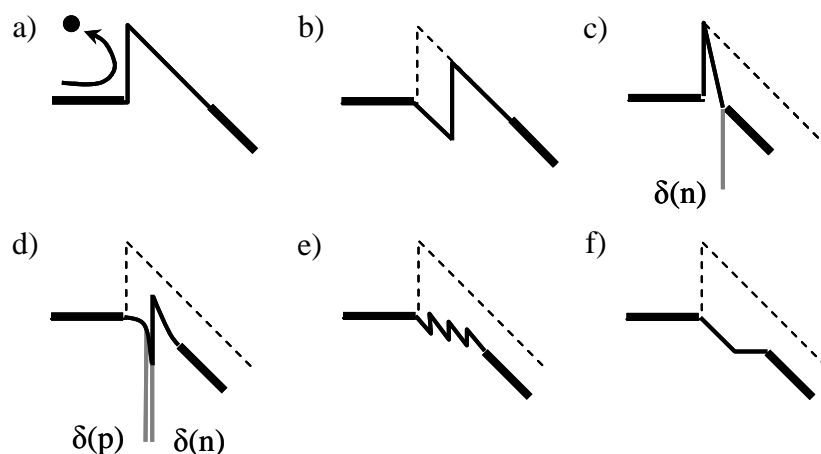


Figure 1.9 : Stratégies d'optimisation de la jonction base-collecteur : a) sans aménagement : blocage des électrons, b) espaceur, c) plan de dopage n, d) paire p^+/n^+ , e) lissage par gradualité avec des couches à gap intermédiaires, f) lissage via un super-réseau

1.2.6.C. Hétérojonction base-collecteur de type II

Vers la fin des années 90, une approche alternative pour supprimer la discontinuité de bande de conduction à l'hétéro-interface base-collecteur a été proposée par l'intermédiaire du système InP/GaAsSb [Bhat96, Matine98]. Cette approche, largement étudiée depuis 1998 par l'équipe du Professeur Bolognesi à l'Université Simon Fraser Island au Canada, consiste en la formation d'une hétérojonction de type II via l'utilisation d'une base en GaAsSb (en accord de maille avec InP).

Dans l'hétérojonction de type II (cf. Figure 1.10), le matériau à petite bande interdite est un puits de potentiel pour les trous, comme pour l'hétérojonction de type I mais il est une

barrière de potentiel pour les électrons. C'est dans cet alignement de bandes que réside l'intérêt principal du système InP/GaAsSb pour la formation d'une jonction base-collecteur :

- la discontinuité de bande de conduction négative (-0.11 à -0.18 eV [Hu98, Peter99, Lijadi05]) apporte un surplus d'énergie cinétique aux électrons en sortie de base et favorise leur injection dans le collecteur,
- l'importante discontinuité de bande de valence supprime toute injection de trous de la base vers le collecteur.

L'utilisation d'une hétérojonction de type II au niveau de la diode B/C permet donc d'utiliser un matériau à large bande interdite pour le collecteur, tout en assurant une collection complète des électrons sortant de la base.

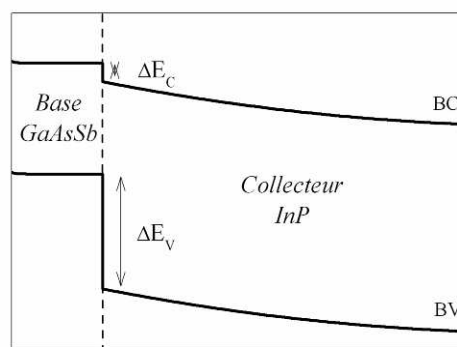


Figure 1.10 : Diagramme de bande de l'hétérojonction base-collecteur de type II du système $InP/GaAs_{0,51}Sb_{0,49}$

1.2.7. Structure de couche et fabrication d'un TBH

Quelque soit le système de matériaux utilisé, la fabrication d'un transistor bipolaire en technologie III-V nécessite tout d'abord la croissance épitaxiale des couches fondamentales d'émetteur, de base et de collecteur. Une structure typique inclut également des couches de contact adjacentes aux couches d'émetteur et de collecteur (contact émetteur et sous-collecteur, Figure 1.11) qui permettent de réaliser des contacts ohmiques de faibles résistivités. La plaque épitaxiée subit ensuite un traitement technologique qui comprend typiquement pour un procédé classique triple méssa :

- la gravure des couches d'émetteur, de base et de collecteur,
- le dépôt du système métallurgique pour réaliser les contacts ohmiques.

Les contacts ohmiques jouent un rôle essentiel dans le fonctionnement d'un transistor bipolaire et nécessitent des zones en matériaux de faible résistivité. Ceci est particulièrement vrai pour la commande de base en fonctionnement hyperfréquence. Par ailleurs, on a déjà mentionné et on le reverra (chapitre 1.4) que l'amélioration des performances fréquentielles d'un TBH passe notamment par la minimisation des temps de transit des porteurs à travers la

base et le collecteur. Le transport étant vertical, on réduit ces derniers en diminuant l'épaisseur des couches actives du composant.

Ces considérations imposent l'épaisseur et le niveau de dopage de la base qui est simultanément couche active et de contact : un TBH pour applications ultra-rapides doit avoir une base à la fois fine pour un temps de transit électronique réduit (40nm en 2000 et 20-30nm en 2004 pour la filière InP/InGaAs [lefebvre05]) et fortement dopée p^{++} (10^{19} - 10^{20} cm^{-3}) pour minimiser l'augmentation de la résistance de couche due à cette réduction d'épaisseur (cf. Equation (2.6)).

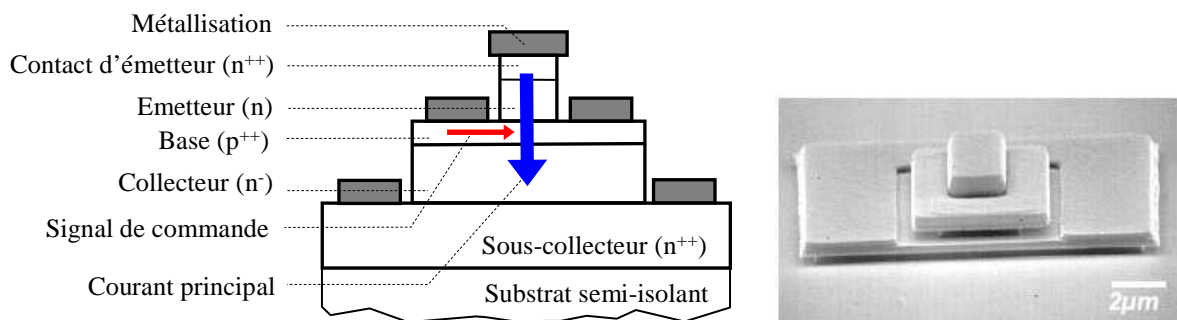


Figure 1.11 : Vue en coupe d'un transistor bipolaire en technologie triple mesa auto-alignée (gauche). TBH de 2 µm de largeur d'émetteur de la filière InP/InGaAs mis au point à Alcatel-Thales III-V Lab (droite)

Au niveau de l'émetteur et du collecteur, les métallisations sont déposées sur des couches adjacentes : leur dopage peut privilégier le transport électronique, sans dégrader le fonctionnement hyperfréquence du TBH. Pour favoriser une résistivité de contact et une résistance d'accès à travers la couche faible, le contact d'émetteur et le sous-collecteur sont réalisés en matériau à petite largeur de bande interdite très fortement dopé n^{++} (typiquement 10^{19} cm^{-3}), le dopage limite étant imposé par le procédé d'épitaxie.

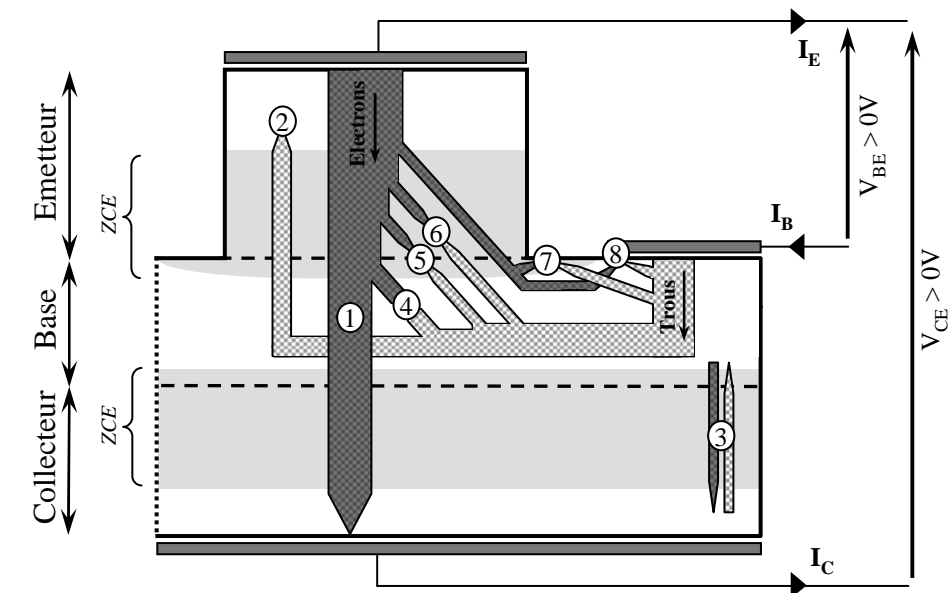
Comme signalé dans le chapitre 1.4, le fonctionnement fréquentiel d'un TBH dépend également fortement du temps de charge RC aux jonctions. Le dopage de l'émetteur est donc conditionné par la nécessité d'obtenir simultanément une bonne efficacité d'injection et une capacité émetteur-base faible. L'hétérojonction E/B autorise un dopage n suffisamment faible de l'émetteur (typiquement $1-5 \times 10^{17}$ cm^{-3}) pour y assurer une désertion des électrons quasi-totale aux faibles tensions. De la même manière, on trouve au niveau du collecteur un faible dopage n^- (typiquement $1-6 \times 10^{16}$ cm^{-3}) qui permet une localisation du champ de polarisation inverse dans le collecteur et une collection des électrons efficace via une zone quasi-neutre presque inexistante.

1.3. Fonctionnement en régime statique du TBH

Dans cette partie, nous allons décrire le fonctionnement du TBH en régime statique. L'analyse du comportement du composant en régime de tensions et de courants continus permet d'extraire certains paramètres importants caractéristiques et fournit nombre d'informations sur la qualité de la structure du transistor.

1.3.1. Bilan des différents courants du transistor

Nous l'avons déjà mentionné, le transistor bipolaire à hétérojonction est un composant qui fait intervenir les deux types de porteurs : électrons et trous. En régime de fonctionnement normal, l'étude des évolutions des courants du composant est représentative de sa structure et de son niveau de réalisation. Pour cela, il est nécessaire de présenter, sur la Figure 1.12, les différentes composantes des courants présents dans le dispositif.



- | | | |
|---|------------------|---|
| ① | I_{nEB} | Courant direct d'électrons injecté de l'émetteur vers la base |
| ② | I_{pEB} | Courant direct de trous injecté de la base vers l'émetteur |
| ③ | I_{CB0} | Courant inverse électrons-trous injecté à la jonction base-collecteur |
| ④ | $I_{rB,vol}$ | Courant de recombinaison électron-trou en volume de base |
| ⑤ | $I_{rEB,interf}$ | Courant de recombinaison électron-trou à l'interface émetteur-base |
| ⑥ | $I_{rEB,zce}$ | Courant de recombinaison électron-trou dans la ZCE émetteur-base |
| ⑦ | $I_{rB,surf}$ | Courant de recombinaison électron-trou en surface de base extrinsèque |
| ⑧ | $I_{rB,cont}$ | Courant de recombinaison électron-trou au niveau du contact de base |

Figure 1.12 : Courants d'électrons et de trous du TBH en régime de fonctionnement normal

Selon la Figure 1.12, le courant d'émetteur a six composantes et s'exprime par :

$$I_E = I_{nEB} + I_{pEB} + I_{rEB,interf} + I_{rEB,zce} + I_{rB,surf} + I_{rB,cont} \quad (1.7)$$

Le courant de base est composé de :

$$I_B = I_{pEB} + I_{rB,vol} + I_{rEB,interf} + I_{rEB,zce} + I_{rB,surf} + I_{rB,cont} - I_{CB0} \quad (1.8)$$

Et enfin, l'expression du courant de collecteur est telle que :

$$I_C = I_{nEB} - I_{rB,vol} + I_{CB0} \quad (1.9)$$

Ces trois expressions permettent bien de vérifier la loi de conservation des courants :

$$I_E = I_B + I_C \quad (1.10)$$

1.3.1.A. Courant direct d'électrons injecté de l'émetteur vers la base : I_{nEB}

Si on considère un TBH avec une hétérojonction émetteur-base de type I abrupte, le courant d'électrons injectés de l'émetteur vers la base, I_{nEB} , est principalement de nature thermoionique et est de la forme [Matine96] :

$$I_{nEB} = I_{SE} \left[\exp\left(\frac{qV_{BE}}{n_{EB}kT}\right) - 1 \right] \quad \text{avec le courant de saturation : } I_{SE} = A^* T^2 S_{EB} \exp\left(\frac{-q\phi_B}{kT}\right) \quad (1.11)$$

et la constante de Richardson : $A^* = \frac{4\pi q m_e^* k^2}{h^3}$

où n_{EB} , S_{EB} et ϕ_B sont respectivement le coefficient d'idéalité, la surface et la hauteur de barrière à franchir pour les électrons de la jonction émetteur-base et m_e^* la masse effective des électrons dans l'émetteur.

Dans cette expression (1.11), on pose l'hypothèse d'une hauteur de barrière ϕ_B indépendante de la tension de polarisation V_{BE} . Cette hypothèse tend à devenir caduque dans le cas où la jonction électrique pn et la jonction métallurgique sont dissociées : la présence d'une couche interfaciale à l'hétérojonction introduit une dépendance de ϕ_B avec le champ électrique.

1.3.1.B. Courant direct de trous injecté de la base vers l'émetteur : I_{pEB}

Le courant direct de trous injecté de la base vers l'émetteur est proportionnel à [Lefebvre05]:

$$I_{pEB} \propto N_{AB} \exp\left(\frac{-\Delta E_V}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) - 1 \right] \quad (1.12)$$

Quand la discontinuité ΔE_V est suffisamment élevée, ce courant est généralement négligeable devant le courant direct d'électrons injecté de l'émetteur vers la base. Toutefois, il peut prendre une importance relative à forte polarisation V_{BE} si le niveau de dopage de la base est élevé.

1.3.1.C. Courant inverse électrons-trous injecté à la jonction base-collecteur :

$$I_{CB0}$$

En mode de fonctionnement direct, la jonction base-collecteur est polarisée en inverse : la diffusion des porteurs majoritaires est bloquée. Toutefois, il existe toujours un faible courant de porteurs majoritaires I_{CB0} . Quand le TBH est passant, ce courant est négligeable devant le courant principal d'électrons si, bien entendu, la jonction B/C ne fuit pas. Le courant I_{CB0} peut également provenir d'effets d'avalanche à fort courant : il reste donc négligeable dans le cadre d'un fonctionnement normal.

1.3.1.D. Courant de recombinaison électron-trou en volume de base : $I_{rB,vol}$

Le courant $I_{rB,vol}$ dépend de la probabilité de recombinaison électron-trou ou en d'autres termes du rapport entre le temps de présence (ou temps de transit τ_B) et la durée de vie électronique τ_{nB} dans la base.

Le temps de présence peut être réduit en diminuant l'épaisseur de la base et en augmentant la vitesse à laquelle les électrons la traversent (transport balistique, quasi-balistique, introduction d'un pseudo-champ dans la base : chapitre 1.2.5.C).

La durée de vie électronique τ_{nB} représente le temps moyen au bout duquel l'électron aura disparu par un mécanisme de recombinaison. Elle est fonction de trois processus de recombinaison électron-trou à savoir :

- les recombinaisons Shockley-Read-Hall (SRH) qui font intervenir un centre recombinant (impureté, défaut cristallin, défaut de surface,...), sur lequel un électron et un trou se recombinent,
- les recombinaisons radiatives qui se font par émission d'un photon,
- les recombinaisons Auger qui correspond au passage en bande de valence d'un électron, avec transfert de l'énergie à un porteur libre.

La durée de vie électronique est donc définie par [Welser99, Vignaud02] :

$$\frac{1}{\tau_{nB}} = \frac{1}{\tau_{SRH}} + \frac{1}{\tau_{rad}} + \frac{1}{\tau_A} = \frac{1}{\tau_{SRH}} + B.N_{AB} + C.N_{AB}^2 \quad (1.13)$$

où B et C sont respectivement les coefficients de recombinaison radiative et Auger. Ces paramètres intrinsèques au matériau sont indépendants de sa qualité, alors que la probabilité des recombinaisons SRH dépend de la densité de défauts.

Le courant $I_{rB,vol}$ est directement proportionnel à I_{nEB} et impose des variations de I_B en $\exp(qV_{BE}/n_B kT)$ avec $n_B = 1$.

1.3.1.E. Courant de recombinaison électron-trou à l'interface émetteur-base :

$$I_{rEB,interf}$$

Le changement de matériaux semiconducteurs à une hétérojonction peut induire des défauts d'interface. En principe négligeable grâce aux techniques d'épithaxie actuelles, ce courant de recombinaison peut être plus important lors de procédés technologiques particuliers, comme par exemple en reprise d'épithaxie d'émetteur. Le courant $I_{rEB,interf}$ est alors prépondérant à faible injection et impose des variations du courant I_B en $\exp(qV_{BE} / n_B kT)$ avec $n_B \geq 2$ [Enquist93, Scott04, Wei04].

1.3.1.F. Courant de recombinaison électron-trou dans la ZCE émetteur-base :

$$I_{rEB,zce}$$

Le courant de recombinaison dans la ZCE émetteur-base $I_{rEB,zce}$ est donné par le modèle de Sah, Noyce et Shockley (SNS) [Matine96] :

$$I_{rEB,zce} = q \frac{\pi}{2} \frac{kT}{E_{EB}} S_{EB} \left(\frac{n_{iE} X_E}{\tau_{pE}} + \frac{n_{iB} X_B}{\tau_{nB}} \right) \exp\left(\frac{qV_{BE}}{2kT}\right) \quad (1.14)$$

où E_{EB} est le champ électrique de la jonction E/B, n_{iE} et n_{iB} sont les concentrations de porteurs intrinsèques dans l'émetteur et la base, X_E et X_B représentent l'épaisseur de la ZCE côté émetteur et côté base, τ_{pE} et τ_{nB} sont les durées de vie des porteurs minoritaires dans l'émetteur et la base. La dépendance de ce courant en $\exp(qV_{BE}/2kT)$ le rend négligeable à forte polarisation V_{BE} par rapport au courant utile qui varie en $\exp(qV_{BE}/kT)$.

Pour minimiser le courant $I_{rEB,zce}$ à faible polarisation, il faut que la ZCE soit principalement côté émetteur, $I_{rEB,zce}$ étant prépondérant côté base ($n_{iB} > n_{iE}$). Dans un TBH à hétérojonction abrupte, le fort dopage de la base par rapport à l'émetteur conduit à une faible valeur de X_B et réduit $I_{rEB,zce}$.

1.3.1.G. Courant de recombinaison électron-trou en surface de base extrinsèque : $I_{rB,surf}$

La surface des semiconducteurs présente, du fait de la rupture du réseau cristallin et de l'adsorption d'impuretés en surface, une forte densité de centres recombinants qui peut piéger les électrons injectés en périphérie de la jonction E/B.

L'expression du courant de recombinaison électron-trou en surface de base extrinsèque $I_{rB,surf}$ est reliée à [Matine96] :

$$I_{rB,surf} = q \cdot v_{r,surf} \cdot L_{nB,surf} \cdot n_{iB} \cdot P_{EB} \cdot \exp\left(\frac{qV_{BE}}{n_s kT}\right) \quad (1.15)$$

où $v_{r,surf}$ et $L_{nB,surf}$ sont la vitesse de recombinaison et la longueur de diffusion des électrons en surface de base (paramètres intrinsèques au matériau). P_{EB} est le périmètre de la jonction E/B.

Pour réduire ce courant $I_{rB,surf}$, certains aménagements ont été mis en place comme l'utilisation d'un ledge ou d'une couche de passivation (Si_xN_y , SiO_2 , polyimide, BCB...). Une technologie auto-alignée permet également de réduire la surface de base exposée et donc le courant de recombinaison $I_{rB,surf}$. Cette dernière est néanmoins sujet à caution puisqu'elle peut favoriser la recombinaison au niveau du contact de base (cf. paragraphe suivant).

1.3.1.H. Courant de recombinaison électron-trou au niveau du contact de base : $I_{rB,cont}$

Les électrons injectés dans la base, en bord d'émetteur, peuvent diffuser vers le contact de base où ils se recombinent à l'interface contact/semiconducteur. Quand la distance entre le mesa d'émetteur et le contact est suffisamment élevée, le courant $I_{rB,cont}$ est généralement négligeable devant le courant direct d'électrons injectés de l'émetteur vers la base. Toutefois, il peut prendre une importance relative dans une technologie avec base auto-alignée pour laquelle l'espacement entre le mesa d'émetteur et le contact de base est réduit à la profondeur de sous-gravure des couches d'émetteur.

1.3.2. Gains en courant statique

L'amplification du transistor bipolaire est quantifiée par le gain en courant qui correspond au rapport du courant de sortie sur le courant d'entrée. Il existe plusieurs gains en courant selon la manière dont est connecté le dispositif.

En montage base-commune, le gain en courant est noté α et est égal à :

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} < 1 \quad (1.16)$$

En montage émetteur-commun, le plus utilisé, le gain en courant statique β est défini par :

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (1.17)$$

Le gain en courant statique maximum β_{max} est lié au temps de transit τ_B et à la durée de vie des électrons dans la base τ_{nB} par :

$$\beta_{max} = \frac{\tau_{nB}}{\tau_B} \quad (1.18)$$

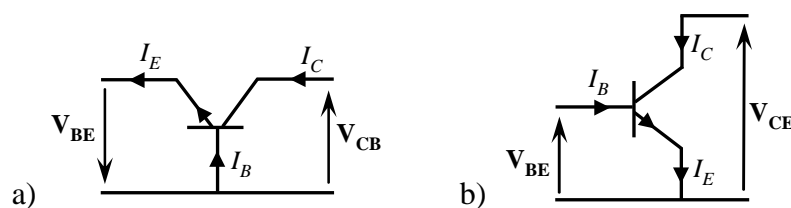
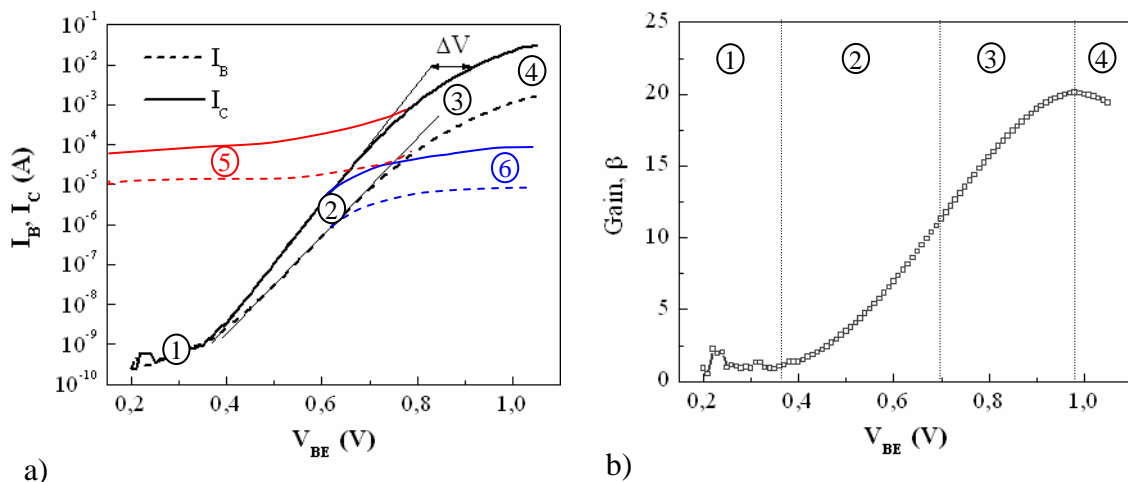


Figure 1.13 : Montages a) base-commune, b) émetteur-commun

1.3.3. La courbe de Gummel : $(I_B, I_C) = f(V_{BE})$ à tension V_{CE} constante

La courbe de Gummel (Gummel plot) décrit l'évolution du courant de base I_B et du courant de collecteur I_C en fonction de la tension de polarisation V_{BE} , pour une tension V_{BC} fixée (nulle ou inverse). L'écart entre les courbes I_B et I_C représente, de ce fait, l'évolution du gain ($\beta = I_C/I_B$) en fonction de V_{BE} . La courbe de Gummel est généralement représenté avec une échelle logarithmique en courant ce qui permet de faire apparaître des effets qui se trouvent rejetés à des densités de courant très faibles.

La Figure 1.14 représente une courbe de Gummel mesuré pour $V_{BC} = 0$ et la courbe du gain β qui lui est associé.



- | | |
|--|---------------------------------|
| ① Courant de base dominé par les recombinaisons en ZCE E/B | ④ Phénomènes de forte injection |
| ② Zone de transition | ⑤ Courants de fuite en excès |
| ③ Zone de fonctionnement normal | ⑥ Résistances séries en excès |

Figure 1.14 : a) Exemple de courbe de Gummel et b) courbe de gain β correspondante

L'exploitation de ce diagramme permet d'évaluer le niveau de qualité de la structure et plus précisément, des jonctions émetteur-base et base-collecteur.

Pour les faibles tensions de polarisation V_{BE} (région ①), le courant injecté dans la base à la jonction émetteur-base est très faible. Une grande proportion des électrons injectés se recombinent sur les centres recombinants présents à l'interface, à la surface ou dans la ZCE de la jonction E/B, Les courants de recombinaison $I_{rEB\ interf}$, $I_{rEB\ zce}$, $I_{rB\ surf}$ dominant alors le courant I_B . Une très faible partie du courant injecté ne se recombine pas et atteint le collecteur, contribuant au faible courant de collecteur. Dans cette région, le gain en courant est donc proche de zéro.

Notons que si la mesure est réalisée pour $V_{BC} \neq 0$, le courant I_C à faibles tensions V_{BE} correspond au courant inverse de la diode base-collecteur I_{CB0} [Caffin96]. L'étude du diagramme de Gummel à faible polarisation V_{BE} permet ainsi de mettre en évidence la présence de courants de fuite en excès (cas ⑤)

Pour des valeurs de V_{BE} plus élevées (*région* ②), le courant injecté par l'émetteur augmente et une partie plus conséquente des électrons parvient à traverser la base et à être collectée du fait de la saturation des centres recombinants de surface et du volume proche de l'hétérojonction. Il y a alors effet d'amplification et le gain en courant augmente. On observe une évolution linéaire de I_B et I_C avec V_{BE} qui permet la détermination des courants de saturation I_{Bsat} et I_{Csat} et des coefficients d'idéalité n_B et n_C des courants de base et de collecteur à partir des équations :

$$I_B = I_{Bsat} \exp\left(\frac{qV_{BE}}{n_B kT}\right) \text{ et } I_C = I_{Csat} \exp\left(\frac{qV_{BE}}{n_C kT}\right) \quad (1.19)$$

La valeur de n_B reflète la qualité de la structure et de l'épitaxie. L'interprétation du courant de base est néanmoins peu aisée car il englobe tous les mécanismes parasites décrits au paragraphe 1.3.1 (cf. équation (1.8)). Ainsi, la difficulté réside dans la distinction entre chaque contribution.

Pour des valeurs de V_{BE} encore plus élevées (*région* ③), les courants de base et de collecteur deviennent suffisamment importants pour que la chute de tension due aux résistances de l'émetteur (R_E) et de la base (R_B) soit non négligeable (Figure 1.15). La tension réelle aux bornes de la jonction émetteur-base est alors $V_{B'E'} < V_{BE}$ telle que :

$$V_{B'E'} = V_{BE} - I_E R_E - I_B R_B \approx V_{BE} - \Delta V \text{ avec } \Delta V = I_C \left(R_E + \frac{R_B}{\beta} \right) \quad (1.20)$$

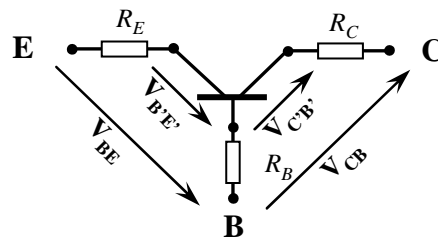


Figure 1.15 : Représentation schématique des résistances série du TBH

Ce phénomène se traduit par une saturation des courants I_B et I_C et décale les courbes de ΔV sur la Figure 1.14.a.

Ainsi, le cas ⑥ est représentatif d'un composant avec un excès de résistances séries.

Enfin, aux très fortes densités de courant (*région* ④), la dégradation brutale du gain est reliée à l'apparition des phénomènes de forte injection décrits au paragraphe 1.3.5.

1.3.4. Les caractéristiques $I_C(V_{CE})$: $I_C = f(V_{CE})$ à courant I_B constant

En montage émetteur-commun, le réseau de caractéristiques de sortie d'un transistor bipolaire représente les courants de collecteur I_C en fonction de la tension de polarisation V_{CE} mesurés pour différentes valeurs de courant de base I_B .

La Figure 1.16, reprise de [Lefebvre05], schématise l'évolution d'une courbe $I_C = f(V_{CE})$ pour une valeur de courant de base et les changements qui s'opèrent sur le diagramme de bande d'un TBDH. Ce schéma met en évidence quatre régimes de fonctionnement distincts.

1.3.4.A. Régime inversé (①-②)

Dans ce régime, les tensions V_{BE} et V_{BC} sont toutes les deux positives.

En effet, la caractéristique étant mesurée pour une valeur I_B non nulle, un potentiel non nul est appliqué sur la base. A $V_{CE} = 0V$ (①), on a donc $V_{BE} = V_{BC} = V_{base}$: les jonctions émetteur-base et base-collecteur sont toutes deux polarisées en direct. Le courant collecteur délivré provient principalement du flux d'électrons allant du collecteur vers la base (à tension appliquée égale, la conduction est plus aisée à la diode base-collecteur qu'à la diode émetteur-base). I_C présente donc une valeur négative de l'ordre de $-I_B$ pour les valeurs de V_{CE} très proches de $0V$.

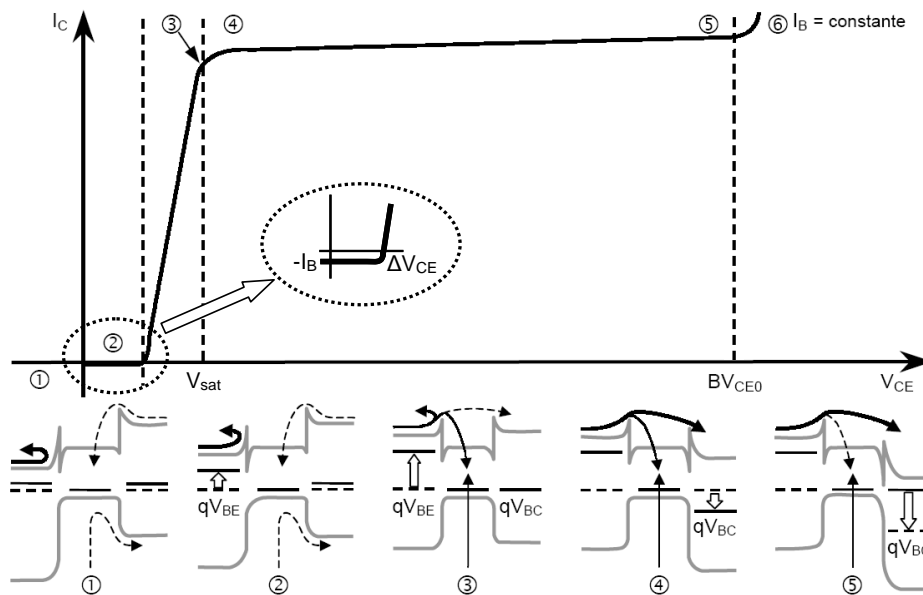


Figure 1.16 : Caractéristique statique $I_C(V_{CE})$ à I_B constant et évolutions du diagramme de bande associées (d'après [Lefebvre05])

Du fait des dopages utilisés et des largeurs des ZCE, toute augmentation de V_{CE} est majoritairement reportée sur la tension V_{BE} . Ainsi, pour les plus fortes valeurs de V_{CE} (②), le courant injecté à la jonction émetteur-base augmente progressivement jusqu'à annuler le courant opposé injecté par la diode B/C toujours sous polarisation directe. Le courant I_C

jusqu'alors négatif s'annule pour une tension ΔV_{CE} appelée tension de seuil. Cette tension qui correspond à la différence des tensions de seuil aux deux jonctions B/E et B/C du TBH est donnée à partir du modèle d'Ebers-Moll par la relation [Chand85] :

$$\Delta V_{CE} = V_{CE}|_{I_C=0} = n_{BC} \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{A_C J_{BCsat}}{\alpha A_E J_{BEsat}} \right) + \left(1 - \frac{n_{BC}}{n_{BE}} \right) (V_{BE} - I_B R_B) + \frac{n_{BC}}{n_{BE}} I_B R_E \quad (1.21)$$

où α est le gain statique en courant en montage base-commune. J_{BEsat} , n_{BE} et A_E sont respectivement le courant de saturation, le coefficient d'idéalité et la surface de la jonction émetteur-base. De même : J_{BCsat} , n_{BC} et A_C pour la jonction base-collecteur.

1.3.4.B. Régime saturé (②-③)

La zone de fonctionnement $\Delta V_{CE} < V_{CE} < V_{sat}$ correspond au régime saturé. L'augmentation de V_{CE} entraîne une faible augmentation du potentiel de la jonction émetteur-base jusqu'à une valeur sensiblement constante imposée par le courant I_B fixé (③). L'injection électronique vers le collecteur est favorisée et I_C augmente. Parallèlement, le potentiel de la jonction base-collecteur ($V_{BC} = V_{BE} - V_{CE}$) diminue jusqu'à s'annuler à $V_{CE} = V_{sat}$.

En tenant compte de la chute de tension aux bornes des jonctions E/B et B/C (cf. Figure 1.15), la tension V_{sat} est donnée par :

$$V_{sat} = V_{B'E'} + R_E I_E + R_C I_C \approx V_{B'E'} + (R_E + R_C) I_C \quad (1.22)$$

Ainsi, la pente de la droite décrite par l'ensemble des tensions de saturation est donnée par :

$$\left. \frac{dV_{CE}}{dI_C} \right|_{sat} = R_E + R_C \quad (1.23)$$

Notons que cette pente traduit également l'effet de blocage à la jonction base-collecteur d'un TBDH qui agit comme une résistance supplémentaire [Su85].

1.3.4.C. Régime normal direct (④-⑤)

Le régime de fonctionnement normal direct est atteint en ④. Alors que la polarisation de la jonction émetteur-base est fixée par I_B ($V_{BE} > 0V$), le potentiel de la jonction base-collecteur devient négatif ($V_{BC} < 0V$). La collection des électrons est alors optimale et le gain β est maximum. L'écart ΔI_C entre deux courbes du réseau est proportionnel au gain β tel que $\beta = \Delta I_C / \Delta I_B$.

Dans le cas idéal, la pente de la caractéristique $I_C = f(V_{CE})$ qui représente la conductance de sortie du transistor est nulle. Dans la pratique, le courant collecteur varie légèrement avec la tension émetteur-collecteur sous l'influence simultanée de l'effet Early (i.e. modulation de l'épaisseur électrique de la base due à la hausse de $|V_{BC}|$), des éventuels courants de fuites de

la jonction B/C ou encore des effets thermiques qui induisent une pente négative de la caractéristique (cf. paragraphe 1.3.5.B).

1.3.4.D. Claquage (⑤)-⑥)

Pour $V_{CE} > BV_{CE0}$, la polarisation inverse de la jonction base-collecteur V_{BC} devient très importante. Le fort champ électrique qui règne dans la zone déplétée du collecteur provoque l'augmentation du courant de fuite de la jonction base-collecteur par effet tunnel bande à bande et/ou par ionisation par impact. Dans le cas du dernier phénomène, les électrons qui sont accélérés par le fort champ électrique de la jonction acquièrent assez d'énergie cinétique pour créer des paires électron-trou : lors d'une collision avec le réseau cristallin, un porteur libère son énergie, ionise l'atome rencontré et déplace un électron de la bande de valence vers la bande de conduction. Les porteurs ainsi libérés sont également accélérés et génèrent à leur tour d'autres paires électron-trou. Il y a alors multiplication des porteurs et apparition du phénomène d'avalanche.

On définit un coefficient M comme le facteur de multiplication du courant d'électrons collectés (I_{nC}). Il est égal au rapport du courant total I_C sur le courant d'électrons collectés :

$$M = \frac{I_C}{I_{nC}} \quad (1.24)$$

On a également :

$$I_C = \alpha \cdot M \cdot I_E \quad (1.25)$$

où α est le gain en courant en montage base-commune défini paragraphe 1.3.2, également appelé facteur de transport dans la base.

Le claquage se traduit par une très forte augmentation du courant I_C qui peut conduire à la destruction du composant. Ce phénomène est caractérisé par la tension de claquage BV_{CE0} (pour « breakdown voltage ») qui détermine la tension maximale de fonctionnement. Elle est mesurée en imposant un courant de base I_B nul.

1.3.5. Effets limitatifs en régime de forte injection

En régime de forte injection, les performances de transistors bipolaires sont dégradées par des effets d'ordres électronique et thermique dans le collecteur.

1.3.5.A. Effet Kirk

Une forte injection des électrons de l'émetteur vers la base entraîne une augmentation de la densité de courant collecteur. La charge transportée par le courant d'électrons modifie alors la charge électrique de la zone de charge d'espace de la jonction base-collecteur : à l'origine positive (matériau dopé n déplété), elle s'annule quand la densité d'électrons injectés dans le

collecteur est égale à celle des charges ionisées puis devient négative. Le profil du champ électrique dans le collecteur se modifie et c'est l'annulation du champ électrique en entrée de collecteur qui annonce l'apparition de l'effet Kirk [Kirk62]. Cet effet se traduit par une remontée des bandes de valence et de conduction de la zone de charge d'espace base-collecteur comme le montre la Figure 1.17.

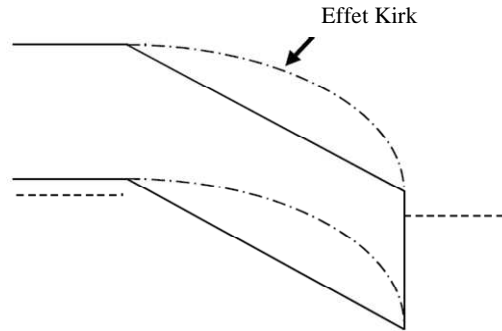


Figure 1.17 : Schéma des bandes d'une jonction base-collecteur à l'équilibre et au seuil de l'effet Kirk

Dans un TBSH, ce phénomène entraîne une extension de la ZCE B/C par compensation de la charge côté collecteur. Cela conduit à une augmentation de la largeur effective de base (« base pushout ») qui provoque une hausse de $I_{RB\ vol}$ et donc une diminution du gain en courant. Simultanément, le temps de transit dans la base augmente alors que le temps de transit dans le collecteur diminue.

Dans les TBDH, le phénomène est plus brutal. En effet, du fait de la discontinuité de bande de valence ΔE_V , les trous de la base ne peuvent pas diffuser dans le collecteur pour compenser l'excès de charge : l'inversion du champ électrique est rapide. On observe un blocage des électrons à la jonction base-collecteur, même optimisée, et l'accumulation des électrons dans les puits génère une charge fortement négative qui précipite le phénomène. Les temps de transit dans la base et le collecteur sont augmentés et le gain chute rapidement.

Le seuil de l'effet Kirk J_{CKirk} dépend du dopage et de l'épaisseur du collecteur tel que [VanDerToorn07]:

$$J_{CKirk} = v_{coll} \left(qN_{DC} + \frac{2\epsilon_C V}{W_C^2} \right) \text{ avec } V = - \int_0^{w_C} E(x) dx = V_{CB} + V_{biBC} \quad (1.26)$$

où v_{coll} , N_{DC} , W_C et ϵ_C sont respectivement la vitesse des électrons, le niveau de dopage, l'épaisseur et la permittivité relative dans le collecteur. V qui représente la différence de potentiel dans le collecteur est obtenue par intégration du champ électrique E et est égal à la somme de la tension de diffusion à l'hétérojonction base-collecteur V_{biBC} et de la tension de polarisation V_{CB} .

Pour repousser le seuil de l'effet Kirk, on peut donc augmenter le dopage N_{DC} et/ou diminuer l'épaisseur W_C mais ceci se fait au détriment de la tenue en tension du composant (voir paragraphe 1.3.4.D).

1.3.5.B. Auto-échauffement

En régime de forte injection, le composant s'échauffe sous l'effet des fortes densités de courant qui le parcourent (plusieurs mA par μm^2), ce qui modifie son fonctionnement. L'augmentation de la température dans la partie active du TBH limite ses performances et peut également entraîner une dégradation prématurée du dispositif.

L'augmentation de la température modifie les propriétés physiques du réseau cristallin. Les électrons se heurtent plus fréquemment aux atomes ce qui diminue leur vitesse et le temps de transit. Ce phénomène entraîne une diminution du gain statique en courant β et pénalise la montée en fréquence (cf. chapitre 1.4.2).

On définit une zone limite de fonctionnement du transistor comprise entre la tension de saturation V_{sat} à fort niveau d'injection, la tension de claquage BV_{CE0} et une courbe d'isopuissance (Figure 1.18.a), au-delà de laquelle le composant est détruit par claquage dû au phénomène d'ionisation par impact et/ou du fait des effets thermiques. Notons que sur la Figure 1.18.a, la pente négative de la caractéristique $I_C(V_{\text{CE}})$ aux forts niveaux d'injection est typique du phénomène d'auto-échauffement et est le résultat de la chute du gain statique en courant avec la puissance dissipée.

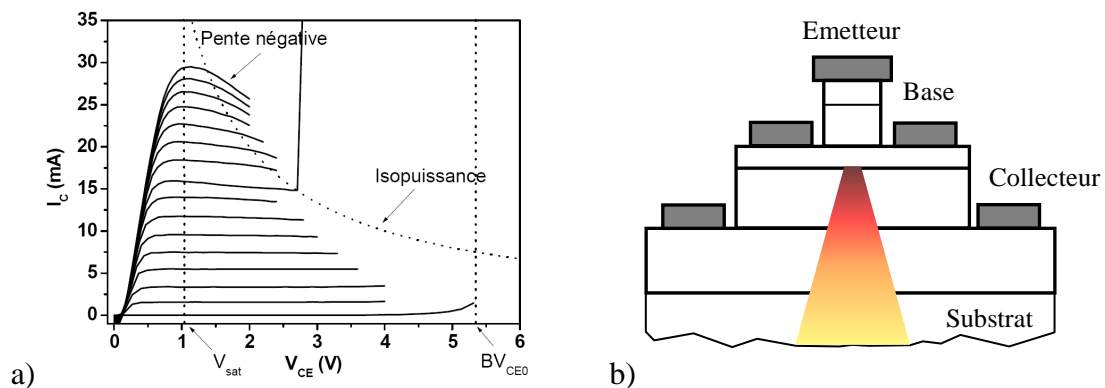


Figure 1.18 : a) Zone limite de fonctionnement d'un TBH (d'après [Nodjiadjim09])
b) Schématisation de l'évacuation de la chaleur dans un TBH

Dans un TBH, la chaleur est principalement générée au niveau de la jonction base-collecteur qui est le siège d'un fort courant de collecteur et d'une forte tension de polarisation V_{BC} et est majoritairement évacuée par le substrat (de l'ordre de 70% [Dahlström04]) (Figure 1.18.b).

Pour prendre en compte l'auto-échauffement dans les TBH, on élabore un réseau thermique qui vient se juxtaposer au réseau électrique du composant. Le courant de collecteur I_C est

remplacé par la puissance thermique dissipée par le composant P_{diss} , et la variation de température ΔT est assimilée à la différence de potentiel. Ainsi, en régime statique, la température s'élève proportionnellement à la puissance thermique dissipée. Le rapport entre les variations de ces deux grandeurs s'appelle la résistance thermique R_{TH} (en K/W) du composant, qui s'exprime par :

$$R_{TH} = \frac{\Delta T}{P_{diss}} \quad (1.27)$$

La résistance thermique est un facteur de mérite significatif de l'auto-échauffement dans les transistors bipolaires. Elle est une mesure de la capacité à dissiper la chaleur générée, et ne dépend que de l'environnement du composant (semiconducteurs, substrats, passivant, métaux de connexion).

1.4. Fonctionnement en régime dynamique

Le fonctionnement du TBH en régime statique vient d'être décrit. Les composants développés dans ce travail étant destinés à la réalisation de circuits hautes fréquences, nous introduisons, dans cette partie la méthode de caractérisation des TBH à haute fréquence. Nous décrivons ensuite les facteurs de mérite utilisés pour évaluer le fonctionnement dynamique du TBH.

1.4.1. Paramètres S et gains dynamiques

1.4.1.A. Théorie des quadripôles et matrice [S]

Pour évaluer le fonctionnement dynamique petit signal du composant, on étudie sa réponse à un signal sinusoïdal donné, à fréquence variable. Le transistor est alors assimilé à un quadripôle. Il peut donc être défini grâce à la représentation en paramètres Z (impédances), Y (admittances) et H (paramètres hybrides) qui expriment les relations entre les grandeurs petits signal i_1 , i_2 , v_1 et v_2 , respectivement courants et tensions en entrée et en sortie du quadripôle (Figure 1.19).

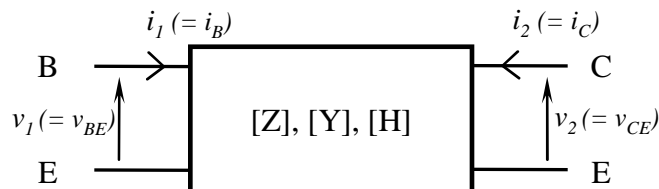


Figure 1.19 : Représentation du TBH en montage émetteur-commun par un quadripôle

Ces matrices de transfert sont données par :

$$\text{Matrice impédance [Z]} \quad \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} \quad (1.28)$$

$$\text{Matrice admittance [Y]} \quad \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} \quad (1.29)$$

$$\text{Matrice hybride [H]} \quad \begin{pmatrix} v_1 \\ i_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ v_2 \end{pmatrix} \quad (1.30)$$

Dans le cas d'un transistor bipolaire monté en émetteur-commun, les données en entrée sont les valeurs dynamiques du courant de base i_B et de la tension de polarisation émetteur-base v_{BE} . En sortie, on trouve le courant de collecteur i_C et la tension émetteur-collecteur v_{CE} .

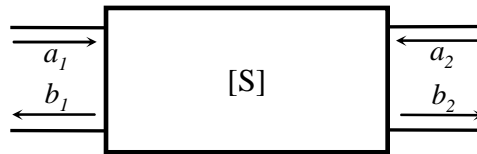


Figure 1.20 : Ondes incidentes et réfléchies pour la mesure des paramètres S

La mesure directe des éléments des matrices de transfert Z, Y ou H n'étant pas possible en hautes fréquences, on introduit les paramètres S [Kurokawa65]. Dans ce formalisme, le composant est considéré comme un quadripôle soumis à des ondes incidentes notées a_i qui sont transmises ou réfléchies, notées b_j . Les relations linéaires entre ces ondes constituent la matrice S (« scattering ») :

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \quad (1.31)$$

Les paramètres S sont mesurés à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel. En analysant successivement les réponses b_1 et b_2 à des excitations a_1 et a_2 , à différentes fréquences, on déduit les termes de la matrice S_{ij} . Notons que des matrices de passage permettent de passer du formalisme ondes (S) au formalisme courants/tensions (Z, Y, H).

1.4.1.B. Gains dynamiques

La mesure des paramètres S permet notamment de calculer les gains dynamiques du composant qui serviront à l'extraction des fréquences de coupure, point qui sera détaillé dans le paragraphe suivant.

On définit le gain dynamique en courant H_{21} comme le rapport des courants petits signaux i_B et i_C . Il est donné par :

$$H_{21} = \frac{-2S_{21}}{(1 - S_{11})(1 + S_{22}) + S_{12}S_{21}} \quad (1.32)$$

On exprime également les gains en puissance du transistor à partir, respectivement, des paramètres S et des paramètres hybrides H du transistor :

Gain maximum du quadripôle unilatéralisé
MAG (Maximum Available Gain)

$$MAG = \frac{|S_{21}|^2}{(1 - |S_{11}|^2)(1 - |S_{22}|^2)} \quad (1.33)$$

Gain de Mason U

$$U = \frac{|H_{21} + H_{12}|^2}{4[\Re(H_{11})\Re(H_{22}) + \Im(H_{21})\Im(H_{12})]} \quad (1.34)$$

1.4.2. Fréquences de coupure f_T et f_{MAX}

La fréquence de transition f_T et la fréquence maximale d'oscillation f_{MAX} sont les facteurs de mérite du fonctionnement en dynamique du TBH. Elles correspondent aux fréquences pour lesquelles les gains en courant et en puissance sont égaux à 1.

Notons que le gain de Mason U est le plus utilisé pour l'extraction de f_{MAX} . De plus, du fait des fréquences de coupure élevées des dispositifs, les valeurs de f_T et f_{MAX} sont souvent extrapolées à partir des courbes d'évolution des gains en fonction de la fréquence, selon une pente théorique décroissante de -20dB/décade, comme illustré Figure 1.21.

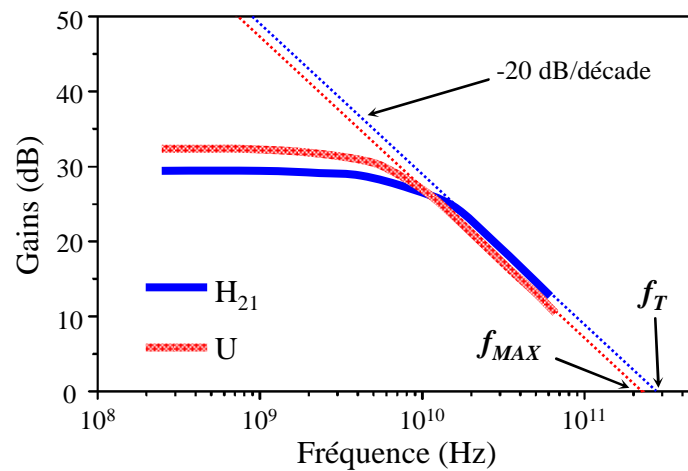


Figure 1.21 : Extraction des fréquences de coupure f_T et f_{MAX} à partir des gains en courant H_{21} et de Mason U

1.4.2.A. Expression de la fréquence de transition f_T

L'expression de la fréquence de transition f_T est obtenue à partir de l'exploitation du schéma équivalent petit signal (cf. chapitre 4).

Elle tient compte du temps de traversée τ_{EC} des porteurs à travers la structure du TBH (du contact d'émetteur au contact de collecteur) tel que :

$$f_T = \frac{1}{2\pi\tau_{EC}} = \frac{1}{2\pi(t_{EB} + \tau_B + t_{BC} + \tau_C)} \quad (1.35)$$

où t_{EB} et t_{BC} sont les temps de charge des jonctions émetteur-base et base-collecteur et τ_B et τ_C sont les temps de transit dans la base et le collecteur.

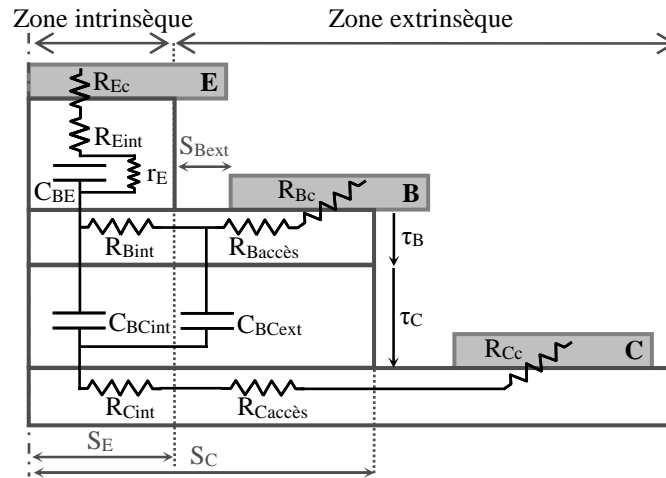


Figure 1.22 : Origine des éléments parasites dans un TBH (demi-coupe latérale)

Nous présentons dans la suite de cette partie les expressions des éléments t_{EB} , τ_B , t_{BC} et τ_C qui induisent un retard dans le transport des électrons. Nous nous appuyons pour cela sur la Figure 1.22 qui illustre l'origine des éléments qui limitent les performances fréquentielles.

1.4.2.A.a. Temps de charge de la jonction émetteur-base t_{EB}

Le temps de charge de la jonction émetteur-base t_{EB} est donné par l'expression [Matine96] :

$$t_{EB} = r_E C_{BE} \quad (1.36)$$

avec r_E la résistance dynamique :

$$r_E = \frac{dV_{BE}}{dI_E} = \frac{nkT}{qI_E} \quad (1.37)$$

et C_{BE} la capacité de la ZCE émetteur-base :

$$C_{BE} = S_E \sqrt{\frac{q\epsilon_E N_{DE}}{2(V_{biEB} - V_{BE})}} \quad (1.38)$$

où n est le coefficient d'idéalité de la jonction. S_E , ϵ_E et N_{DE} sont la surface effective, la permittivité et le niveau de dopage de l'émetteur. V_{biEB} est la tension de diffusion de l'hétérojonction émetteur-base.

L'expression de la capacité de transition C_{BE} est valable à faible densité de courant dans le cas d'une base fortement dopée par rapport à l'émetteur, l'extension de la ZCE dans la base étant négligeable.

Le temps de charge de la jonction émetteur-base est fortement influencé par les dimensions latérales du composant et, plus précisément, par la surface de l'émetteur S_E . En effet, t_{EB} est inversement proportionnel à la densité de courant d'émetteur $J_E = I_E/S_E$. La diminution de ce

temps de charge nécessite de diminuer C_{BE} via une réduction des dimensions latérales de la jonction émetteur-base (i.e. réduction de S_E). On assiste alors à une hausse de J_E à courant constant.

1.4.2.A.b. Temps de transit dans la base τ_B

Le temps de transit dans la base τ_B dépend de la nature du transport des électrons dans la base. Il dépend donc du type de base (uniforme ou graduelle), de l'hétérojonction émetteur base (abrupte ou graduelle) et des matériaux qui la constituent (ΔE_C , $\Delta E_{\Gamma-L}$) (cf. paragraphe 1.2.5).

Les différentes expressions de τ_B sont données par [Sicault01] :

$$\text{Transport diffusif} \quad \tau_{Bdiff} = \frac{W_B^2}{2D_{nB}} \quad (1.39)$$

$$\text{Dérive sous pseudo-champ électrique F (drift)} \quad \tau_{Bdrift} = \frac{W_B}{\mu_{nB} F} \quad (1.40)$$

$$\text{Transport balistique} \quad \tau_{Bball} = \frac{W_B}{v_{ball}} \quad (1.41)$$

où W_B est l'épaisseur de la base, μ_{nB} et D_{nB} sont la mobilité et le coefficient de diffusion des électrons dans la base et v_{ball} est la vitesse ballistique des électrons dans la base.

La structure verticale (i.e. épaisseurs des couches) est le principal paramètre qui influe sur le temps de transit τ_B par le biais de l'épaisseur de la base qui doit être minimisée, quelque soit le régime de transport.

1.4.2.A.c. Temps de charge de la jonction base-collecteur t_{BC}

Le temps de charge de la jonction base-collecteur t_{BC} est donné par [Matine96] :

$$t_{BC} = (R_C + R_E + r_E)C_{BC} \quad (1.42)$$

avec C_{BC} la capacité de la ZCE base-collecteur :

$$C_{BC} = S_C \sqrt{\frac{q\epsilon_C N_{DC}}{2(V_{biBC} - V_{BC})}} \quad (1.43)$$

où S_C , ϵ_C et N_{DC} sont la surface, la permittivité et le niveau de dopage du collecteur. V_{biBC} est la tension de diffusion de l'hétérojonction base-collecteur. L'expression de la capacité de transition C_{BC} est valable dans le cas d'un collecteur épais très faiblement dopé par rapport à la base, le dopage N_{DC} étant minimisé pour ne pas anticiper le claquage.

Comme indiqué sur la Figure 1.22, les résistances totales d'émetteur R_E et de collecteur R_C comprennent plusieurs composantes (les résistances intrinsèques R_{Eint} et R_{Cint} , les résistances de contact R_{Ec} et R_{Cc} et la résistance d'accès $R_{Caccès}$) qui doivent être minimisées afin de réduire le temps de charge t_{BC} .

La diminution de la capacité C_{BC} est également importante pour réduire le temps de charge de la jonction base-collecteur. Les dimensions latérales demeurent le premier paramètre à optimiser pour réduire C_{BC} : il faut réduire la surface parasite du collecteur en ramenant la surface S_C au plus près de la surface de l'émetteur S_E . Pour cela, il faut :

- minimiser la surface de base exposée $S_{B_{ext}}$ (utilisation de « sidewall » pour protéger l'émetteur [Hayama88, Urteaga04], procédé auto-aligné et minimisation de la sous-gravure de l'émetteur [Nodjiadjim09]),
- minimiser la largeur du contact de base,
- déporter la prise de contact de base hors de la zone active (transistor à pont de base),
- réduire la conduction dans les matériaux sous la base extrinsèque (sous-gravure du collecteur [Liu95, Miyamoto96, Gutierrez99]).

1.4.2.A.d. Temps de transit dans le collecteur τ_C

Le temps de transit des électrons dans le collecteur τ_C est proportionnel à l'épaisseur de la zone déplétée du collecteur W_{BC} tel que :

$$\tau_C = \frac{W_{BC}}{2v_{Csat}} \quad (1.44)$$

où v_{Csat} est la vitesse de saturation des électrons dans le collecteur.

Tout comme pour τ_B , l'épaisseur des couches est le principal paramètre pour réduire le temps de transit τ_C via la diminution de la zone de transition W_{BC} . Néanmoins, la réduction de l'épaisseur de collecteur est sujette à caution puisqu'elle implique une hausse du temps de charge t_{BC} (par le biais d'une augmentation de la capacité base-collecteur) ainsi qu'une diminution de la tension de claquage BV_{CE0} .

1.4.2.B. Expression de la fréquence maximale d'oscillation f_{MAX}

La fréquence maximale d'oscillation est le second facteur de mérite du fonctionnement hyperfréquence du TBH. L'expression exacte de f_{MAX} est donnée dans [Vaidyanathan99]. Néanmoins, elle peut s'écrire, en première approximation :

$$f_{MAX} = \sqrt{\frac{f_T}{8\pi R_B C_{BC}}} \quad (1.45)$$

Cette expression montre que l'amélioration de f_{MAX} est étroitement liée à l'amélioration de f_T , soit, comme nous venons de le voir, à la diminution du temps de traversée des porteurs à travers la structure.

Le produit $R_B C_{BC}$ a également une influence particulière et doit être minimisé pour atteindre des fréquences f_{MAX} élevées. La réduction de la capacité base-collecteur est possible en réduisant les dimensions latérales du composant (paragraphe 1.4.2.A.c). La résistance de base R_B est transversale et dépend fortement de la résistivité de la couche de base. Si la base est

fine (pour diminuer τ_B et augmenter f_T), la résistivité de la base est importante, au détriment de R_B . Un compromis existe en augmentant le dopage de base N_{AB} (cf. équation 2.6). R_B peut également être diminuée en minimisant la surface de base exposée S_{Bext} (comme précisé au paragraphe 1.4.2.A.c).

Les expressions introduites dans ce paragraphe 1.4.2 montrent l'importance de la réduction des dimensions verticales et latérales du composant pour augmenter les performances fréquentielles. La réduction des épaisseurs de base et de collecteur permet de réduire les temps de transit τ_B et τ_C des porteurs ce qui est favorable à la fréquence de transition f_T . L'augmentation concomitante de la résistance de base R_B et de la capacité base-collecteur C_{BC} est toutefois pénalisante pour la fréquence maximale d'oscillation f_{MAX} . Une « mise à l'échelle » (i.e. réduction des dimensions latérales) est donc nécessaire pour une amélioration simultanée de f_T et f_{MAX} .

1.5. Etat de l'art des TBH pour applications ultra-rapides

La demande croissante de circuits ultra-rapides pour des applications diverses pousse à élargir le domaine de fréquences utiles des transistors. Ainsi, de nombreux laboratoires académiques et industriels sont engagés dans la course aux performances des transistors bipolaires à hétérojonction. Cette partie recense, en se basant sur les publications parues ces dix dernières années, les technologies développées pour les applications ultra-rapides par les principaux acteurs du domaine et les performances obtenues.

1.5.1. TBH InP/InGaAs

Les TBH InP/InGaAs suscitent l'intérêt des grands groupes de télécommunication au début des années 80 en raison de leur possible intégration avec des composants optoélectroniques puis de nombreux autres acteurs s'y intéressent pour leurs propriétés intrinsèques supérieures à celle des technologies plus matures à base de GaAs ou de Si. Le système InP/In_{0,53}Ga_{0,47}As offre en effet de nombreux avantages :

- des propriétés de transport électronique (mobilité et vitesse) dans l'InGaAs (accordé en maille sur InP) supérieures à celle du GaAs ou du SiGe,
- une vitesse de recombinaison en surface de base plus faible que dans le GaAs, autorisant une forte réduction des dimensions latérales des composants,
- une tension de seuil émetteur-base plus faible grâce à l'introduction d'un matériau à petite énergie de bande interdite dans la base,
- une meilleure tenue en tension quand le collecteur est en InP que la technologie à base de SiGe,
- le meilleur produit $f_T \times BV_{CE0}$ (Figure 1.23), facteur de mérite déterminant pour les circuits,
- une résistivité thermique du substrat InP plus faible que celle du GaAs.

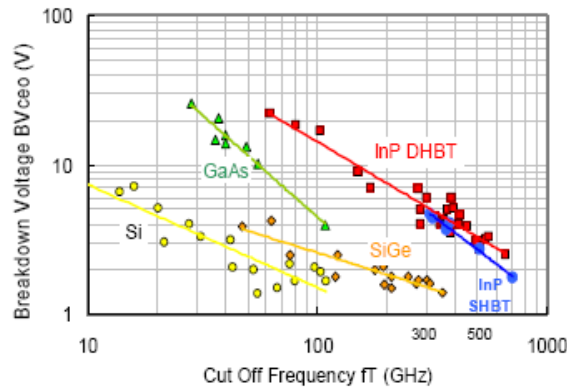


Figure 1.23 : Diagramme $f_T - BV_{CE0}$ des principales filières de transistors bipolaires [Gutierrez08]

En plus de délivrer des tensions de sortie élevées, les TBH InP/InGaAs atteignent des performances fréquentielles remarquables, bien supérieures à la technologie concurrente SiGe et sont parmi les transistors les plus rapides existants (Tableau 1.3). Citons par exemple, les travaux menés par l'équipe de M. Rodwell de l'Université de Californie, Santa Barbara (UCSB) qui ont permis récemment d'obtenir des performances record en terme de fréquence maximale d'oscillation. Grâce à une importante réduction des dimensions latérales (largeur effective d'émetteur de $0,2 \mu\text{m}$), leur TBH fabriqué en technologie triple méssa atteint un f_{MAX} dépassant les 800 GHz et un f_T de 360 GHz [Lobisser09].

Tableau 1.3 : Etat de l'art des TBH InP/InGaAs

Laboratoire	Type	Largeur émetteur (μm)	Epaisseur base (nm)	Epaisseur collecteur (nm)	f_T (GHz)	f_{MAX} (GHz)	BV_{CE0} (V)	Références
Northrop Grumman	TBDH	0,25	30	120	400	503	> 4	[Scott06]
HRL	TBDH	0,25	35	-	406	423	4,7	[Hussain04]
Bell Labs NJ	TBDH	0,5	40	130	410	340	4	[Weimann06]
Vitesse	TBDH	0,5	20	100	400	450	> 3	[He06]
NTT	TBDH	0,8	30	150	330	330	> 4	[Ida02]
Anritsu	TBDH	1	30	-	302	388	6,2	[Ohkubo08]
UCSB	TBDH	0,2	30	150	360	> 800	4,3	[Lobisser09]
UIUC	TBSH	0,32	12,5	55	765	227	1,65	[Snodgrass06]
IAF	TBDH	0,7	30	150	> 350	> 450	> 4,5	[Driad09]
Postech	TBSH	0,25	40	250	215	687	> 4	[Yu04]
Technion	TBDH	0,45	25	100	338	534	> 3	[Cohen08]

Les TBH InP/InGaAs offrent d'énormes potentialités pour les communications optiques à haut débit jusqu'à 100 Gbit/s [Weimann08, Arayashiki08, Makon09], les communications hyperfréquences jusqu'en bande G (140-220 GHz) et la réalisation de circuits mixtes logique-

analogique rapides et de forte amplitude de sortie [Monier09]. Ainsi, la quasi-totalité des grands industriels du secteur ont un programme de développement de circuits hyperfréquences à base de ce composant.

Pour profiter de la densité d'intégration des circuits à base de silicium et des avantages des composants III-V, plusieurs industriels (HRL, Teledyne) s'intéressent également à l'hétéro-intégration de TBH InP/InGaAs et de transistors CMOS silicium. En particulier, des circuits sont réalisés dans le cadre du projet COSMOS financé par la DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) [Rosker08]. Les premiers résultats sont très prometteurs, avec une dégradation limitée des caractéristiques des TBH InP/InGaAs après leur intégration sur des plateformes CMOS silicium et la démonstration d'un amplificateur différentiel large bande (supérieur à 100 GHz) présentant une bonne excursion en tension et une faible consommation [Li08].

1.5.2. TBH InP/GaAsSb

Comme on l'a vu au paragraphe 1.2.6.C, le système InP/GaAsSb est une approche alternative pour supprimer la discontinuité de bande de conduction rencontrée à l'hétéro-interface base-collecteur des TBH InP/InGaAs. Ce système permet de s'affranchir du blocage des électrons grâce à l'offset de bande de conduction négatif. Les électrons sont injectés dans le collecteur avec un surplus d'énergie cinétique. Le temps de transit de collecteur est alors réduit par rapport à une hétérojonction B/C de type I d'épaisseur équivalente [Liu04].

Tableau 1.4 : Etat de l'art des TBH InP/GaAsSb

Laboratoire	Largeur émetteur (um)	Epaisseur base (nm)	Epaisseur collecteur (nm)	f_T (GHz)	f_{MAX} (GHz)	BV_{CE0} (V)	Références
UIUC	0,52	20	60	670	185	3,2	[Snodgrass07]
	0,46	30	100	480	420	4,3	
ETH Zürich	0,3	20	75	603	305	4,2	[Liu07]

Dans les TBDH à base GaAsSb, le collecteur est donc uniquement constitué d'InP (les couches quaternaires de transition n'étant plus nécessaires) ce qui simplifie la structure épitaxiale, facilite le procédé de fabrication et réduit au minimum la résistance thermique. Les études menées ont permis d'atteindre des performances fréquentielles qui rivalisent avec celles des TBH InP/InGaAs comme le montre le Tableau 1.4. Les TBDH InP/GaAsSb sont donc de très bons candidats pour les applications larges bandes. Alors que les premières études commencent en 1996 [Bhat96], ils bénéficient par ailleurs d'un transfert vers l'industrie précoce : Agilent Technologies débute la commercialisation de circuits à base de cette technologie dès 2005 [Low05].

1.5.3. TBH SiGe

L'introduction d'un alliage silicium-germanium $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ pour la réalisation de la base est une des principales évolutions qui a permis l'amélioration des performances des transistors bipolaires silicium [Iyer87]. L'intérêt de l'incorporation de Ge dans la base est multiple mais le principal avantage provient de l'énergie de bande interdite du SiGe qui est plus faible que celle du silicium : la formation d'une discontinuité de bande de valence à l'interface Si/SiGe améliore l'efficacité d'injection γ et autorise un dopage plus fort de la base (diminution de la résistance de base) (cf. paragraphe 1.2.5.A). L'alliage SiGe présente également une meilleure mobilité des électrons (diminution du temps de transit de base) et des trous (diminution de la résistance de base) que le silicium. Enfin, une base en $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ offre la possibilité d'optimiser la structure grâce à une gradualité en composition de germanium qui aura pour effet d'introduire un pseudo-champ électrique accélérateur (cf. Figure 1.8).

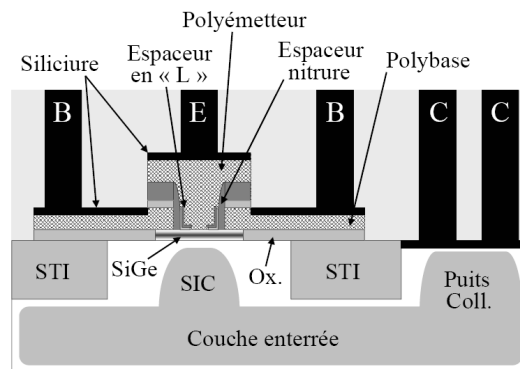


Figure 1.24 : Coupe schématique d'une structure complètement auto-alignée à double polysilicium de ST Microelectronics [Barbalat06]

Développés vers la fin des années 80, ces TBH SiGe ont bénéficié de la maturité technologique de la filière silicium. De nombreuses avancées technologiques leur ont ainsi permis d'accroître continuellement leurs performances fréquentielles. On peut citer notamment :

- l'introduction de carbone dans la base qui bloque la diffusion du bore et permet donc d'affiner l'épaisseur de la base SiGe:C ,
- l'utilisation de dépôts de polysilicium dopé qui possède une faible résistance de contact avec les matériaux à base de silicium. Ils permettent de réduire à la fois les épaisseurs d'émetteur et de base et les dimensions latérales de la base intrinsèque par séparation des bases intrinsèque et extrinsèque.
- l'auto-alignement émetteur-base-collecteur par différentes techniques (épitaxie sélective ou non de la base, émetteur sacrificiel) qui permet de rapprocher les contacts de base et de collecteur afin de réduire encore l'extension latérale du composant (Figure 1.24).

Ainsi, malgré leurs propriétés moyennes en termes de tenue en tension, les TBH SiGe ont su garder une place importante dans la course aux performances fréquentielles et restent les principaux concurrents des TBH sur InP. De nombreux fabricants de semiconducteurs sont impliqués dans le développement de ces composants comme le montre le Tableau 1.5 qui présente un état de l'art des TBH SiGe.

Le TBH SiGe est souvent utilisé en configuration BiCMOS. Cette technologie permet d'intégrer sur le même substrat des composants bipolaires et des composants CMOS, et cumule donc les avantages des deux approches : elle est intéressante pour les applications rapides et sa densité d'intégration est comparable à celle du CMOS. Ainsi des technologies BiCMOS sont développées afin d'adresser les applications millimétriques grand public telles que les radars anticollision pour l'automobile (77 GHz), les télécommunications optiques jusqu'à 40 Gbits/s ou encore les réseaux sans-fil haut débit WLAN (60 GHz).

Tableau 1.5 : Etat de l'art des TBH SiGe

Laboratoire	Largeur émetteur (μm)	f_T (GHz)	f_{MAX} (GHz)	BV_{CE0} (V)	Références
IBM	0,12	309	343	1,7	[Yuan07]
Infineon	0,14	225	300	1.8	[Böck04]
IHP	0,16	300	350	1,85	[Fox08]
Hitachi	0,15	201	227	-	[Miura06]
ST Microelectronics	0,13	275	287	1,48	[Zerounian07]
	0,17	410	138	1,15	[Geynet08a]
IMEC	0,15	215	400	1,7	[Huylbroeck09]
Freescale	0,15	200	320	2	[John07]

1.5.4. Structures à petites bandes interdites

Les premiers transistors à hétérojonction utilisaient une base en GaAs. Pour obtenir une mobilité et une vitesse électroniques plus importantes, l'indium a été introduit dans la base des TBH, menant aux structures AlInAs/InGaAs et InP/InGaAs accordées en maille sur InP. La progression logique de cette évolution pour continuer à améliorer les performances hyperfréquences des composants est d'exploiter les possibilités de la filière de matériaux de maille atomique comprise entre 6,1 et 6,48 Å (Figure 1.25).

Les semiconducteurs binaires InAs, GaSb, InSb et leurs alliages apparaissent, grâce à leurs propriétés de transport supérieures, comme de bons candidats pour la base de TBH pour applications hautes fréquences à très faible consommation de puissance. Ces matériaux sont en effet caractérisés par: - de fortes mobilités électronique et de trous (fréquences de coupure élevées), - de petites énergies de bande interdite, et - des vitesses électroniques maximales obtenues à faible champs (faible consommation).

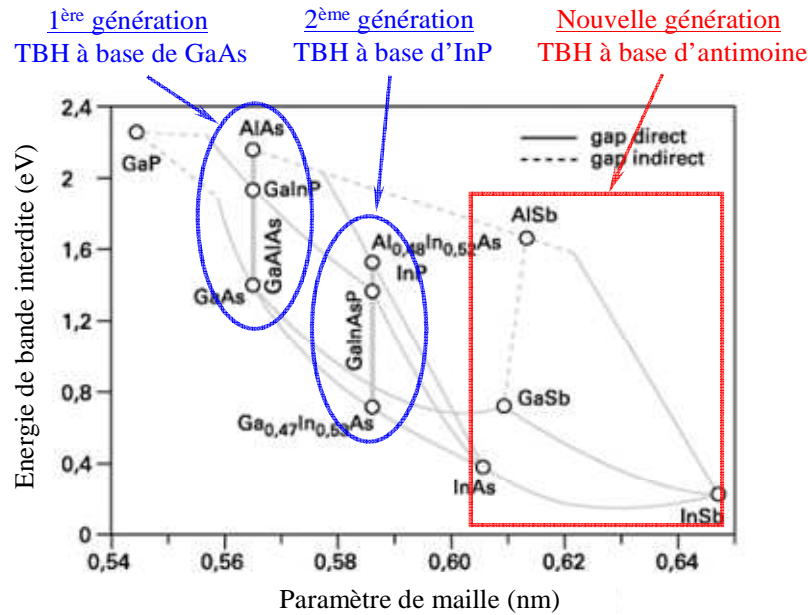


Figure 1.25 : Diagramme énergie de bande interdite – paramètre de maille montrant l'évolution des filières de transistors bipolaires vers les matériaux à faibles bandes interdites et à grands paramètres de maille.

Ainsi, un intérêt spécial pour les applications microélectroniques de cette filière s'est manifesté depuis peu, comme l'illustre le programme ABCS (Antimonide-Based Compound Semiconductor) financé par la DARPA [Rosker03]. Ce projet qui réunit HRL, Rockwell Scientific, Northrop Grumman Space Technology (NGST) ainsi que plusieurs laboratoires universitaires américains est motivé par le besoin de composants ou de circuits hyperfréquences de très faible consommation pour application à des systèmes portables de grande autonomie.

1.5.4.A. TBH à bases InAs et $\text{In}_{0,86}\text{Ga}_{0,14}\text{As}$

Le premier TBH à base InAs a été étudié au début des années 1990 au Bell Labs [Vengurlekar90]. Constitué d'une hétérojonction AISb/InAs, ce transistor à électrons chauds est fortement sujet à l'ionisation par impact du fait de la grande discontinuité ΔE_C entre InAs et AISb et la petite largeur de bande interdite dans InAs. Deux ans plus tard, l'équipe de Kroemer et al. démontre le fonctionnement en régime statique du premier TBDH pnp AISb/InAs [Pekarik92]. Avec un gain en courant statique de l'ordre de 5 à forte injection, les performances de ce composant sont apparemment limitées par de forts courants de recombinaisons d'interface.

Dodd et al. utilisent le concept du pseudo-TBH pour la réalisation d'un transistor bipolaire à base InAs [Dodd93, Dodd96]. Ce concept est basé sur le rétrécissement de la bande interdite (« bandgap narrowing ») de l'InAs fortement dopé de la base. En effet, les impuretés dopantes induisent des niveaux discrets accepteurs proches de la bande de valence. Quand le dopage est

très important, ces niveaux discrets forment un continuum de niveaux permis situé à quelques dizaines de meV au-dessus de la bande de valence, induisant un effet de rétrécissement de la bande interdite. Ce mécanisme permet donc la formation d'une pseudo-hétérojonction E/B sans introduction d'un matériau à plus grand gap à l'émetteur.

L'approche plus classique qui consiste à utiliser des alliages à l'émetteur et au collecteur a également été étudiée. Ainsi, Averett et al. ont présenté un certain nombre de structures basées sur les systèmes AlInAs/InAs ou InAsP/InAs [Maimon02, Averett02, Averett03]. Les résultats les plus remarquables proviennent néanmoins de l'équipe de Thomas du HRL [Thomas03]. Epitaxiés sur substrat InAs, ces TBDH comprennent un émetteur et un collecteur en InAsP et présentent du gain pour les faibles tensions de polarisation V_{BE} entre 0,1 et 0,3 V, démontrant ainsi un fonctionnement faible consommation. Après report sur substrat de saphir, les TBH fabriqués atteignent une fréquence de coupure f_T supérieure à 200 GHz. Cette technologie permet la réalisation du premier circuit à base de transistors InAs : un diviseur statique à 10 GHz comprenant 62 transistors et 2 niveaux d'interconnexion [Thomas03].

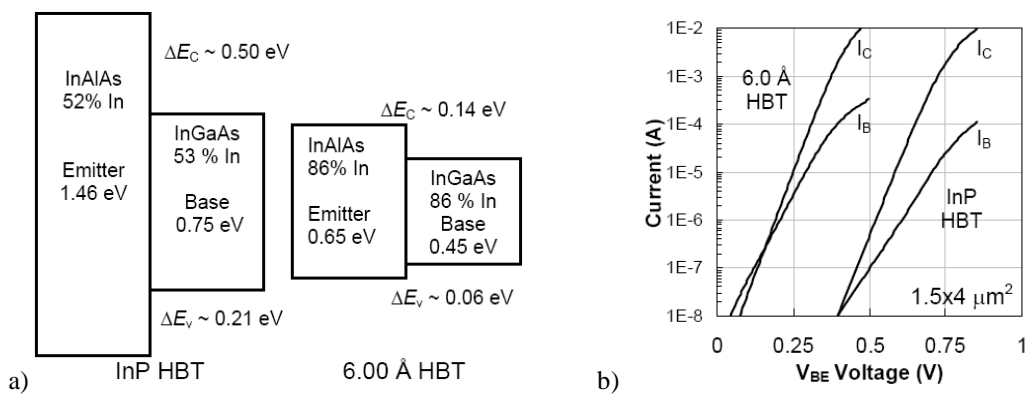


Figure 1.26 : Comparaison des filières de TBH à base InGaAs : a) alignement des bandes, b) courbe de Gummel [Monier04]

Enfin, une équipe du NGST propose une solution alternative « petit gap » aux TBH conventionnels $Al_{0,48}In_{0,52}As/In_{0,53}Ga_{0,47}As$ ou $InP/In_{0,53}Ga_{0,47}As$ accordés en maille sur InP. Cette structure innovante utilise une base en InGaAs et un émetteur en AlInAs avec des compositions en indium supérieures à 80% et possède un paramètre de maille de 6,0 Å (Figure 1.26.a) [Monier03]. Les composants sont épitaxiés sur substrat d'InP avec une couche graduelle en AlInAs pour accommoder le désaccord de maille [Noori04]. Comme le montre la Figure 1.26.b, un gain statique est obtenu pour $0,2 < V_{BE} < 0,4$ V. Les mesures hyperfréquences sur ces composants font apparaître des performances dynamiques élevées avec des fréquences f_T et f_{MAX} dépassant les 160 GHz [Monier05]. Un grand nombre de circuits comprenant de 20 à 1000 transistors ont été réalisés avec cette technologie métamorphique démontrant les potentialités de cette filière pour les applications rapides et faible consommation [Gutierrez08].

1.5.4.B. TBH à base GaInSb

Le petit gap et les mobilités élevées des électrons et des trous du GaInSb font de ce matériau un très bon candidat pour la couche de base de transistors bipolaires à hétérojonction à hautes performances. En plus de ces avantages, les matériaux à base d'antimoine dont le paramètre de maille est compris entre 6,1 et 6,48 Å offrent une souplesse inégalée pour l'ingénierie des bandes, comme l'illustre la Figure 1.27 qui présente l'alignement de bande d'un transistor à base GaInSb dont l'émetteur et le collecteur sont tous deux en matériau quaternaire AlInAsSb. En variant la composition de ce quaternaire, une configuration quasiment idéale pour le transport des électrons peut être obtenue :

- une hétérojonction émetteur-base de type I, favorisant l'injection des électrons dans la base avec un excès d'énergie cinétique,
- un alignement de type II entre la base et le collecteur afin d'optimiser la collection des électrons en sortie de base.

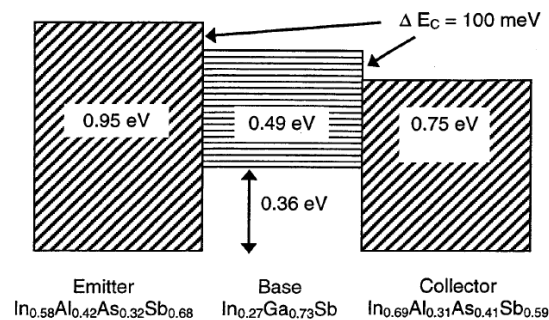


Figure 1.27 : Alignement des bandes pour un TBH « idéal » à 6,2 Å [Magno02]

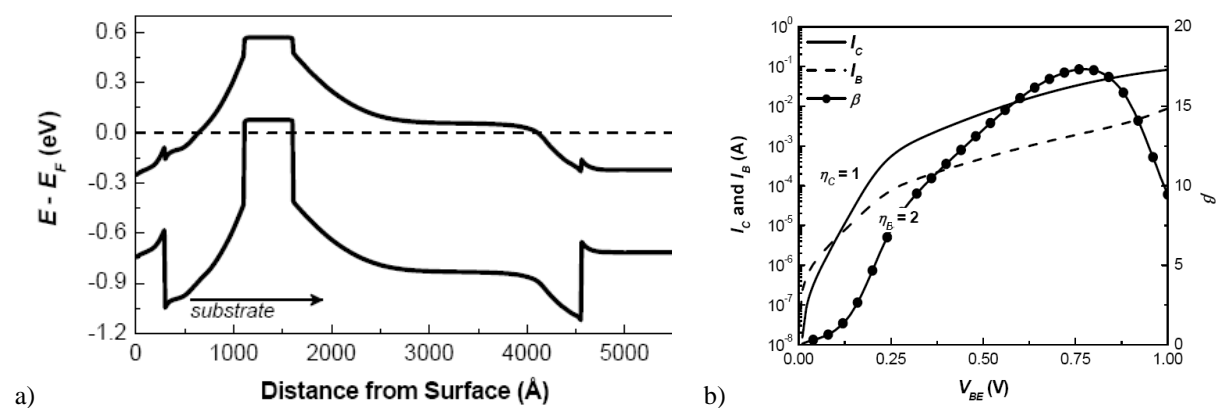


Figure 1.28 : a) Diagramme de bande et b) courbe de Gummel du TBDH

$Al_{0,31}In_{0,69}As_{0,41}Sb_{0,59} / Ga_{0,73}In_{0,27}Sb$ métamorphique sur GaAs ($a = 6,2 \text{ \AA}$) [Champlain07a]

L'équipe de Magno du Naval Research Laboratory (NRL) développe depuis 2002 des TBH à base GaInSb avec un paramètre de maille de 6,2 Å [Magno02]. Ils rapportent en 2005 le premier TBDH AlInAsSb/GaInSb fonctionnel. Réalisé sur substrat de GaSb pour faciliter l'épitaxie de la structure, ce composant présente un gain en courant statique de 25 et une

faible tension de seuil de 220 mV, laissant entrevoir une possibilité de faible consommation [Magno05]. Après une optimisation des conditions de croissance [Magno06a, Magno06b], ils réalisent un TBDH métamorphique sur GaAs avec un gain de 17 et une tension de claquage supérieure à 3 V (Figure 1.28) [Champlain07a].

1.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé le fonctionnement du transistor bipolaire et souligné l'intérêt d'une hétérojonction émetteur-base abrupte pour générer des conditions de transport hors équilibre dans la base afin d'y réduire le temps de transit. Nous avons également montré l'apport d'une hétérojonction base-collecteur optimisée. Nous avons détaillé les caractéristiques statiques des TBH qui fournissent de nombreuses informations sur la qualité de la structure du transistor et permettent de mettre en évidence d'éventuels défauts liés à la technologie (résistances séries, courants non-idéaux). L'étude des performances fréquentielles, des temps de charge et des temps de transit a ensuite permis de souligner l'égale importance de la structure verticale (épaisseur des couches) et des dimensions latérales des TBH. Les performances fréquentielles sont en effet augmentées en réduisant les épaisseurs de couches (i.e. diminution des temps de transit τ_B et τ_C), ainsi que les dimensions latérales des composants (i.e. diminution des temps de charge t_{EB} et t_{BC}). Nous avons finalement conclu ce chapitre par un état de l'art en termes de performances fréquentielles.

2. Matériaux pour TBH rapides : le système 6,1 – 6,48 Å

Le système de matériaux antimoniures correspond aux matériaux AlSb, GaSb, InSb et aux alliages de paramètre de maille compris entre 6,1 et 6,48 Å qu'ils peuvent former avec les matériaux AlAs, GaAs et InAs. Ce système, qui s'est rapidement révélé essentiel pour la réalisation de composants optoélectroniques fonctionnant dans le moyen infrarouge, suscite un intérêt croissant pour ses applications en électronique.

Les performances des TBH sont largement conditionnées par les propriétés des matériaux qui interviennent dans la structure de couche. C'est pourquoi, dans ce chapitre, les propriétés physiques essentielles des matériaux du système 6,1 – 6,48 Å qui sont utilisés dans la fabrication des TBH de ce travail sont soulignées. Cette filière, moins connue que les filières classiques sur GaAs ou InP, est caractérisée par des matériaux à forte mobilité électronique (InAs, InSb), de forts décalages de bande de conduction (AlSb/InAs), des alignements de bandes originaux (type II, type III) mais aussi des matériaux présentant la plus forte mobilité de trous parmi les semiconducteurs III-V (GaSb, InSb).

Après avoir défini les structures de couches étudiées dans ce manuscrit, ce chapitre présente quelques aspects spécifiques liés à la croissance des hétérostructures antimoniées, tels que le dopage ou la nécessité d'une couche tampon métamorphique pour adapter le paramètre de maille à partir de substrats GaAs ou InP, puisqu'il n'existe pas de substrat semi-isolant adapté en maille à 6,1 Å et plus.

2.1. Propriétés structurales

Les composés III-V¹ constituent une famille d'alliages formés en proportion stœchiométrique d'éléments des colonnes III (e.g. aluminium, gallium, indium) et V (e.g. phosphore, arsenic, antimoine) du tableau de Mendeleïev. Leur structure cristalline est de type zinc-blende (exception faite des composés III-N) avec un paramètre de maille qui dépend de la composition de l'alliage considéré. Ainsi, GaSb, AlSb et InAs ont des paramètres de maille très proches, de l'ordre de 6,1 Å (Tableau 2.1) ce qui leur vaut souvent la dénomination de famille « 6,1 Å ».

Le paramètre de maille des composés ternaires et quaternaires peut être déterminé en première approximation par la loi de Vegard qui repose sur une interpolation linéaire des paramètres de maille des binaires impliqués. Ainsi, pour un alliage quaternaire de type $A_xB_{1-x}C_ySb_{1-y}$, le paramètre de maille s'écrit [Adachi09]:

$$a(x, y) = xy a_{AC} + x(1-y) a_{ASb} + (1-x)y a_{BC} + (1-x)(1-y) a_{BSb} \quad (2.1)$$

où a_{IJ} est le paramètre de maille du binaire IJ.

Tableau 2.1 : Paramètres de maille pour quelques binaires

	InSb	GaSb	AlSb	InAs	GaAs	InP
Paramètre de maille (Å)	6,47937	6,09593	6,1335	6,0584	5,65321	5,86875

2.2. Structure de bande d'énergie

2.2.1. Composés binaires : InAs, GaSb, AlSb, InSb

InAs, GaSb et InSb sont des semiconducteurs à bande interdite directe. Seul AlSb possède une bande interdite indirecte. L'ordre des minima de la bande de conduction de AlSb semble être identique à celui des matériaux binaires GaP et AlAs : $X - L - \Gamma$, avec la vallée L à seulement 60-90 meV de la vallée Γ . Le comportement indirect est donc associé à la vallée X dont le minimum se situe à 1,69 eV du maximum de la bande de valence.

Les énergies de transition entre le maximum de la bande de valence et les trois minima de la bande de conduction sont des caractéristiques essentielles de la structure de bande et sont reportés dans le Tableau 2.2 pour les matériaux binaires qui nous intéressent. Ces énergies dépendent de la température selon une loi dite de Varshni [Varshni67]:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (2.2)$$

¹ Notons que le terme « composés III-V » englobe non seulement les alliages binaires mais également les nombreuses possibilités d'alliages ternaires : (III,III)-V ou III-(V,V) et quaternaires : (III,III,III)-V, (III,III)-(V,V) ou III-(V,V,V).

où $E_g(0)$ est la largeur de la bande interdite à 0 K, T la température et α et β sont des paramètres empiriques également donnés dans le Tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Paramètres de la structure de bande de quelques matériaux III-V binaires [Vurgaftman01]

Paramètres	Température	InAs	GaSb	AlSb	InSb
E_g^Γ (eV)	0 K	0,417	0,812	2,386	0,235
	300 K	0,354	0,726	2,3	0,173
α^Γ ($\times 10^{-4}$ eV/K)		2,76	4,17	4,2	3,2
β^Γ (K)		93	140	140	170
E_g^X (eV)	0 K	1,433	1,141	1,696	0,63
α^X ($\times 10^{-4}$ eV/K)		2,76	4,75	3,9	
β^X (K)		93	94	140	
E_g^L (eV)	0 K	1,133	0,875	2,329	0,93
α^L ($\times 10^{-4}$ eV/K)		2,76	5,97	5,8	
β^L (K)		93	140	140	

2.2.2. Composés ternaires

Pour les alliages ternaires, la largeur de la bande interdite varie en fonction de la composition. Il s'agit en général d'une loi d'approximation quadratique de la forme [Vechten70] :

$$E_g(A_{1-x}B_x) = (1-x)E_g(A) + xE_g(B) - x(1-x)C \quad (2.3)$$

où C est le paramètre de courbure (bowing parameter) qui traduit l'écart à la loi d'interpolation linéaire des largeurs de bande interdite des deux binaires A et B. Ce facteur est généralement de l'ordre de la fraction d'électronvolt et indépendant de la composition.

Le Tableau 2.3 donne les expressions $E_g = f(x)$ pour quelques alliages ternaires antimoniés.

L'alliage $Ga_xIn_{1-x}Sb$ est utilisé pour la réalisation de composants optoélectroniques (lasers à puits quantiques, photodiodes) fonctionnant dans le moyen infrarouge. La Figure 2.1.a présente la dépendance en composition des gaps d'énergie de cet alliage. On y retrouve le faible éloignement entre la bande d'énergie Γ et la vallée latérale L ($\Delta E_{\Gamma-L} \sim 0,03$ eV) pour GaSb ($x = 1$) qui augmente en allant vers InSb ($x = 0$). $Ga_xIn_{1-x}Sb$ est donc un semiconducteur à gap direct pour toute la gamme de composition $0 < x < 1$.

Très peu de données sont disponibles dans la littérature pour l'alliage ternaire $Al_xIn_{1-x}Sb$. Néanmoins, l'évolution de l'énergie de bande interdite Γ déterminée par électroréflexion pour $0 \leq x \leq 1$ par Isomura et al. [Isomura74] ainsi que les variations de E_g^X et E_g^L estimées par

interpolations linéaires sont présentées dans la Figure 2.1.b. Celle-ci nous révèle une transition gap direct-gap indirect pour $x = 0,7$.

Tableau 2.3 : Expression de l'énergie de bande interdite en fonction de leur composition de quelques ternaires à 300 K

Alliage ternaire	Energie de bande interdite (eV)	Référence
$\text{GaAs}_x\text{Sb}_{1-x}$	$E_g^\Gamma(x) = 0,72 - 0,54 x + 1,25 x^2$	[Adachi09]
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}$	$E_g^\Gamma(x) = 0,726 + 1,139 x + 0,368 x^2$	[Casey78]
$\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$	$E_g^\Gamma(x) = 0,17 + 1,67 x + 0,43 x^2$	[Isomura74]
	$E_g^L(x) = 0,93 + 1,281 x$	[Adachi09]
	$E_g^X(x) = 1,63 - 0,015 x$	[Adachi09]
$\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$	$E_g^\Gamma(x) = 0,17 + 0,135 x + 0,415 x^2$	[Auvergne74]
	$E_g^L(x) = 0,93 - 0,57 x + 0,4 x^2$	[Vurgaftman01]
	$E_g^X(x) = 1,63 - 0,91 x + 0,33 x^2$	[Vurgaftman01]
$\text{In}_x\text{As}_{1-x}\text{Sb}$	$E_g^\Gamma(x) = 0,17 - 0,411 x + 0,6 x^2$	[Adachi09]

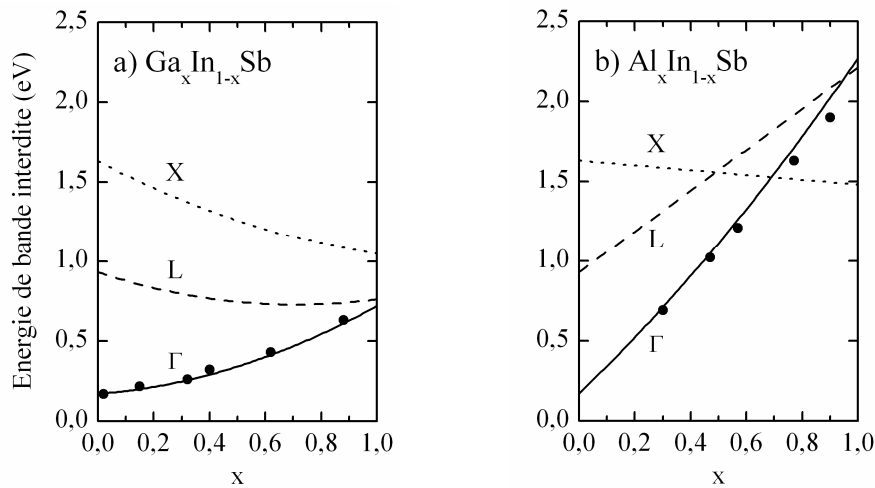


Figure 2.1 : Evolution des énergies de bande interdite $\Gamma - L - X$ en fonction de x pour a) $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$ et b) $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$. Les données expérimentales (•) sont tirées de [Auvergne74] et [Isomura74], respectivement.

2.2.3. Cas du quaternaire AlInAsSb

L'avantage des alliages quaternaires par rapport aux alliages ternaires réside dans la possibilité d'ajuster de manière quasiment indépendante leur paramètre de maille et l'énergie de bande interdite en variant la composition. Il est donc théoriquement facile d'obtenir l'énergie de bande interdite désirée tout en maintenant l'accord de maille avec le substrat.

L' $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ peut ainsi être épitaxié en accord de maille sur substrat GaSb, InP et InAs. La Figure 2.2 présente la dépendance des gaps d'énergie en fonction de la teneur en

aluminium de cet alliage accordé en maille sur GaSb, InP et InAs, établie à partir des interpolations quadratiques du Tableau 2.4. Tout comme pour $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$, on observe un croisement de vallée $\Gamma - X$ pour une composition voisine de $x = 0,7$.

Tableau 2.4 : Expression de l'énergie de bande interdite en fonction de la composition de l'alliage $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ à 300 K [Adachi09]

Substrat	E_g	Expression (eV)	Commentaire
GaSb	E_g^Γ	$0,3 + 1,17 x + 0,77 x^2$	
	E_g^X	$1,33 + 0,68 x - 0,36 x^2$	
InP	E_g^Γ	$0,88 + 0,88 x + 0,63 x^2$	$0,48 \leq x \leq 1$
	E_g^L	$1,45 + 0,3 x + 0,44 x^2$	$0,48 \leq x \leq 1$
	E_g^X	$1,53 + 0,53 x - 0,21 x^2$	$0,48 \leq x \leq 1$
InAs	E_g^Γ	$0,359 + 1,143 x + 0,722 x^2$	
	E_g^X	$1,37 + 0,57 x - 0,26 x^2$	

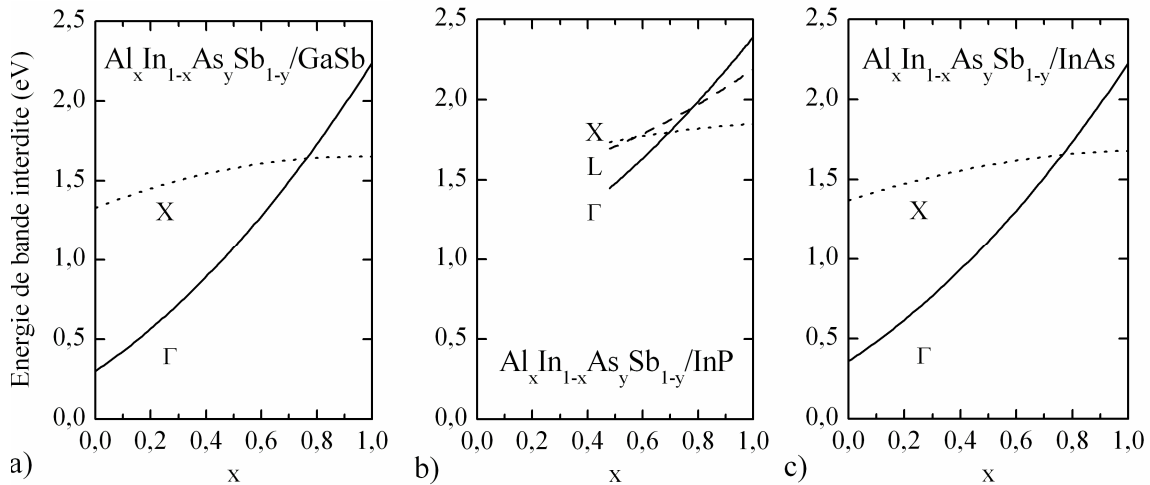


Figure 2.2 : Dépendance en composition x des gaps d'énergie de l' $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ accordé en maille sur a) GaSb ($a = 6,09 \text{ \AA}$), b) InP ($a = 5,87 \text{ \AA}$) et c) InAs ($a = 6,06 \text{ \AA}$)

2.2.4. Alignement des bandes

Une des caractéristiques importante des hétérostructures issues de la filière antimoniure est de présenter une plus grande variété d'alignement des bandes entre matériaux que dans les systèmes plus largement étudiés comme (Al,Ga,In)As par exemple. Plus particulièrement, en combinant les matériaux du système 6,1 Å on peut former les trois différents alignements de bandes possibles entre matériaux semiconducteurs. Cette propriété est illustrée sur la Figure 2.3.a.

Alors qu'un alignement de type I est observé dans le cas AlSb/GaSb, une configuration plus exotique apparaît pour l'hétérojonction InAs/GaSb qui présente un alignement de type III

(gap brisé ou « broken gap ») [Sakaki77] : le bas de la bande de conduction de l'InAs se trouve en dessous (~ 150 meV) du haut de la bande de valence du GaSb.

En remplaçant Ga par Al dans GaSb, la bande de valence descend de 0,4 eV conduisant à la formation d'une hétérojonction de type II pour InAs/AlSb. Dans le même temps, l'élévation de la bande de conduction de 0,4 eV introduit une discontinuité de bande de conduction de l'ordre de 1,35 eV dans l'hétérostructure InAs/AlSb [Nakagawa89]. Cette discontinuité, la plus importante parmi les semiconducteurs III-V, est très favorable à la formation de puits quantiques profonds ou de barrières tunnels très élevées.

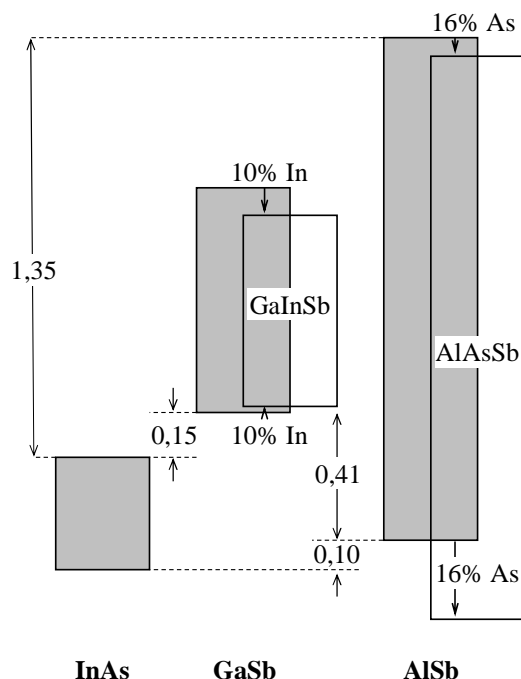


Figure 2.3 : Alignement des bandes dans le système 6,1 Å (toutes les énergies sont en eV).

L'intérêt du système 6,1 Å va au-delà de l'utilisation de ces trois binaires. De nouveaux alignements de bandes peuvent être obtenus avec des composés ternaires tels que (Al,In)Sb, (Ga,In)Sb ou Al(As,Sb). En effet, alors que l'incorporation d'In dans GaSb et AlSb, respectivement, conduit à une diminution des énergies de bande interdite, l'introduction d'As dans AlSb provoque l'effet inverse : l'énergie de bande d'interdite augmente et on assiste dans le même temps à un fort décalage de la bande de valence vers les basses énergies.

En résumé, la variété d'alignements de bandes et de gaps d'énergie existante dans le système de matériaux mixtes antimoniures/arséniures offre une souplesse inégalée pour l'application des concepts de l'ingénierie de bande dans la conception des TBH et autres composants électroniques.

Rappelons qu'il est également possible de réaliser des matériaux mixtes antimoniures/arséniures accordés sur InP. C'est le cas des ternaires AlAsSb et GaAsSb, avec une composition en Sb d'environ 50%. Comme discuté au paragraphe 1.2.6.C, ce dernier est

utilisé comme matériau pour la couche de base des TBDH en remplacement du matériau InGaAs. Combiné à l'InP, il permet notamment l'obtention :

- d'une hétérojonction base-collecteur de type II qui permet de s'affranchir du blocage des porteurs à la jonction BC (transport balistique des électrons)
- d'une discontinuité de bande de valence plus élevée à la jonction émetteur-base qui entraîne l'augmentation de la hauteur de barrière vue par les trous de la base.

2.3. Propriétés de transport électronique

2.3.1. Masses effectives

Les électrons dans la structure de bande sont caractérisés par leur masse effective, qui est définie par l'inverse de la courbure de la relation de dispersion $E(k)$:

$$m_e^* = \frac{\hbar^2}{\partial^2 E / \partial k^2} \quad (2.4)$$

où \hbar est la constante de Planck réduite et k le vecteur d'onde de l'espace réciproque.

La masse effective peut être déterminée soit théoriquement (théorie $\vec{K} \cdot \vec{P}$), soit expérimentalement par la mesure des propriétés de magnéto-transport des porteurs en régime balistique (résonance cyclotron, oscillations Shubnikov-de Haas).

Tableau 2.5 : Masses effectives des électrons et des trous de quelques matériaux semiconducteurs III-V

Matériau	Electrons Γ m_e^* / m_0	Trous légers m_{lh}^* / m_0	Trous lourds m_{hh}^* / m_0	Référence
GaAs	0,067	0,087	0,62	[Adachi85]
In ₅₃ Ga _{0,47} As	0,041	0,0503	0,47 // [001]	[Alavi80]
InAs	0,024	0,026	0,36	[Adachi09]
GaSb	0,039	0,05	0,28	[Dutta97]
AlSb	0,14	0,13	0,9	[Adachi09]
InSb	0,013	0,014	0,38	[Adachi09]
Ga _x In _{1-x} Sb	0,013 + 0,016x + 0,01x ²	0,017 + 0,009x + 0,015x ²	0,246 // [001]	[Roth78]

Le Tableau 2.5 donne les masses effectives des électrons et des trous pour différents matériaux semiconducteurs III-V. On constate que l'InSb et l'InAs possède les masses effectives des électrons les plus faibles parmi les matériaux semiconducteurs III-V. On note également que la masse effective électronique de Ga_xIn_{1-x}Sb reste inférieure à la masse effective de Ga_{0,47}In_{0,53}As sur toute la gamme de composition.

2.3.2. Mobilité

La mobilité des porteurs dans les matériaux s'exprime par la relation :

$$\mu = \frac{q\tau}{m^*} \quad (2.5)$$

où τ est le temps moyen entre interactions avec les imperfections du réseau cristallin. Par conséquent, les valeurs rapportées dépendent très fortement des conditions de croissance.

Les valeurs typiques de mobilités électroniques et de trous sont indiquées pour plusieurs semiconducteurs dans le Tableau 2.6. On note que InSb et InAs possèdent les mobilités électroniques les plus élevées, en accord avec leurs masses effectives et que les plus fortes mobilités de trous sont obtenues pour InSb et GaSb.

Tableau 2.6 : Valeurs typiques de mobilités des électrons et des trous pour quelques matériaux semiconducteurs III-V non-intentionnellement dopés, à 300 K

Matériau	μ_n (cm ² /V.s)	μ_p (cm ² /V.s)
GaAs	8500	400
In ₅₃ Ga _{0,47} As	11000	300
InAs	33000	460
GaSb	5000	850
AlSb	200	420
InSb	77000	1250

La résistance d'accès à la base est directement reliée à la mobilité des trous selon :

$$R_{\square} = \frac{1}{q\mu_p N_{AB} W_B} \quad (2.6)$$

où N_{AB} et W_B sont respectivement le niveau de dopage et l'épaisseur de la base. Le choix d'un matériau qui possède une forte mobilité de trous est donc primordial puisqu'il permet de diminuer l'épaisseur de la base afin d'y limiter le temps de transit des électrons tout en gardant une résistance d'accès faible.

2.3.3. Vitesse électronique de dérive

Sous faible champ électrique, la vitesse électronique de dérive est directement liée à la mobilité par la relation :

$$v = \mu_n E \quad (2.7)$$

avec E le champ électrique appliqué. Elle croît donc rapidement de manière linéaire jusqu'à atteindre un maximum pour une valeur de champ correspondant au champ critique (E_{crit}). En effet, sous l'effet d'un champ électrique plus intense ($E > E_{crit}$), un électron de la vallée Γ (cas

d'un matériau à gap direct) peut acquérir une énergie suffisante pour être transféré dans les vallées latérales où sa masse effective est plus forte. La vitesse moyenne de l'électron est alors plus faible et le transport électronique différent. Au-delà de ce champ critique déterminé par la séparation $\Delta E_{\Gamma-L}$, les électrons sont répartis dans les vallées latérales et atteignent une vitesse dite de saturation.

Tableau 2.7 : Comparaison des vitesses maximales et de saturation pour quelques matériaux semiconducteurs III-V

Matériau	E_{crit} (kV/cm)	V_{max} (10^7 cm/s)	V_{sat} (10^7 cm/s)	Référence
GaAs	3,5	2,1	0,8	[Blakemore82]
$In_{53}Ga_{0,47}As$	3	2,35	0,7	[Thobel90]
InAs	-	8	8	[Brenann84]
GaSb	-	0,8	0,8	[Ikoma77]
AlSb	-	0,7	0,7	[Ferry75]

Le Tableau 2.7 récapitule les vitesses maximales et de saturation de quelques matériaux III-V. Il est à noter que dans InAs, les électrons peuvent atteindre de très grandes vitesses jusqu'à de très forts champs électriques (8×10^7 cm/s pour un champ de 100 kV/cm) et que la vitesse de saturation est proche de la vitesse maximale des électrons. Ceci s'explique par la grande énergie de séparation $\Delta E_{\Gamma-L}$ dans InAs qui entraîne un transport des électrons majoritairement localisé dans la vallée Γ .

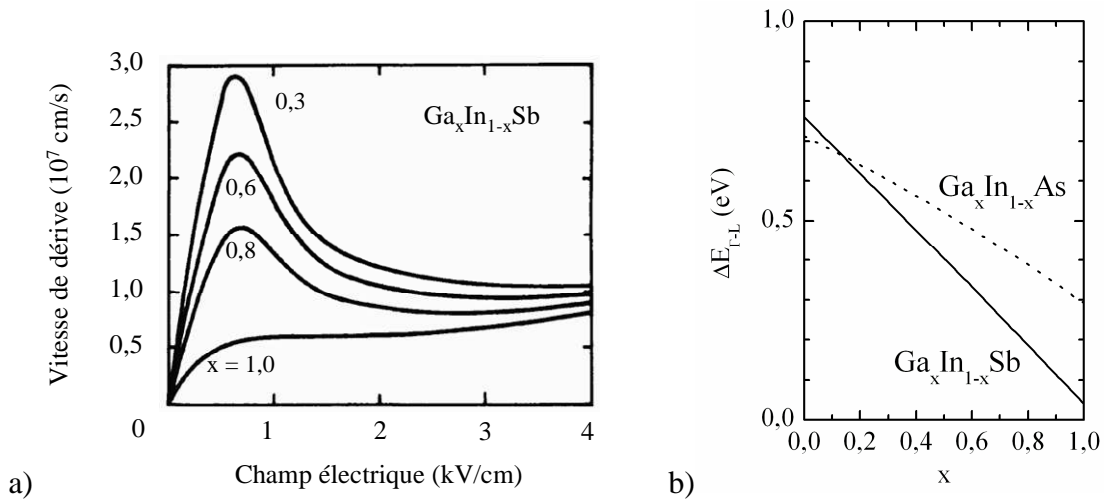


Figure 2.4 : a) Vitesse de dérive des électrons en régime stationnaire dans $Ga_xIn_{1-x}Sb$ en fonction du champ électrique [Ikoma77] et b) énergie de séparation entre les vallées Γ et L pour $Ga_xIn_{1-x}Sb$ et, à titre indicatif, pour $Ga_xIn_{1-x}As$.

L'évolution de la vitesse de dérive électronique en fonction du champ appliqué est tracée sur la Figure 2.4.a pour plusieurs compositions de $Ga_xIn_{1-x}Sb$. On note que la valeur du champ

critique varie de 700 V/cm pour $x = 0,8$ à 600 V/cm pour $x = 0,3$ alors que la séparation $\Delta E_{\Gamma-L}$ augmente pour les faibles valeurs de x (cf. Figure 2.4.b). Ceci s'explique par le fait que la masse effective des électrons de la vallée Γ diminue avec x : les électrons acquièrent alors plus facilement l'énergie nécessaire à leur transfert en vallée L.

2.4. Choix du système pour TBH ultra-rapide

Nous avons passé en revue les principales propriétés des matériaux du système 6,1-6,48 Å afin de nous guider dans la définition des structures de couches pour l'étude de TBH à base d'antimoine. Nous justifions ici le choix de nos structures TBH à travers notamment la sélection des matériaux de base, d'émetteur et de collecteur.

2.4.1. Sélection du matériau de base : $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$

On l'a vu, l'utilisation du matériau à faible bande interdite InGaAs dans la base des TBH a permis d'améliorer les propriétés de transport dans la base (diminution des temps de transit) et de réduire les tensions de polarisation émetteur-base appliquées pour atteindre de forts courants de collecteur par rapport au TBH à base de GaAs. Un TBH à base de $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$ a la potentialité d'aller plus loin. En effet, comme le montre la Figure 2.5, la faible valeur de bande interdite du GaInSb, comprise entre 0,3 et 0,7 eV permet à un courant donné de réduire encore la polarisation directe de la jonction émetteur-base (entre 0,1 et 0,5 V) et autorise par conséquent un fonctionnement à faible tension d'alimentation.

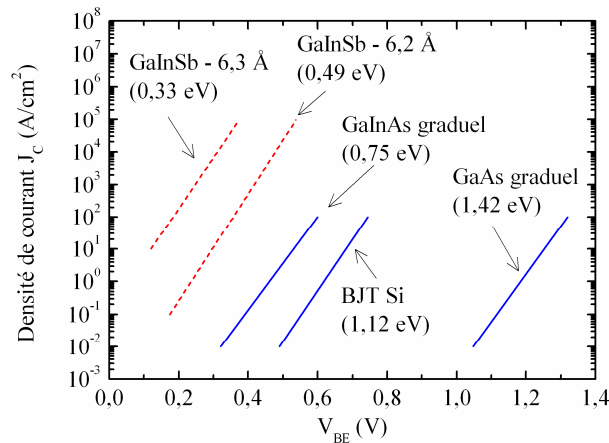


Figure 2.5 : Dépendance de la densité de courant de collecteur en fonction de la tension émetteur-base pour plusieurs systèmes de TBH npn (les lignes pointillées correspondent à des simulations Silvaco) [Bennett05]

En plus de sa haute mobilité électronique, le matériau ternaire GaInSb présente des mobilités de trous parmi les plus élevées des semiconducteurs III-V. C'est un paramètre important puisqu'il influe sur la résistance d'accès à la base (donc sur la fréquence f_{MAX}). En outre, tout comme dans InSb et GaSb, les états de surface du GaInSb seraient situés proche de la bande

de valence [Ikossi02]. Cette propriété est favorable à l'obtention de contacts ohmiques de type p de très faibles résistances.

En conclusion, les propriétés énoncées font de $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$ un choix apte à favoriser le fonctionnement hyperfréquence des TBH. Il existe toutefois un inconvénient. En effet, l'énergie de séparation entre la vallée Γ et la vallée L est faible dans $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$ pour les grandes valeurs de x (cf. Figure 2.4.b). Un compromis sur la composition du GaInSb doit donc être trouvé afin de retarder le transfert des électrons en vallée latérale tout en gardant une énergie de bande interdite raisonnable dans le but de limiter l'ionisation par impact et les phénomènes d'avalanche qui sont par définition problématiques dans les matériaux à faible bande interdite. Pour une fraction $x = 0,65$, la séparation $\Delta E_{\Gamma-L}$ dans $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$ est de l'ordre de 0,29 eV, valeur comparable à la séparation $\Delta E_{\Gamma-L}$ dans GaAs et la largeur de bande interdite est d'environ 0,44 eV. C'est cette composition, correspondant à un paramètre de maille de 6,23 Å, qui a été retenue pour la réalisation des TBH de ce travail.

Le temps de transit dans la base est, en première approximation, proportionnel au carré de l'épaisseur de la base. Afin de le minimiser, nous optons pour une base fine de 400 Å dopée p à $1.10^{19} \text{ cm}^{-3}$, ce qui permet de réduire la résistance de la couche.

2.4.2. Sélection du matériau d'émetteur : $\text{Al}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Sb}$ ou $\text{Al}_{0,33}\text{In}_{0,67}\text{As}_{0,31}\text{Sb}_{0,69}$

Pour la réalisation d'une hétérojonction émetteur-base, le matériau d'émetteur doit avoir une largeur de bande interdite supérieure à celle de la base en $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$ (~ 0,44 eV). D'après la Figure 2.6, trois familles d'alliages répondent à ce besoin : les composés ternaires $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$ et les composés quaternaires $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{Sb}$ et $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$.

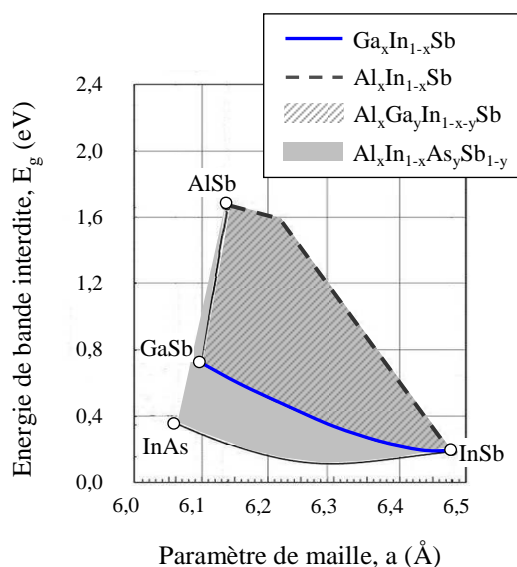


Figure 2.6 : Matériaux ternaires et quaternaires permettant la réalisation d'une hétérojonction avec $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$

2.4.2.A. Cas de l'alliage $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$

L' $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$ est en accord de maille avec le $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$ pour $x = 0,72$. Toutefois, il est difficile de doper n fortement l' AlInSb à cette composition. En effet, l'équipe de Hill [Hill05] a montré que pour les fractions d'aluminium $0,6 < x < 0,9$, l'incorporation de tellure, utilisé comme dopant de type n (voir paragraphe 2.5.3), introduit un niveau donneur profond compris entre 70 et 126 meV en dessous du minimum de la bande de conduction (Figure 2.7). Ceci implique un faible taux d'ionisation ($\sim 1\%$) dans cette gamme de composition [Hill05]. Nous considérons donc par la suite l' $\text{Al}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Sb}$ qui possède un désaccord de maille $\Delta a/a \sim 1,23\%$ mais dans lequel l'ionisation des atomes de Te est favorisée grâce à un niveau donneur situé à environ 32 meV de la bande de conduction (Figure 2.7).

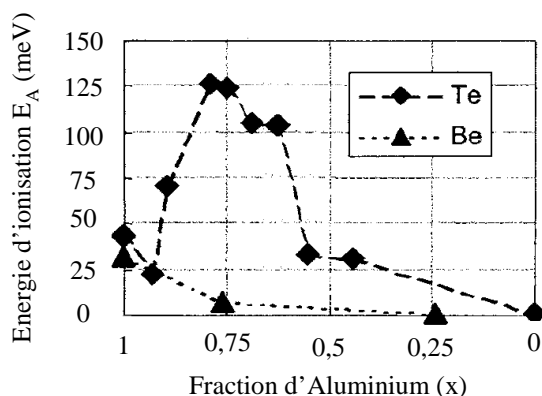


Figure 2.7 : Energie d'ionisation des atomes donneurs de tellure et des atomes accepteurs de béryllium dans l' $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$ (d'après [Hill05])

Dans une hétérojonction $\text{Al}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Sb}/\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$ (Figure 2.9.a), le différentiel de gap est majoritairement reporté dans la bande de conduction (78 %) avec un $\Delta E_C = 0,57$ eV qui est supérieur au seuil de transfert en vallée latérale dans le $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$ ($\Delta E_{\Gamma-L} \sim 0,29$ eV). Nous avons toutefois retenu ce système pour la simple raison qu'il met en jeu des composés ternaires et qu'il est donc le plus aisé à réaliser du point de vue de la croissance épitaxiale et de la technologie de fabrication. En effet, bien que les conditions de transport dans cette hétérostructure ne soient pas favorables à un fonctionnement rapide, elle constitue une bonne base pour le développement de TBH à base GaInSb.

2.4.2.B. Cas de l'alliage $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{Sb}$

L'ajout de Ga dans l' $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$ entraîne une diminution de l'énergie de bande interdite qui se reporte à la fois sur la bande de conduction et la bande de valence. Nous délaissions donc l'alliage $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{Sb}$ qui ne permet pas d'augmenter la discontinuité de bande de valence de l'hétérojonction émetteur/base par rapport au couple $\text{Al}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Sb}/\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$.

2.4.2.C. Cas de l'alliage $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$

De manière opposée, lorsqu'on introduit de l'As dans l' $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$, l'énergie de bande interdite augmente et on assiste dans le même temps à un fort décalage de la bande de valence vers les basses énergies. L'augmentation de la fraction d'In conduit par ailleurs à une diminution de la largeur de bande interdite. En variant la composition en éléments III et V de l' $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$, il est donc possible d'obtenir une grande plage d'énergies de bande interdite tout en maintenant un paramètre de maille constant comme illustré sur la Figure 2.8.

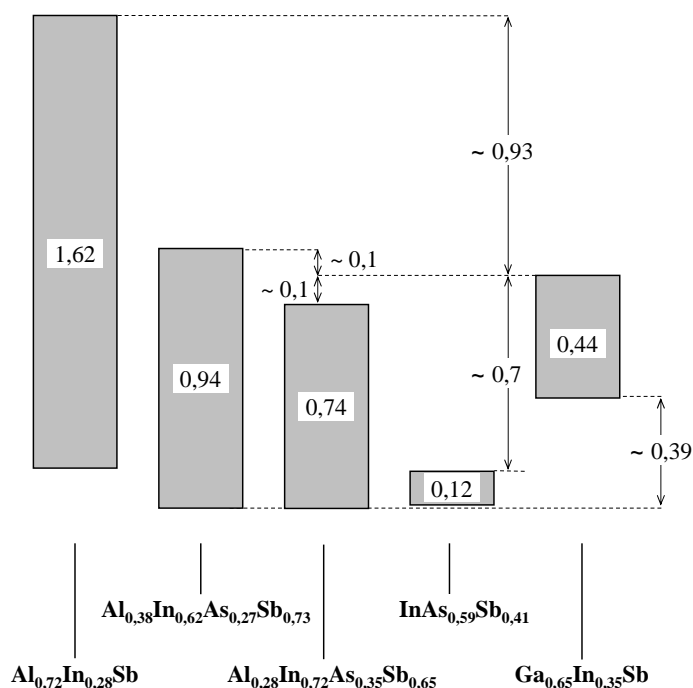


Figure 2.8 : Alignement des bandes entre $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$ et quelques alliages $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ de paramètre de maille $a = 6,23 \text{ \AA}$ (toutes les énergies sont en eV).

Ainsi, à température ambiante, les énergies de bande interdite des alliages d' $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ de paramètre de maille $a = 6,23 \text{ \AA}$ (accordés en maille avec le $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$) sont comprises entre 0,12 eV pour l' $\text{InAs}_{0,59}\text{Sb}_{0,41}$ et 1,62 eV pour l' $\text{Al}_{0,72}\text{In}_{0,28}\text{Sb}$ [Glisson78]. De plus, l'analyse de Vurgaftman [Vurgaftman01] indique que les alliages $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ bénéficient d'un large décalage de bande de valence avec le $\text{Ga}_{0,35}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$ ($\Delta E_V \sim 390 \text{ meV}$), quasiment indépendant de la composition en x et y [Vurgaftman01]. Cette dernière propriété offre une grande souplesse pour le choix de l'émetteur et plus particulièrement du décalage de bande de conduction à l'interface émetteur-base.

Nous retenons comme matériau d'émetteur le quaternaire $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ avec une fraction d'aluminium de 33% et une fraction d'arsenic de 31% qui présente une largeur de bande interdite de l'ordre de 0,83 eV. Dans une hétérojonction $\text{Al}_{0,33}\text{In}_{0,67}\text{As}_{0,31}\text{Sb}_{0,69}/\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$, les bandes de conduction sont sensiblement alignées, le différentiel de bande interdite étant complètement reporté sur la bande de valence. Alors qu'un décalage ΔE_C négatif permettrait

d'assurer un transport hors équilibre dans la base, cette configuration est préférée dans le cadre de ces travaux : nous verrons en effet par la suite que l'AlInAsSb est également un matériau de choix pour la réalisation d'un transistor bipolaire à double hétérojonction. Ainsi, afin de faciliter l'étude amont sur l'épitaxie, cette composition résulte d'un compromis afin que le même alliage quaternaire puisse être utilisé à la fois pour l'émetteur et le collecteur.

La Figure 2.9 présente l'alignement des bandes pour les deux hétérostructures émetteur-base retenues. Un émetteur en $\text{Al}_{0,33}\text{In}_{0,67}\text{As}_{0,31}\text{Sb}_{0,69}$ permet d'abaisser la barrière d'énergie vue par les électrons et un meilleur confinement des trous dans la base par rapport à un émetteur en $\text{Al}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Sb}$. Ceci conduit à une augmentation de l'efficacité d'injection et donc à des courants de collecteur plus élevés.

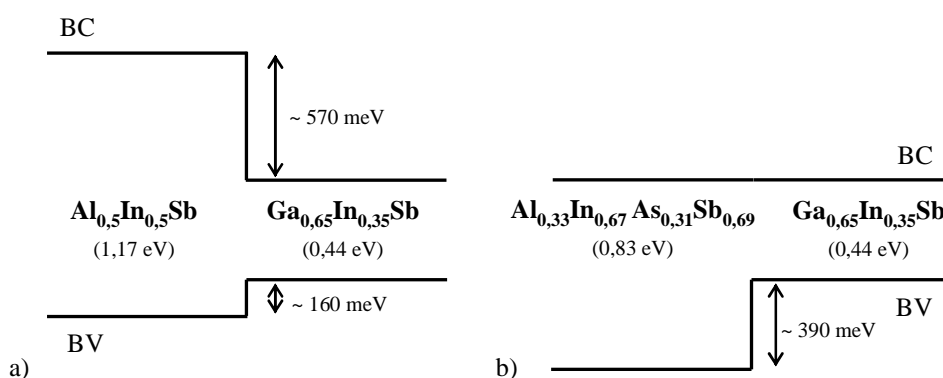


Figure 2.9 : Alignement des bandes des hétérostructures a) $\text{Al}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Sb}/\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$ et b) $\text{Al}_{0,33}\text{In}_{0,67}\text{As}_{0,31}\text{Sb}_{0,69}/\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$

2.4.2.D. Niveau de dopage et épaisseur de l'émetteur

Le dopage de l'émetteur est conditionné par la nécessité d'obtenir simultanément une bonne efficacité d'injection et une capacité émetteur-base réduite. L'hétérojonction E/B autorise un dopage de l'émetteur, fixé à $1.10^{17} \text{ cm}^{-3}$ dans notre étude, suffisamment faible pour y assurer une désertion des électrons quasi-totale aux fortes tensions.

D'autre part, l'épaisseur de l'émetteur doit être fine afin de minimiser sa résistance qui contribue de manière importante à la résistance totale d'émetteur. Pour le cas d'un émetteur en $\text{Al}_{0,33}\text{In}_{0,67}\text{As}_{0,31}\text{Sb}_{0,69}$, l'épaisseur est fixée à 400 Å. Le choix d'un émetteur en $\text{Al}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Sb}$ désadapté en maille ($\Delta a/a \sim 1,23 \%$) implique une croissance pseudomorphique et limite l'épaisseur de cette couche à 200 Å (cf. paragraphe 2.5.2).

2.4.3. Sélection du matériau de collecteur : $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$ ou $\text{Al}_{0,33}\text{In}_{0,67}\text{As}_{0,31}\text{Sb}_{0,69}$

Dans le cas d'un TBSH, le collecteur en $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$ est intéressant pour sa mobilité électronique élevée. La faible largeur de bande interdite du $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$ pose toutefois des problèmes de tensions de claquage BV_{CE0} faibles et le transfert précoce des porteurs en vallée latérale est également pénalisant. C'est néanmoins la solution la plus facile à mettre en œuvre

en terme de croissance. Le passage à une structure plus complexe est nécessaire si l'on désire associer performances fréquentielles et faible consommation avec une tenue en tension plus élevée. Nous retrouvons pour cette seconde hétérojonction les deux possibilités précédentes (i.e. AlInSb et AlInAsSb). Nous délaissions ici l' $\text{Al}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Sb}$ dont la discontinuité ΔE_C (0,57 eV) constitue une barrière conséquente au passage des électrons en sortie de base, difficile à atténuer par lissage. L'AlInAsSb est par contre particulièrement bien approprié puisqu'une hétérojonction de type II peut être obtenue en ajustant sa composition. Néanmoins, dans le cadre de ce manuscrit et comme nous l'avons déjà évoqué au paragraphe 2.4.2.C, nous avons retenu la même composition pour l'AlInAsSb du collecteur que celle utilisée dans l'émetteur (i.e. 33% Al, 31% As), ceci afin de faciliter l'étude amont sur l'épitaxie.

En ce qui concerne le dopage du collecteur, il est choisis relativement faible. Fixé à $5.10^{16} \text{ cm}^{-3}$, il favorise l'extension rapide de la zone de charge d'espace et minimise la capacité base-collecteur.

2.4.4. Sélection du contact émetteur et du sous-collecteur : $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$

Afin de favoriser des résistivités de contact faibles pour les électrodes métalliques, les couches de contact d'émetteur et de collecteur doivent être réalisées dans un matériau à faible largeur de bande interdite. Pour faciliter le développement technologique (épitaxie, gravure...), nous choisissons le GaInSb. Le dopage de ces couches doit être le plus élevé possible pour minimiser les résistances d'accès à travers les couches. Ce dopage est imposé par le procédé épitaxial et est limité à $2.10^{18} \text{ cm}^{-3}$ dans notre étude (cf. paragraphe 2.5.4.C). Enfin, du point de vue de l'épaisseur de ces couches :

- le contact d'émetteur est suffisamment épais pour éviter tout court-circuit entre les électrodes d'émetteur et de base auto-alignée,
- le sous-collecteur est très épais pour minimiser la résistance de couche.

2.4.5. Résumé sur les structures retenues

Nous considérons donc quatre structures dont les caractéristiques sont détaillées dans le Tableau 2.8 et en annexe 1 :

- une structure à simple hétérojonction AlInSb/GaInSb (S090114),
- une structure à double hétérojonction AlInSb/GaInSb/AlInAsSb (S090413),
- une structure à simple hétérojonction AlInAsSb/GaInSb (S090411),
- une structure à double hétérojonction AlInAsSb/GaInSb/AlInAsSb (S090412)

La Figure 2.10 présente les diagrammes de bande correspondants simulés à l'aide du programme 1D Poisson [Snider]. Pour les structures S090411 et S090412, on note l'introduction de deux couches d'arrêt en AlInSb, adjacentes à l'émetteur en AlInAsSb dont l'intérêt sera justifié au chapitre 3.2.

Tableau 2.8 : Structures épitaxiales des transistors avec un paramètre de maille $a = 6,23 \text{ \AA}$.

 ($\text{GaInSb} = \text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$, $\text{AlInSb} = \text{Al}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Sb}$, $\text{AlInAsSb} = \text{Al}_{0,33}\text{In}_{0,67}\text{As}_{0,31}\text{Sb}_{0,69}$)

	Structures avec émetteur en AlInSb			Structures avec émetteur en AlInAsSb			Type	Dopage (cm^{-3})
	S090114	S090413	Épaisseur (Å)	S090411	S090412	Épaisseur (Å)		
Contact d'émetteur	GaInSb		800	GaInSb		600	n^+	2.10^{18}
Couche d'arrêt	-		-	AlInSb		20	n	1.10^{17}
Emetteur	AlInSb		200	AlInAsSb		400	n	1.10^{17}
Couche d'arrêt	-		-	AlInSb		20	n	5.10^{16}
Base	GaInSb		400	GaInSb		400	p^+	1.10^{19}
Collecteur	GaInSb	AlInAsSb	1500	GaInSb	AlInAsSb	1500	n^-	5.10^{16}
Sous-collecteur	GaInSb		2500	GaInSb		2500	n^+	2.10^{18}
Buffer métamorphique	graduel			graduel			non dopé	
substrat	InP			InP			semi-isolant	

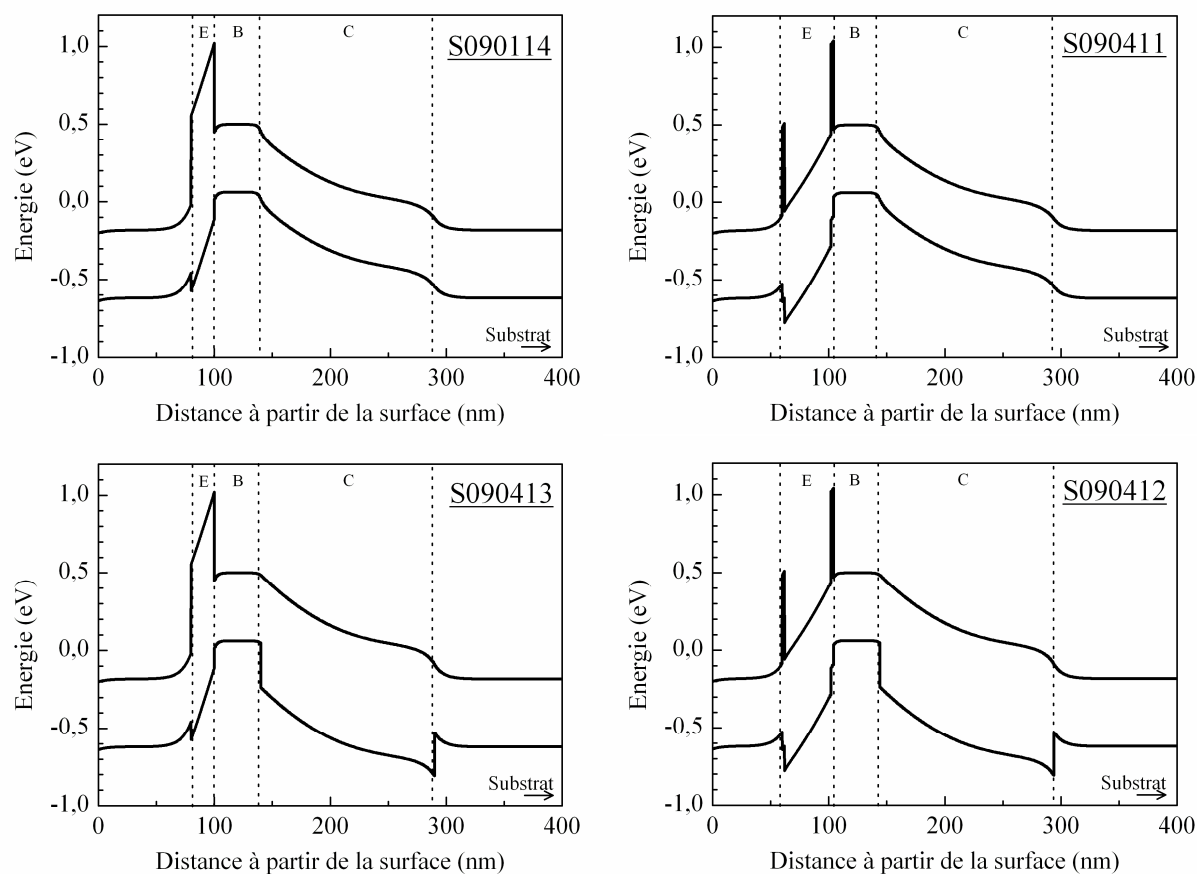


Figure 2.10 : Diagrammes de bande des structures étudiées

2.5. Croissance des hétérostructures antimoniées

La croissance des couches à base d'antimoniures conçues pour l'étude des TBH de ce travail a été réalisée par épitaxie par jets moléculaires (EJM) par l'équipe Epiphy de l'IEMN. Dans cette partie, il nous semble donc nécessaire de présenter, même succinctement, le principe et les atouts de cette technique de croissance. Nous abordons ensuite rapidement certaines des problématiques liées à la croissance d'hétérostructures antimoniées destinées à des applications hyperfréquences, à savoir la croissance métamorphique, puisqu'il n'existe pas de substrat semi-isolant adapté en maille à 6,23 Å, et le dopage de type n. Enfin, nous détaillons les caractéristiques des matériaux qui composent nos structures, point qui influence largement les performances à venir des composants.

2.5.1. Epitaxie par jets moléculaires (EJM)

L'épitaxie par jets moléculaires est une technique de croissance de couches minces, basée sur l'interaction entre des flux atomiques ou moléculaires et la surface d'un substrat monocristallin porté à une température adéquate. L'obtention de ces flux repose sur l'évaporation d'espèces contenues dans des cellules chauffées dans une enceinte sous ultravide (pression résiduelle $\sim 10^{-10}$ torr). Le vide dans l'enceinte est tel que le libre parcours moyen des éléments évaporés est supérieur à la distance cellule-substrat et limite l'incorporation d'impuretés résiduelles dans les couches. On a alors, dans certaines conditions, une cristallisation des éléments constitutifs de la couche sur le substrat. La composition du film déposé, ainsi que son taux de dopage dépendent de la température du substrat et des flux relatifs des espèces déposées.

L'EJM, caractérisée par une vitesse de croissance lente (de l'ordre de 1 $\mu\text{m/h}$), permet un très bon contrôle de la composition, du dopage et de l'épaisseur des matériaux déposés. Elle autorise, d'autre part, des profils de composition et de dopage très abrupts et offre de bonnes qualités d'interfaces. La basse pression permet l'utilisation de la technique de caractérisation *in situ* du RHEED (Reflection High Energy Electron Diffraction), atout spécifique à l'EJM. En s'appuyant sur la diffusion d'électrons en incidence rasante, cette technique donne des informations en temps réel sur l'évolution du front de croissance.

L'IEMN possède deux bâtis d'épitaxie par jets moléculaires de composés III-V. Le premier utilise un système à sources solides (SSMBE pour *Solid-Source Molecular Beam Epitaxy*) avec des cellules d'effusion de sources solides pour les éléments III et V. Le second utilise un système à sources gazeuses (GSMBE pour *Gas-Source Molecular Beam Epitaxy*) pour les éléments V avec de l'arsine et de la phosphine craqués. Au début de ces travaux, seul le bâti à sources solides possédait une cellule d'antimoine, les différentes structures de TBH réalisées durant cette thèse l'ont donc été grâce au bâti à sources solides (modèle Riber Compact 21 TM).

2.5.2. Croissance métamorphique

L'obtention d'une croissance épitaxiale de très bonne qualité exige de partir d'un substrat dont le paramètre de maille est proche de celui de la couche à épitaxier. Dans le cas contraire, une couche d'adaptation, dite métamorphique, est nécessaire afin d'ajuster le paramètre de maille du substrat à celui de la couche. La croissance d'une telle couche permet de réaliser un substrat « virtuel » afin de pallier l'absence d'un substrat au bon paramètre de maille ou perfectible en terme d'isolation électrique (InAs, GaSb). L'utilisation de cette technique est donc une nécessité pour la réalisation de nos composants à base d'antimoine destinés à des applications hyperfréquences, l'épitaxie des couches étant réalisée sur substrat d'InP semi-insolant. Dans notre cas, le désaccord de maille est de l'ordre de 5,8%.

Une étude détaillée sur la croissance métamorphique peut être trouvée dans [Lefebvre05], nous n'en citons ici que le principe général.

L'épitaxie d'une couche désadaptée sur un substrat rigide de très grande épaisseur est génératrice de contraintes essentiellement supportées par la couche en croissance. Le taux de contrainte est fonction du désaccord de maille avec le substrat qui est défini par :

$$\varepsilon_0 = \frac{\Delta a}{a} = \frac{a_0 - a_c}{a_c} \quad (2.8)$$

où a_0 et a_c sont respectivement les paramètres de maille naturels du substrat et de la couche épitaxiée. Si $\varepsilon_0 > 0$, la couche est en tension. Si $\varepsilon_0 < 0$, la couche est en compression.

La densité d'énergie élastique E_ε par unité de surface emmagasinée par la couche augmente linéairement avec son épaisseur h et est donnée par [Lefebvre05]:

$$E_\varepsilon = h\varepsilon_0^2 \left(\frac{E}{1-\nu} \right) \quad (2.9)$$

où E et ν sont respectivement le module d'Young et de Poisson du matériau de la couche.

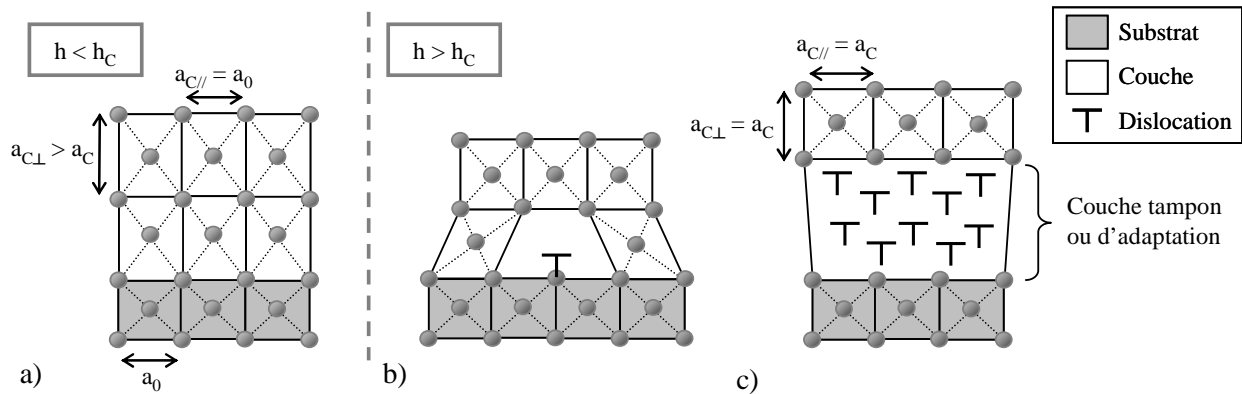


Figure 2.11 : Différentes situations à l'interface couche-substrat ($\Delta a/a < 2\%$) :
 a) pseudomorphique, b) intermédiaire et c) métamorphique.

Pour une épaisseur inférieure à une épaisseur dite « critique » h_C , la déformation ε_0 est purement élastique et la croissance est qualifiée de pseudomorphique (cas illustré par la Figure 2.11.a). Il est à noter que cette épaisseur critique est d'autant plus faible que le désaccord de maille est important et qu'elle limite ce type de croissance à des désaccords de maille $\Delta a/a < 2\%$.

Au delà de l'épaisseur critique, lorsque l'énergie emmagasinée dans la couche devient trop forte, il y a relaxation selon deux mécanismes, fonction du désaccord de maille :

- Quand $\Delta a/a < 2\%$, la relaxation de la couche épitaxiée est plastique par nucléation de défauts structuraux. Ces défauts sont le plus souvent des dislocations de désadaptation de réseau (*misfit dislocation*) qui permettent à la couche de se rapprocher de son paramètre de maille naturel en relaxant une partie de la contrainte (cas b de la Figure 2.11). Des dislocations dites émergentes (*threading dislocation*), qui relie l'interface couche-substrat à la surface, apparaissent également.
- Quand $\Delta a/a > 2\%$, la relaxation de la couche est élastique par modification du mode de croissance. La croissance évolue d'un mode de croissance bidimensionnel à un mode tridimensionnel par formation d'îlots (mode Stransky-Krastanov). La relaxation de la contrainte se fait donc par l'intermédiaire des surfaces libres générées par les îlots.

La situation c) de la Figure 2.11 illustre la croissance métamorphique, technique destinée à limiter la génération de défauts dans la couche active. Actuellement utilisée pour la fabrication de nombreux composants, elle consiste à réaliser une couche tampon (buffer) qui permet d'adapter la différence de maille entre le substrat et la couche active. Le désaccord est fractionné en une succession de désaccords plus faibles en s'appuyant sur la croissance de matériaux par sauts de composition ou par gradualité en composition. Les deux méthodes permettent de relaxer progressivement la contrainte liée au désaccord de maille et limitent la densité de dislocations émergentes préjudiciables au fonctionnement et à la technologie des composants électroniques.

2.5.3. Dopage de type n des antimoniures

Le silicium est le dopant n le plus communément utilisé pour les arséniures et phosphures. Néanmoins, cet élément de la colonne IV présente un caractère amphotère dans les III-V cfc : à partir d'une certaine concentration, il ne se substitue plus seulement aux éléments III en tant que donneur mais également aux éléments V en tant qu'accepteur. Ainsi, l'incorporation et le dopage en Si dépend des éléments III, des éléments V et de l'orientation de la surface [Venkatasubra.97]. Donneur dans GaAs, InAs, AlAs, le silicium se comporte comme un accepteur dans GaSb, AlSb et leurs alliages. Le dopage de type n des antimoniures n'est donc pas possible directement avec le silicium et nécessite l'emploi d'un autre dopant. Les chalcogènes de la colonne VI (soufre, sélénium, tellure) apparaissent comme des candidats logiques pour satisfaire ce besoin. Les sources élémentaires, comme le tellure élémentaire

présentant de très grandes pressions de vapeur, sont incompatibles avec l'EJM [Furukawa88]. L'utilisation de sources binaires telles PbSe ou GaTe est donc nécessaire. Cette dernière voie s'est révélée efficace pour le dopage de structures à base d'antimoine pour des applications transistors [Furukawa88, Turner93, Bennett03]. Une source à effusion GaTe, disponible à l'IEMN, a donc été utilisée.

2.5.4. Croissance des structures TBH : caractéristiques des couches épitaxiées

La croissance épitaxiale joue un rôle important sur les performances des composants et nécessite d'être optimisée avec soin afin d'atteindre les caractéristiques requises, en particulier les niveaux de dopage et les compositions des alliages. Dans ce paragraphe, nous présentons les propriétés des matériaux épitaxiés qui constituent nos structures TBH. Pendant la croissance des couches, l'état structural de la surface est observé *in situ* par RHEED, la vitesse de croissance est typiquement de 1,5 à 2 Å/s et la température du substrat est maintenue autour de 400 à 450°C pour les couches actives des TBH.

2.5.4.A. Croissance des couches d'alliage quaternaire

La croissance de composés mixtes arséniures/antimoniures tels les alliages quaternaires AlInAsSb est un problème délicat. En effet, les mécanismes qui règlent la compétition entre l'incorporation des différents éléments V sont difficiles à maîtriser. Ceci est principalement dû au fait que dans les conditions standards utilisées en EJM, le coefficient d'incorporation des éléments V est inférieur à 1 contrairement à celui des éléments III. Ainsi, de nombreux paramètres influencent l'incorporation de Sb et d'As comme le rapport des flux Sb/As, la température de croissance, mais aussi les espèces moléculaires utilisées comme précurseurs des éléments V (Sb_2 , Sb_4 , As_2 , As_4), la nature des éléments III (Al, Ga, In) et la vitesse de croissance [Renard05].

L'effet de la température de croissance sur la qualité cristalline d'alliages AlInAsSb de paramètre de maille $a = 6,2 \text{ \AA}$ a été étudié par Magno et al. [Magno02, Magno06a, Magno06b]. Des expériences de photoluminescence et de diffraction des rayons X, il ressort que la température de croissance joue un rôle essentiel sur les propriétés structurales et sur la composition de tels alliages et qu'elle est optimale dans la gamme 350-400°C. Les premières études des conditions de croissance pour les composés quaternaires $Al_{0,33}In_{0,67}As_{0,31}Sb_{0,69}$ de nos structures TBH (émetteur et collecteur) ont débuté au laboratoire pendant ces travaux de thèse et ont abouti aux mêmes conclusions avec une croissance 3D pour une température de substrat de 450°C et une croissance 2D pour des températures de 350°C et 400°C.

La figure suivante présente le spectre de diffraction X obtenu sur une couche massive d' $Al_{0,33}In_{0,67}As_{0,31}Sb_{0,69}$ pour une température de croissance de 400°C. Les pics les plus à droite correspondent au substrat InP et à la couche d'AlInAs accordée sur InP. Les deux pics de diffraction à gauche du pic du substrat correspondent à la diffraction par la couche tampon

en $\text{Al}_{0,72}\text{In}_{0,28}\text{Sb}$ et au quaternaire $\text{Al}_{0,33}\text{In}_{0,67}\text{As}_{0,31}\text{Sb}_{0,69}$. La position du pic d' AlInAsSb permet de valider la composition visée. Il est à noter que le décalage vers la gauche du pic correspondant à l' $\text{Al}_{0,72}\text{In}_{0,28}\text{Sb}$ est indicatif de la présence d'une contrainte résiduelle (en compression) résultant d'une relaxation incomplète de la couche tampon.

Des mesures par effet Hall à température ambiante ont par ailleurs révélé une mobilité électronique de l'ordre de $600 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ pour $\text{Al}_{0,33}\text{In}_{0,67}\text{As}_{0,31}\text{Sb}_{0,69}$ dopé Te à $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Cette valeur est comparable à celle reportée par le NRL pour $\text{Al}_{0,48}\text{In}_{0,52}\text{As}_{0,25}\text{Sb}_{0,75}$ [Magno06a].

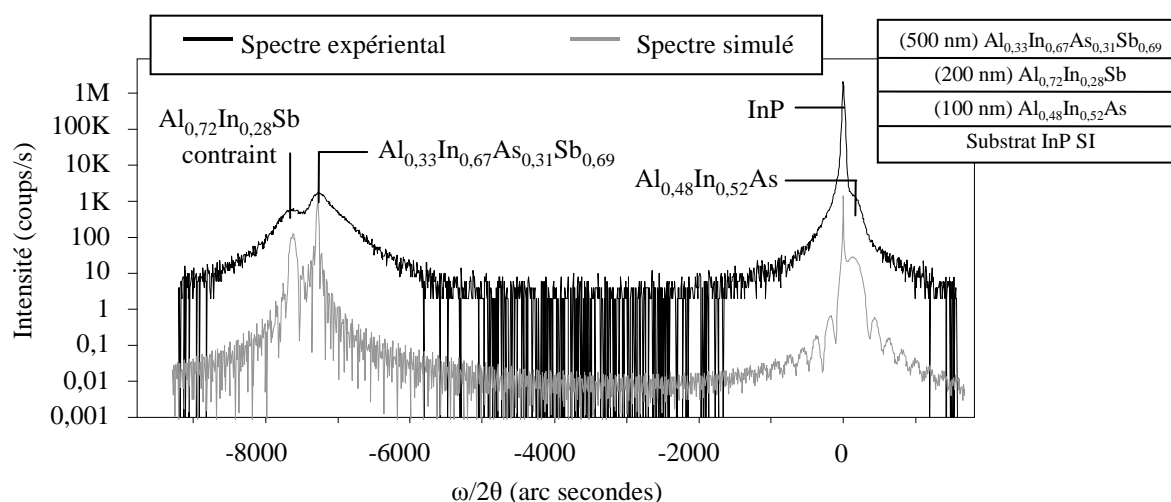


Figure 2.12 : Spectres de diffraction X expérimental et simulé d'une couche d' AlInAsSb épitaxiée sur InP à 400 °C

2.5.4.B. Croissance de la base

La base est l'unique couche de la structure qui requiert un dopage p avec pour exigences, un niveau de dopage élevé ($\sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) tout en conservant une mobilité et un temps de vie électronique maximum.

De manière générale, le carbone s'est imposé depuis quelques années comme le dopant p pour les composés III-V cfc, en remplacement du dopant historique de l'EJM, le béryllium. En effet, ce dernier élément présente un caractère diffusif assez fort qui rend très délicat l'obtention de profils de dopage abrupts, spécialement dans le cas de couches fortement dopées. Or, l'obtention d'une base très fortement dopée (dans la gamme des 10^{19} à 10^{20} cm^{-3}), est un élément clé dans la réalisation des TBH. La diffusion des dopants, courante dans le cas du béryllium [Miller85], dans les couches adjacentes et en particulier dans l'émetteur entraîne un décalage néfaste entre la jonction électrique np et l'hétérojonction émetteur-base, qui compromet les performances du transistor en dégradant l'injection des porteurs dans la base.

Etudié depuis la fin des années 1980, le carbone représente, en raison d'un coefficient de diffusion plus faible, une alternative au béryllium [Cunningham89, Abernathy89]. Élément de

la colonne IV, il présente un caractère amphotère : il se substitue aux éléments V en tant qu'accepteur dans GaAs, GaSb et InSb et aux éléments III en tant que donneur dans InP et InAs [Hove94, Schoenfeld98]. L'élément carbone provient dans notre cas d'une source gazeuse de tétrabromure de carbone CBr_4 . L'utilisation de ce gaz précurseur a été établie au laboratoire au début des années 2000 et a permis l'obtention en SSMBE de dopages élevés supérieurs à 10^{20} cm^{-3} dans l'InGaAs et le GaAsSb accordés sur InP [Godey05, Yarehka07].

En ce qui concerne le GaInSb, l'évolution de la mobilité des trous, mesurée par effet Hall à 300 K, en fonction du niveau de dopage de la couche en $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$ est tracée dans la Figure 2.13. Nous y avons ajouté quelques valeurs rapportées par l'équipe de Magno du NRL et obtenues avec du $\text{Ga}_{0,73}\text{In}_{0,27}\text{Sb}$ dopé Be [Champlain06]. Comme attendu, la mobilité décroît avec la densité de trous. Néanmoins, pour un échantillon dopé à $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, on obtient une mobilité des trous de l'ordre de $190 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ correspondant à une résistance de couche de $\sim 275 \Omega/\square$ pour une base de 400 \AA ; cette valeur est 4 à 5 fois supérieure aux mobilités obtenues dans GaInAs ou GaAsSb pour un même niveau de dopage (~ 40 à $50 \text{ cm}^2/\text{Vs}$).

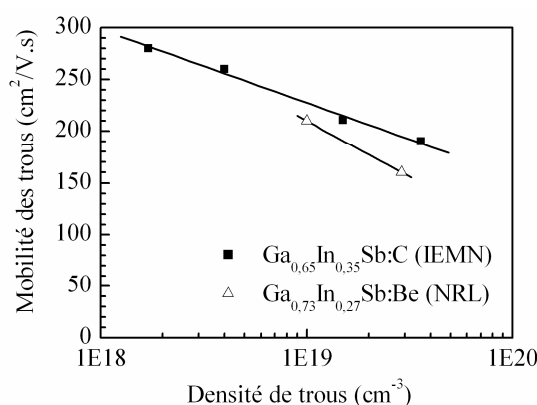


Figure 2.13 : Mobilité des trous en fonction du niveau de dopage dans GaInSb (les données du NRL sont tirées de [Champlain06])

2.5.4.C. Croissance des couches de contact

Les résistances parasites d'accès et de contact d'émetteur et de collecteur constituent une part importante des limitations des performances dynamiques du composant. La minimisation de ces résistances passe par un fort niveau de dopage de type n des couches de contact qui :

- permet de réduire l'épaisseur de zone déplétée à l'interface entre métal et semiconducteur et donc de favoriser le passage des porteurs par effet tunnel (i.e. réduction de la résistivité spécifique de contact ρ_c – cf. paragraphe 3.3.1).
- associé à un sous-collecteur épais, minimise la résistance de couche R_{\square} (i.e. réduction de la résistance d'accès collecteur).

Comme indiqué précédemment, le matériau à faible largeur de bande interdite GaInSb constitue le matériau de contact d'émetteur et de sous-collecteur et le tellure est utilisé ici comme dopant de type n avec comme précurseur le GaTe. Ainsi, la Figure 2.14 présente quelques valeurs de mobilité des électrons dans des couches massives de GaInSb en fonction du niveau de dopage. Nos résultats sont proches des valeurs tirées de la littérature, également reportées sur la Figure 2.14 [Magno06a, Champlain07b].

Il apparaît par ailleurs que l'incorporation du Te dans GaInSb est limitée et ne permet pas d'atteindre des niveaux de dopage au-delà de $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Cet effet a déjà été reporté dans le cas du dopage Te de GaSb et AlSb [Turner93, Ikossi02, Bennett03].

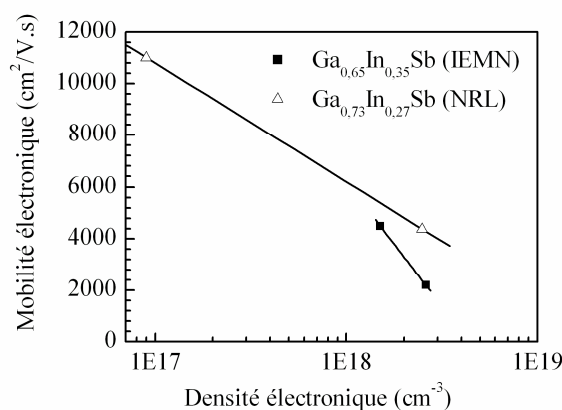


Figure 2.14 : Mobilité électronique en fonction du niveau de dopage Te (les données du NRL sont tirées de [Magno06a, Champlain07b])

2.5.4.D. Buffer métamorphique et morphologie des couches

Le bon fonctionnement d'un TBH dépend de la qualité des couches actives et de leurs interfaces. Sur buffer métamorphique, il est à craindre qu'il soit altéré par :

- une dégradation des matériaux due aux dislocations,
- une dégradation des jonctions, de nouveau à cause des dislocations qui peuvent faciliter les recombinaisons électron-trou par piégeage des porteurs en régime de faible injection et accroître les courants de fuite [Makimoto91,Ito92].

L'épitaxie de couches tampons métamorphiques graduelles est étudiée à l'IEMN depuis le début des années 90 pour des HEMT métamorphiques sur GaAs [Win92] et a permis la réalisation de composants à l'état de l'art [Zaknoune98, Bollaert02, Zaknoune03]. Cette expérience a ensuite été transférée à la réalisation de TBH InP/InGaAs métamorphiques sur GaAs [Lefevbre05]. Les structures TBH de ce travail utilisent des couches tampons développées pour la croissance de HEMT métamorphiques à canal GaInSb sur InP [Delhaye08]. Afin d'accommoder le fort désaccord de maille ($\sim 5,8\%$), ces couches tampons associent un buffer uniforme AlSb à un buffer graduel $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$ (cf. Figure 2.15). Le choix s'est porté sur ces matériaux à grandes largeurs de bande interdite pour leurs fortes résistivités qui favorisent une bonne isolation électrique.

Du fait du désaccord de maille InP/AlSb ($\sim 4,3\%$), la relaxation dans le buffer uniforme AlSb (Figure 2.15 - ①) a lieu par évolution $2D \rightarrow 3D \rightarrow 2D$ en surface. En ce qui concerne le buffer graduel $Al_xIn_{1-x}Sb$ (entre ② et ③), la rampe graduelle de contrainte introduite est linéaire et permet l'introduction lente et continue de la contrainte liée au désaccord de paramètre de maille AlSb/ $Ga_{0,65}In_{0,35}Sb$. Elle assure ainsi la relaxation plastique via le réseau de dislocation (*misfit dislocation*), tout en préservant une croissance 2D. Un décrochement de composition (③) est ajouté en fin de rampe afin d'accroître le niveau de relaxation et d'éliminer toute contrainte résiduelle éventuelle (ici en compression) [Cordier99].

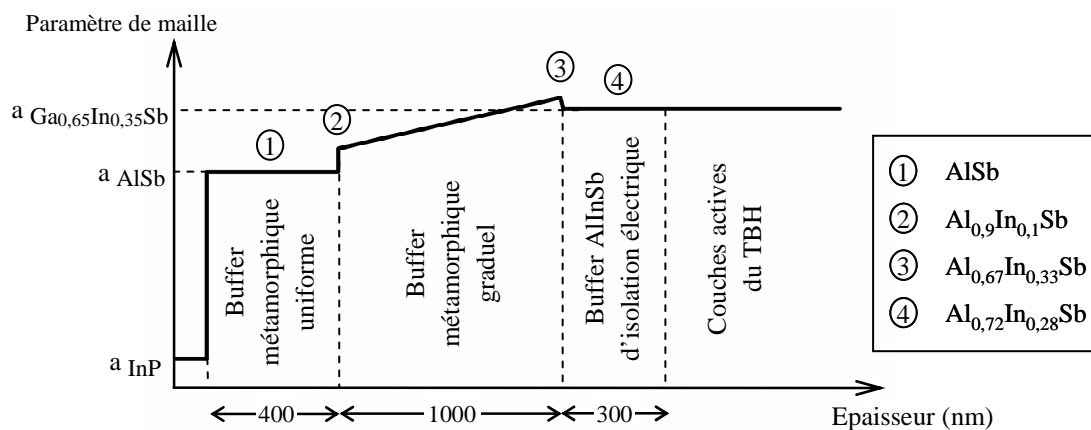


Figure 2.15 : Evolution visée du paramètre de maille avec l'épaisseur du buffer métamorphique

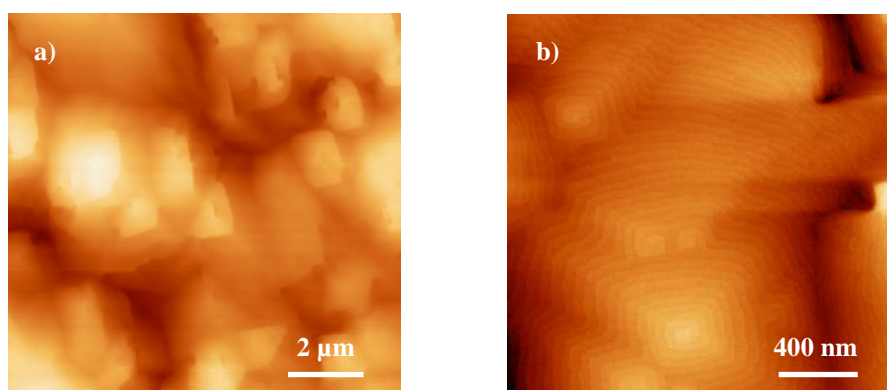


Figure 2.16 : Images AFM a) de la surface d'une structure TBH à base $Ga_{0,65}In_{0,35}Sb$ sur InP (échelle en Z : 0-35 nm), b) de la surface du buffer (échelle en Z : 0-8 nm) (d'après [Delhaye08])

La Figure 2.16.a présente la morphologie de surface d'une structure complète de TBH utilisant la couche tampon décrite précédemment. La surface présente une rugosité (rms) raisonnable de l'ordre de 6 nm qui permet d'envisager la fabrication de composants. La morphologie de la surface est composée de défauts de forme pyramidale (voir Figure 2.16.b)

qui sont associés à la croissance en spirale autour d'une dislocation émergente [Thibado96]. La densité de dislocations émergentes a par ailleurs été estimée à environ 10^8 cm^{-2} .

2.6. Conclusion

Nous avons précisé les principales propriétés électroniques des matériaux antimoniures afin de nous guider dans la définition de structures bipolaires innovantes, adaptés à un fonctionnement fréquentiel. Cette réflexion a abouti à la sélection de quatre hétérostructures basées sur le système $\text{AlIn}(\text{As})\text{Sb}/\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$ dont le paramètre de maille est de 6,23 Å. Après avoir présenté quelques aspects spécifiques liés à la croissance de ces hétérostructures antimoniées, nous avons détaillé les conditions de fabrication et les caractéristiques des matériaux qui composent nos structures et qui conditionnent largement les performances des composants à venir.

3 . Technologie de fabrication : mise en œuvre et optimisation

Ce chapitre est consacré à la description détaillée du processus technologique de fabrication des nouveaux TBH à base GaInSb jusqu'à des dimensions submicroniques. Ce processus a été mis au point à partir de l'expérience acquise depuis 2002 au sein du laboratoire sur la réalisation de TBH à base GaInAs [Lefebvre05] et plus récemment GaAsSb [Zaknoune08].

La réalisation de composants dans le système AlIn(As)Sb/GaInSb moins bien connu que les systèmes plus classiques InP/InGaAs ou InP/GaAsSb a nécessité le développement de briques technologiques propres, dont certaines comme le contrôle de la gravure du mesa d'émetteur pour l'accès à la base ou la minimisation des résistances de contact sont critiques pour les performances dynamiques.

Nous décrivons dans un premier temps l'enchaînement technologique du procédé de fabrication global. Nous détaillons ensuite les études menées pour la mise au point d'un procédé de gravure fiable et reproductible des couches antimoniées qui composent nos structures, ainsi que pour l'optimisation des contacts ohmiques sur les couches de contact en GaInSb. Nous finissons enfin par la présentation d'une nouvelle approche pour la réalisation des ponts à air.

3.1. Procédé de fabrication pour TBH de petites dimensions

Le procédé de fabrication des TBH de ce travail est basé sur une technologie triple mesas (émetteur, base, isolation), avec une base auto-alignée et des sorties de contact par ponts à air. Il comporte sept niveaux de masquage, tous réalisés en lithographie électronique et fait appel à une succession de dépôts métalliques et de gravures chimiques pour la formation des mesas. La Figure 3.1 présente la géométrie finale des TBH réalisés.

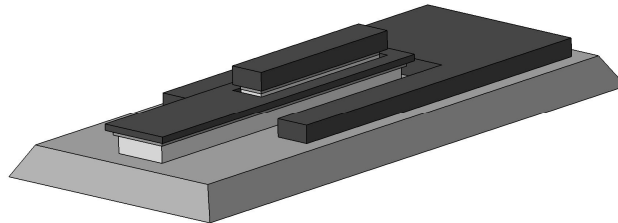


Figure 3.1 : Géométrie des TBH à base GaInSb de petites dimensions

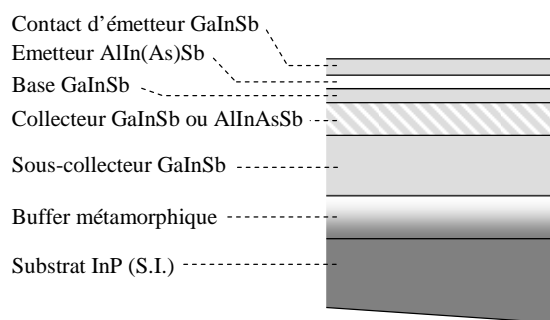
Nous présentons, dans ce qui suit, les étapes principales du procédé de fabrication des transistors de petites dimensions de ce travail en nous appuyant sur la Figure 3.2 (pages 77-78) qui décrit l'enchaînement technologique de fabrication.

La technologie de nos TBH débute par le dépôt de la métallisation d'émetteur (Figure 3.2.a). Tout comme pour le dépôt des électrodes de base et de collecteur (étapes c et e de la Figure 3.2), cette étape repose sur un bicouche de résines électro-sensibles (Copolymère/PMMA) dont la différence de sensibilité mène à la formation d'un profil de résine en casquette nécessaire au lift-off de la métallisation. L'utilisation de la lithographie électronique permet la définition de contacts d'émetteur jusqu'à des dimensions submicroniques. La métallisation d'émetteur ainsi déposée fait office de masque pour l'étape de gravure du mesa d'émetteur (Figure 3.2.b), ce qui permet d'éviter tout problème de désalignement.

La métallisation de base est ensuite déposée par auto-alignement avec la métallisation d'émetteur (Figure 3.2.c). Le but de cette technique est de minimiser l'espacement entre le mesa d'émetteur et le contact de base qui est alors réduit à la profondeur de sous-gravure de la couche d'émetteur en AlIn(As)Sb (cf paragraphe 3.2.4.C). Après protection de l'émetteur et de la base par lithographie électronique, la gravure des couches de base et de collecteur est réalisée (Figure 3.2.d) afin d'accéder au sous-collecteur sur lequel est déposée la métallisation de collecteur par lithographie électronique et lift-off (Figure 3.2.e). La gravure du sous-collecteur par voie chimique assure l'isolation des composants et termine la fabrication des transistors (Figure 3.2.f)

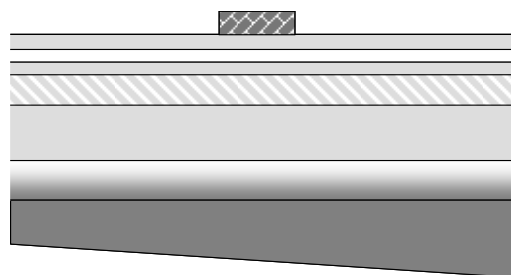
L'étape suivante consiste à définir par lithographie électronique les supports de pont et les ouvertures des vias (Figure 3.2.g) qui permettront la connexion des TBH par la technique de ponts à air décrite plus précisément au paragraphe 3.4 (Figure 3.2.h).

Profil de la couche avant process



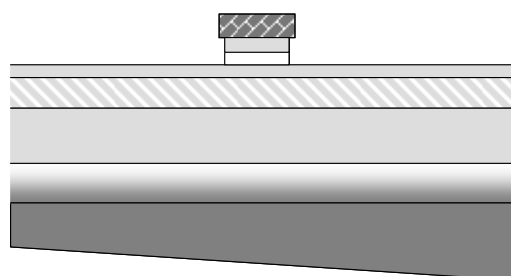
a. Métallisation d'émetteur

- Lithographie électronique (niveau 1)
- Dépôt métallique par évaporation
- Lift-off



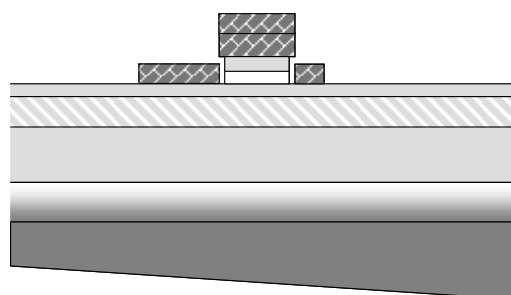
b. Gravure du mesa d'émetteur

- Gravure chimique du contact d'émetteur en GaInSb
- Gravure chimique de l'émetteur en AlIn(As)Sb



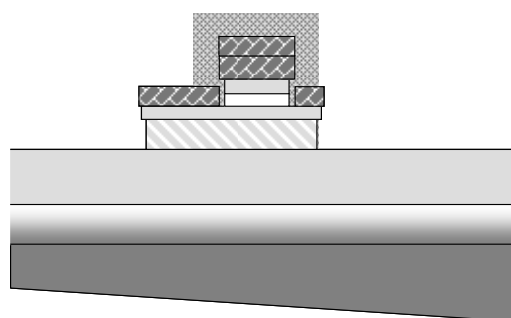
c. Métallisation de la base par auto-alignement

- Lithographie électronique (niveau 2)
- Dépôt métallique par évaporation
- Lift-off



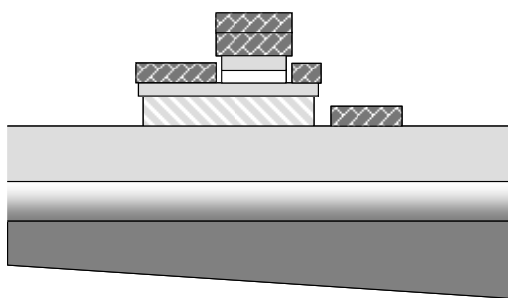
d. Gravure de la base et du collecteur

- Lithographie électronique (niveau 3)
- Gravure humide de la base en GaInSb
- Gravure humide du collecteur en GaInSb ou AlInAsSb



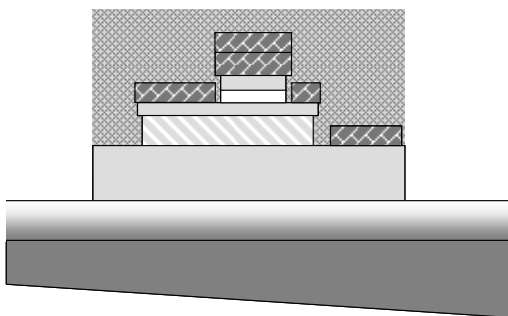
e. Métallisation du collecteur

- Lithographie électronique (niveau 4)
- Dépôt métallique par évaporation
- Lift-off



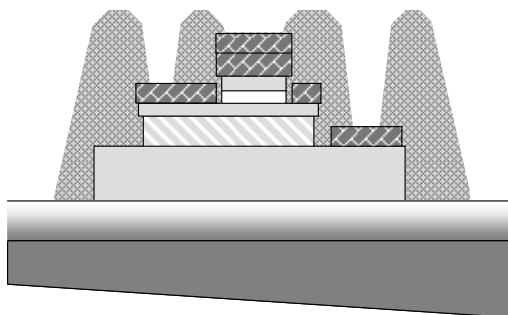
f. Isolation du composant

- Lithographie électronique (niveau 5)
- Gravure humide du sous-collecteur en GaInSb



g. Support de pont et ouverture des vias

- Lithographie électronique (niveau 6)
- Fluage



h. Connexion

- Lithographie électronique (niveau 7)
- Dépôt métallique par évaporation
- Lift-off

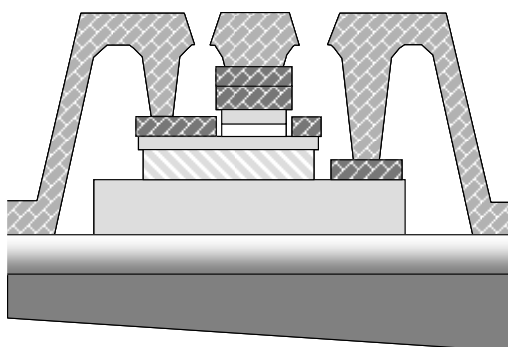


Figure 3.2 : Enchaînement technologique de fabrication des TBH
(vue en coupe longitudinale)

3.2. Développement de gravures sélectives

Les propriétés d'un TBH sont directement liées à ses dimensions. Les dimensions perpendiculaires au substrat sont déterminées par l'épaisseur des couches épitaxiées et donc par le contrôle de la croissance. Les dimensions latérales (mesa) sont elles déterminées par des procédés de lithographie et de gravure. Le procédé de fabrication d'un TBH nécessite plusieurs étapes de gravure afin d'accéder à la base (mesa d'émetteur), de délimiter la jonction base-collecteur (mesa de base) et enfin de réaliser l'isolation électrique des dispositifs (mesa d'isolation). Le bon fonctionnement des composants dépend de la maîtrise de ces trois étapes, mais une attention toute particulière est à porter à la gravure de l'émetteur. En effet, le contrôle précis de la profondeur de gravure se révèle particulièrement critique dans le cas du mesa d'émetteur : il s'agit de préserver quasiment intégralement l'épaisseur de la fine couche de base afin de minimiser la résistance latérale de la base extrinsèque. Par exemple, une incertitude de 100 Å sur la profondeur gravée entraîne, pour une épaisseur de base de 400 Å, une augmentation de 25 % de la résistance carrée, fortement préjudiciable au comportement à hautes fréquences du TBH. L'utilisation d'une gravure sélective du matériau d'émetteur relativement à celui de la base est alors cruciale et assure, de surcroît, l'uniformité des dispositifs sur le substrat. La maîtrise de la rugosité de l'état de surface après gravure est également un élément essentiel puisque, comme nous le verrons par la suite, il détermine la qualité des contacts ohmiques.

En technologie des semiconducteurs, on distingue principalement deux types de gravure : les gravures sèches, basées sur le bombardement ionique et/ou des réactions chimiques entre le gaz ionisé et la surface de l'échantillon, et les gravures humides, uniquement basées sur des attaques chimiques en solution. L'avantage des gravures sèches réside dans leur forte anisotropie, qui permet l'obtention de flancs abrupts. Elles sont néanmoins agressives et peuvent induire des dommages dans le matériau qui dégradent le fonctionnement du composant. En particulier, un contact de base dégradé et l'apparition de fuites à la jonction base-collecteur ont été observés dans le cas de TBH InP/InGaAs [Kahn04]. Ces considérations nous ont conduits à choisir la gravure chimique humide. Cette technique relativement simple à mettre en œuvre présente toutefois une importante limitation : le caractère généralement isotrope des gravures humides engendre des attaques latérales et donc des effets de sous-gravures prononcées.

La gravure de composés antimoniés a été relativement peu étudiée et se limite aux composés binaires InAs, GaSb et AlSb et à quelques uns de leurs alliages de paramètre de maille proche de 6,1 Å tels $\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{Sb}$ [DeSalvo94], $\text{AlAs}_{0,08}\text{Sb}_{0,92}$ et $\text{InAs}_{0,91}\text{Sb}$ [Dier04]. Nous présentons donc dans ce qui suit l'étude menée sur la gravure humide des couches des hétérostructures $\text{AlIn}(\text{As})\text{Sb}/\text{GaInSb}$, procédé nécessaire à la fabrication de nos TBH. Pour cela, nous définissons tout d'abord les paramètres qui interviennent dans une gravure humide et

déterminons leur influence sur les vitesses et les sélectivités de gravure. Nous verrons également que l'utilisation de solutions dont les vitesses de gravure sont relativement faibles ($< 1000 \text{ \AA}/\text{min}$) permet un bon contrôle de la profondeur de la sous-gravure d'émetteur.

3.2.1. Introduction aux gravures humides de semiconducteurs III-V

La gravure humide, utilisée pour la formation de mesas, pour le polissage ou pour révéler certains défauts d'ordre cristallin présents dans les semiconducteurs, peut suivre plusieurs mécanismes. Elle peut être électrochimique si elle fait appel à une source électrique extérieure (électrolyse) ou, comme dans notre cas, purement chimique. La gravure chimique résulte de la présence, dans la solution d'attaque, d'espèces qui vont réagir avec le matériau au niveau de sa surface et met en jeu, dans la majorité des cas (exception faite des matériaux phosphorés [Notten84]), une suite de réactions d'oxydation et de réactions de dissolution du matériau oxydé (complexation). La plupart des solutions de gravure font donc intervenir : - un agent oxydant (H_2O_2 , CrO_3 , HNO_3 , $\text{HIO}_3\dots$), - un agent complexant (acide ou base) qui dissout l'oxyde obtenu, - un agent diluant (H_2O , $\text{CH}_3\text{COOH}\dots$) [Baca05].

3.2.1.A. Mécanisme limitant et profil de gravure

La Figure 3.3 présente une schématisation du mécanisme de gravure chimique par oxydation/dissolution. Les molécules d'agents oxydants diffusent (taux de diffusion f_1) vers la surface de la couche oxydée (A) où elles sont adsorbées au niveau des sites actifs de l'oxyde (taux d'adsorption k_1). Ces molécules ou leurs produits décomposés (atomes d'oxygène) diffusent ensuite au travers de la surface oxydée (taux de diffusion f_1') jusqu'à l'interface oxyde/semiconducteur (S) où s'effectue la réaction d'oxydation (taux d'oxydation r_1). De manière analogue, les molécules d'agents complexants diffusent (taux de diffusion f_2) vers la surface oxydée A où elles sont adsorbées (taux d'adsorption k_2). La réaction de complexation a lieu (taux de complexation r_2) et les ions libérés diffusent dans la solution (taux de diffusion f_3).

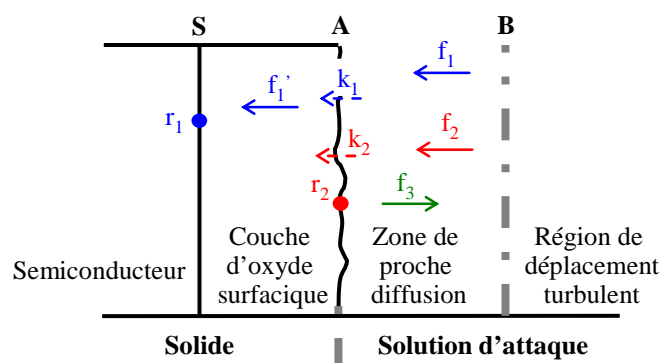


Figure 3.3 : Mécanisme d'une attaque chimique par oxydation/dissolution (d'après [Podevin01])

Les mécanismes de gravure non électrochimiques sont donc gouvernés par deux phénomènes principaux qui vont limiter la vitesse d'attaque : la diffusion et la cinétique de réaction.

Dans le cas d'une gravure limitée par la diffusion, la vitesse d'attaque dépend de la vitesse à laquelle les espèces réactives parviennent à la surface (f_1 , f_1' et f_2) et de la vitesse à laquelle les produits de réaction sont évacués de cette surface (f_3). Ce type de gravure tend donc à être isotrope et fortement sensible à la nature et au degré d'agitation. Elles sont également particulièrement sujettes aux effets de tranchée dus à une accumulation des éléments réactifs en bord de masque (i.e. vitesses de gravure anormalement élevées sur les bords des motifs).

Dans le cas d'une gravure limitée par la cinétique de réaction, la vitesse d'attaque est contrôlée par la vitesse à laquelle les réactions chimiques (oxydation, dissolution) ont lieu à la surface (r_1 , r_2). Ces gravures tendent à être anisotropes et à suivre préférentiellement certaines orientations cristallines. Elles peuvent également être sensibles au type et au niveau de dopage du matériau à graver, les réactions d'oxydation étant basées sur des échanges d'électrons. Elles sont par ailleurs très sensibles à la température et relativement insensibles à l'agitation.

La domination de l'un ou l'autre des phénomènes est souvent déterminée par la proportion relative de chaque constituant dans la solution et influe profondément sur le profil de la gravure.

3.2.1.B. Contamination et oxydation

Les matériaux III-V présentent une surface naturellement oxydée à l'air libre. Si l'échantillon a subi des étapes technologiques, en particulier avec des enductions de résines organiques et des rinçages avec des solvants, sa surface présente également une contamination organique résiduelle. Avant tout processus de gravure, une préparation des échantillons est donc essentielle afin de désoxyder et décontaminer la surface.

Deux produits chimiques sont couramment employés pour retirer l'oxyde natif des matériaux III-V : l'acide chlorhydrique et l'ammoniaque. Une solution basique étant plus adaptée pour dissoudre les résidus de résine, nous avons introduit une étape de désoxydation dans une solution d'ammoniaque avant chaque étape de gravure.

3.2.1.C. Sélectivité de gravure et problématique liée à la fabrication de TBH

Une solution de gravure dite « sélective » attaque préférentiellement un matériau par rapport à un autre. La sélectivité est alors définie comme le rapport des vitesses de gravure des deux matériaux. Elle peut être obtenue en faisant varier les concentrations des espèces réactives, en contrôlant le pH ou la température, par exemple.

Cette notion de sélectivité est particulièrement importante dans le cas de la fabrication de TBH. En effet, comme indiqué en introduction de cette section, le contrôle précis de la profondeur de gravure du mesa d'émetteur est crucial afin de permettre un positionnement

optimum du contact ohmique sur la fine couche de base (Figure 3.4). Pour ce faire, la gravure du contact d'émetteur (Figure 3.4.b) peut être réalisée par gravure non sélective (par rapport à la couche d'émetteur) en contrôlant le temps de gravure. En revanche, la gravure de l'émetteur (Figure 3.4.c) requiert l'utilisation d'une solution sélective (par rapport à la couche de base) afin d'éviter toute dégradation de la base extrinsèque. Pour cette application, la sélectivité recherchée doit être la plus grande possible avec une vitesse de gravure contrôlable de l'ordre de 1000 Å/min.

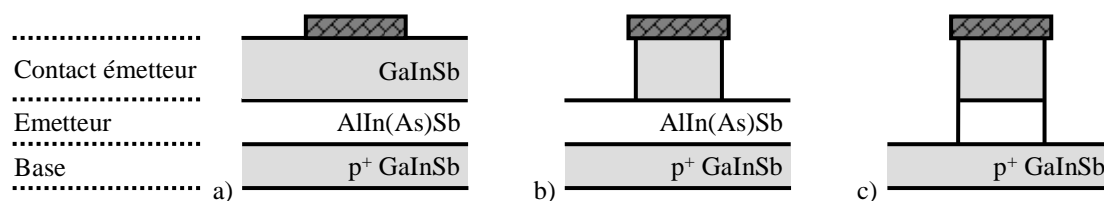


Figure 3.4 : Etapes de formation du mesa d'émetteur dans une technologie auto-alignée
a) métallisation d'émetteur, b) gravure du contact d'émetteur, c) gravure de l'émetteur

3.2.2. Procédé expérimental

Afin de définir de façon précise les vitesses de gravure et les rapports de sélectivité, les études de gravures de ce travail ont été réalisées sur des couches épaisses (0,3-1µm) de matériaux épitaxiés sur substrat d'InP. Un masque de gravure est réalisé en lithographie optique. Les solutions à base d'acide tartrique sont préparées à partir de cristaux d'acide tartrique L(+) ($C_4H_6O_6$) dissous dans de l'eau désionisée (EDI), dans les proportions indiquées. La dilution de l'acide chlorhydrique (37%) (HCl) dans l'eau menant à une réaction exothermique, les solutions contenant du HCl sont refroidies jusqu'à température ambiante avant gravure ou avant ajout éventuel de peroxyde d'hydrogène (30%) (H_2O_2). Enfin, le pourcentage massique de l'acide phosphorique (H_3PO_4) utilisé dans certains essais est de 85%. Juste avant la gravure, les échantillons sont désoxydés pendant 1 minute dans une solution à base d'ammoniaque (30%) ($NH_4OH:H_2O$ (1:10)) puis rincés dans l'eau désionisée. Les échantillons sont ensuite gravés sans agitation pendant 1 à 10 min en fonction de la vitesse de gravure et rincés dans l'eau désionisée. Après retrait du masque de résine dans l'acétone, la hauteur de gravure est mesurée avec un profilomètre Tencor Instrument Alpha Step P10 sur au moins 3 points de l'échantillon. La vitesse de gravure moyenne est déterminée en utilisant une régression linéaire des épaisseurs gravées en fonction du temps de gravure.

3.2.3. Gravure humide de GaInSb

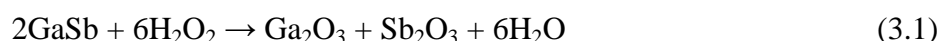
Dans cette section, nous étudions la gravure chimique du $Ga_{0,65}In_{0,35}Sb$, matériau utilisé dans les structures TBH de ce travail pour les couches de contact (contact d'émetteur et sous-collecteur), la base ainsi que le collecteur dans le cas des TBH à simple hétérojonction (structures S090115 et S090412). Cette étude vise à obtenir des vitesses de gravure

contrôlables de l'ordre de 500 à 1000 Å/min et s'intéresse particulièrement à l'uniformité et à la rugosité des surfaces gravées.

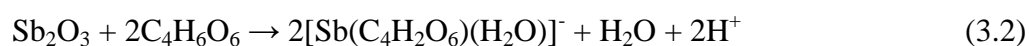
3.2.3.A. Etude de la solution C₄H₆O₆:H₂O₂:HCl:H₂O

La gravure du ternaire GaInSb n'ayant pas été étudiée à notre connaissance avant ces travaux de thèse, nous nous sommes intéressés à la littérature portant sur la gravure de substrats GaSb. Plusieurs solutions utilisées associent l'acide tartrique (C₄H₆O₆) ou le tartrate de sodium et de potassium (C₄H₄KNaO₆), le peroxyde d'hydrogène (H₂O₂) et un acide inorganique tel que l'acide chlorhydrique (HCl) [Buglass86, Gomez89, Dier04] ou l'acide fluorhydrique (HF) [Berishev95, Gladkov95]. On retiendra les travaux de J.G Buglass [Buglass86] et O. Dier [Dier04] qui ont obtenu d'excellents résultats en termes de morphologie des surfaces gravées et des vitesses de gravure de l'ordre de 0,5 à 1 µm/min avec un mélange C₄H₄KNaO₆:H₂O₂:HCl:H₂O. D'après l'étude expérimentale de P.S Gladkov [Gladkov95], qui remplace le tartrate de potassium et de sodium par l'acide tartrique et l'acide chlorhydrique par l'acide fluorhydrique, le mécanisme réactionnel dominant de la gravure se décompose en deux étapes :

- oxydation du GaSb selon la réaction,



- dissolution des oxydes avec formation d'un complexe de tartrate d'antimoine et transformation du Ga₂O₃ en ions GaF₂⁺,



Une des difficultés rencontrées dans la gravure chimique de GaSb concerne la formation d'un film jaunâtre sur la surface. Ce film est le résultat de l'oxydation de l'antimoine sous sa forme pentavalente Sb₂O₅, connue pour être insoluble dans les acides ou les solutions alcalines [Buglass86]. De ce point de vue, les surfaces de GaSb gravées par la solution proposée par Gladkov se sont révélées exemptes d'oxyde Sb₂O₅. Ceci s'explique par le fait que l'acide tartrique favorise la formation des complexes de tartrate d'antimoine à partir de l'oxyde Sb₂O₃ (équation (3.2)) qui sont dissouts de la surface avant que Sb₂O₃ ne soit oxydé en composé Sb⁵⁺ [Liu03].

Nos premiers essais de gravure de GaInSb utilisent la solution proposée par Dier (C₄H₆O₆:H₂O₂:HCl:H₂O (15g:14ml:160ml:200ml)), très concentrée en HCl [Dier04]. Ils aboutissent à des vitesses de gravure élevées (~ 2 µm/min) et à des morphologies de surface très dégradées avec une forte rugosité. En outre, on observe l'apparition d'une couche superficielle marron, également observée dans [Berishev95] et attribuée à la formation d'îlots d'oxyde insoluble. Pour tenter de réduire la vitesse de gravure et d'améliorer la morphologie après gravure, nous avons poursuivi nos investigations en diminuant les concentrations des différents constituants de cette même solution d'attaque. A l'inverse des résultats reportés

dans la littérature pour GaSb, l'ensemble des essais réalisés (avec ou sans agitation) a révélé un manque d'uniformité de la gravure sur GaInSb. Néanmoins, pour une meilleure analyse des phénomènes, l'influence de la concentration en HCl et en H₂O₂ a été étudiée et les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 3.5.

Les études menées par Buglass [Buglass86] révèlent un comportement similaire à celui observé sur la Figure 3.5.a : la vitesse de gravure est importante pour les faibles volumes d'HCl (~ 4000 Å/min pour 1 ml de HCl) et diminue progressivement (jusqu'à une vitesse de l'ordre de 1500 Å/min) malgré l'augmentation de la concentration en HCl. Buglass attribue cette décroissance à l'augmentation de la concentration en ions Cl⁻ qui viennent perturber la diffusion des autres espèces de la solution [Buglass86]. Par ailleurs, on remarque que la rugosité des couches gravées diminue quand le volume d'HCl augmente. Ceci est dû au fait que pour les faibles concentrations en HCl, la vitesse de dissolution de l'oxyde est plus lente que sa vitesse de formation. Ce phénomène est à l'origine de la forte rugosité de surface observée [Liu03]. L'ajout d'HCl favorise la dissolution de l'oxyde et entraîne, par voie de conséquence, une réduction de la rugosité. La Figure 3.5.b. illustre, quant à elle, l'évolution de la vitesse de gravure du GaInSb en fonction de la concentration en peroxyde d'hydrogène. La dépendance quasi-linéaire indique que la vitesse de gravure dans cette solution d'attaque est largement contrôlée par le processus d'oxydation.

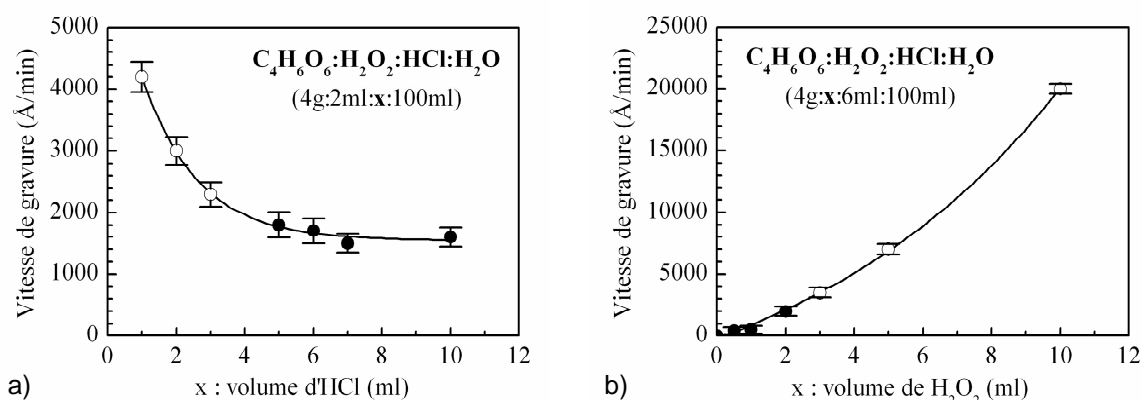


Figure 3.5 : Influence de la concentration en a) HCl et b) H₂O₂ d'une solution C₄H₆O₆:H₂O₂:HCl:H₂O sur la vitesse de gravure du GaInSb non intentionnellement dopé (○) indique la formation d'une couche superficielle foncée et très rugueuse

La modification des concentrations respectives des différents constituants de la solution C₄H₆O₆:H₂O₂:HCl:H₂O a permis de répondre à nos exigences en termes de vitesse de gravure (< 1000 Å/min) et de rugosité des surfaces gravées. Cependant, l'uniformité de gravure n'est pas satisfaisante. Une meilleure uniformité ayant été observée pour des échantillons gravés dans des solutions C₄H₆O₆:H₂O₂:H₂O sans HCl, nous avons poursuivi nos investigations du côté de l'acide tartrique.

3.2.3.B. Etude de la solution $C_4H_6O_6:H_2O_2:H_2O$

Nous étudions dans cette section l'influence de différents paramètres sur la vitesse de gravure du $Ga_{0,65}In_{0,35}Sb$ dans une solution à base d'acide tartrique et de peroxyde d'hydrogène.

3.2.3.B.a. Influence de la concentration en H_2O_2

La Figure 3.6 représente l'évolution de la vitesse de gravure du GaInSb en fonction du volume ajouté de H_2O_2 pour trois concentrations différentes en acide tartrique (0,25 mol/l, 0,5 mol/l et 1mol/l). La vitesse de gravure augmente rapidement jusqu'à $\sim 6000 \text{ \AA}/\text{min}$ pour les faibles concentrations en H_2O_2 ($< 2\text{ml}$ pour 100 ml de solution d'acide tartrique) et présente une chute significative pour les plus fortes concentrations. Cette soudaine diminution, observée quelque soit la concentration en acide tartrique, est l'effet d'une oxydation importante de la surface, inhibant la gravure.

Dans la gamme visée (500-1000 $\text{\AA}/\text{min}$), la vitesse de gravure est extrêmement sensible aux très faibles variations de volume de peroxyde d'hydrogène. Au cours des différentes expérimentations, des problèmes importants de reproductibilité ont été observés et interdisent l'emploi de cette solution pour nos réalisations. Ainsi, pour permettre la gravure du GaInSb de manière contrôlable et reproductible, d'autres expériences ont été menées sur une solution de $C_4H_6O_6:H_2O_2:H_2O$ (4g:5ml:100ml) afin d'augmenter sa vitesse d'attaque qui est insuffisante ($< 200 \text{ \AA}/\text{min}$) à température ambiante.

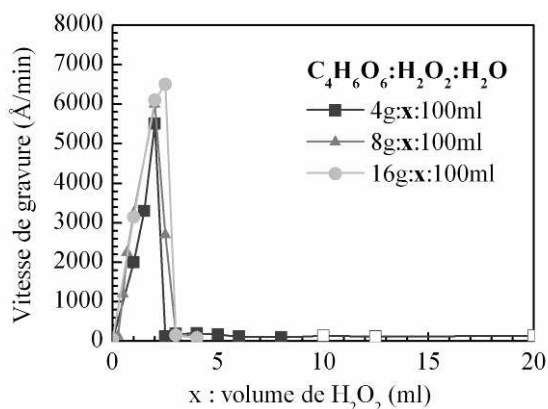


Figure 3.6 : Vitesses de gravure de GaInSb non intentionnellement dopé (n.i.d.) en fonction de la concentration en H_2O_2 de solutions $C_4H_6O_6:H_2O_2:H_2O$ (\square) indique la formation d'une couche superficielle foncée

3.2.3.B.b. Influence de la température

L'influence de la température de la solution $C_4H_6O_6:H_2O_2:H_2O$ (4g:5ml:100ml) sur la vitesse de gravure de GaInSb a donc été évaluée et les résultats sont présentés sur la Figure 3.7. La réaction chimique est thermiquement activée et suit une loi d'Arrhénius donnée par [Lothian92]:

$$V = C \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (3.4)$$

où V est la vitesse de gravure, C est une constante et E_a représente l'énergie d'activation.

A partir de cette caractéristique, une énergie d'activation de 18,3 kCal/mol a été calculée (Figure 3.7.b), ce qui est cohérent avec un mécanisme de gravure limité par la cinétique de réaction ; des énergies d'activation plus faibles (< 7 kCal/mol) étant attendues pour des gravures limitées par la diffusion [Tuck75]. Les gravures limitées par la cinétique de réaction sont caractérisées par une évolution linéaire de l'épaisseur gravée par rapport au temps et sont peu sensibles à l'agitation. En outre, on observe sur la Figure 3.7.a que l'évolution de la vitesse de gravure de 500 à 2000 Å/min s'effectue sur une large gamme de température (entre 30 et 50°C). Toutes ces considérations sont favorables à un bon contrôle et à une bonne reproductibilité de la gravure.

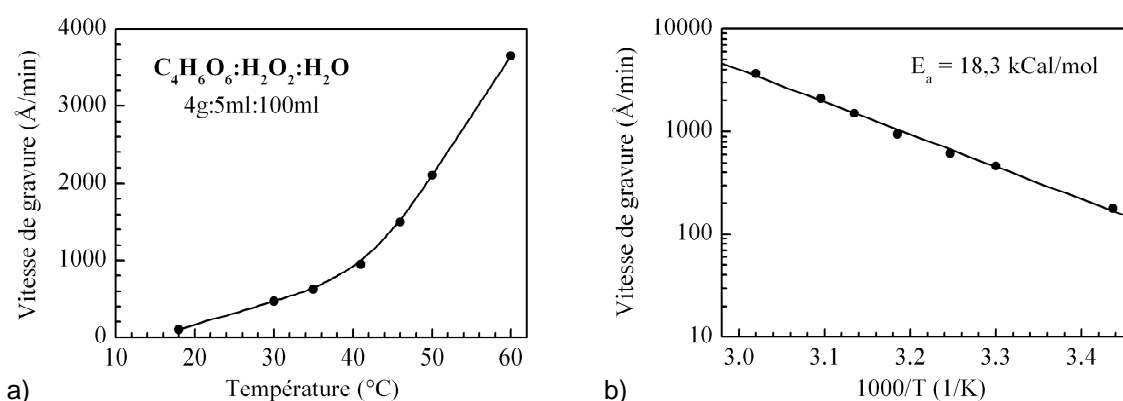


Figure 3.7 : a) Evolution en fonction de la température et b) tracé d'Arrhénius de la vitesse de gravure de GaInSb n.i.d. dans une solution $C_4H_6O_6:H_2O_2:H_2O$ (4g:5ml:100ml)

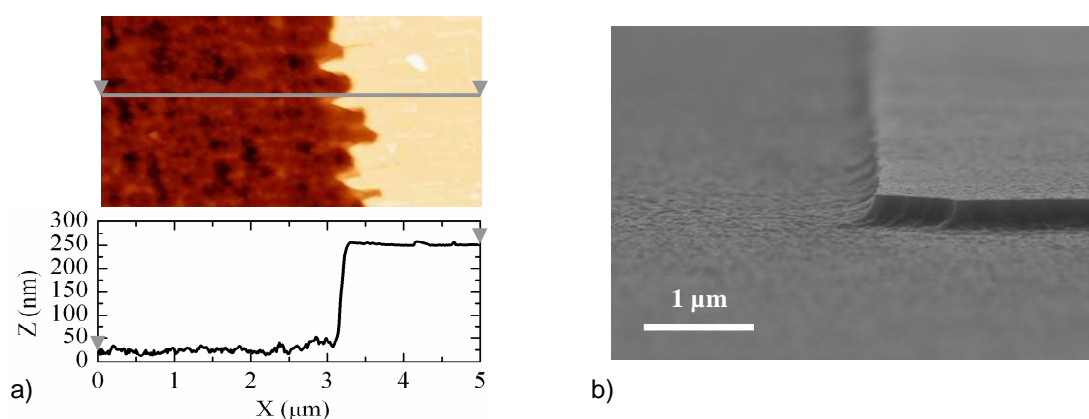


Figure 3.8 : Observations a) par AFM (surface de $2,5 \times 5 \mu m^2$) et b) au MEB d'un mesa GaInSb après 3 minutes de gravure dans $C_4H_6O_6:H_2O_2:H_2O$ (4g:5ml:100ml) à 40°C

Les images de la Figure 3.8 ont été réalisées après gravure d'un mesa de $Ga_{0,65}In_{0,35}Sb$ dans la solution d'acide tartrique chauffée à 40°C. L'état de surface après gravure est typique des

résultats obtenus pour la gamme de températures 30-60°C et montre une augmentation de rugosité convenable avec un rms résultant de l'ordre de 10 nm, légèrement supérieur à la rugosité nominale (~ 5 nm).

3.2.3.B.c. Influence du dopage

On étudie enfin l'influence du dopage du $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$ sur la vitesse de gravure dans la solution d'acide tartrique précédente chauffée à 40°C. Alors que l'influence du dopage Te est quasi-inexistante (~ 850 Å/min pour un dopage Te de $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), nous observons une influence notable du dopage C sur la vitesse de gravure de GaInSb comme le montre la Figure 3.9. Cet effet déjà observé dans le cas de la gravure du GaAs [Baca05] est relié à une modification du potentiel électrochimique de la surface plongée dans la solution d'attaque.

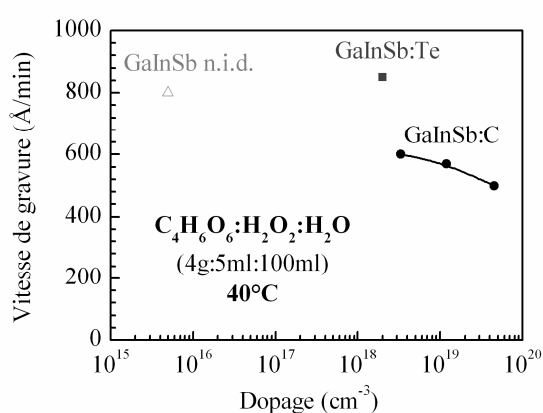


Figure 3.9 : Influence du dopage sur la vitesse de gravure de $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$ par une solution $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ (4g:5ml:100ml) à 40°C

3.2.3.C. Conclusion

Cette étude sur la gravure chimique du composé $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$ a montré qu'une attaque à base d'une solution $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ (4g:5ml:100ml) chauffée est appropriée pour la gravure des couches de contact et de la couche de base de nos structures TBH. Des vitesses de gravure maîtrisables ont été obtenues et les résultats en termes de morphologie sont corrects.

3.2.4. Gravure du mesa d'émetteur

L'émetteur de nos structures TBH est constitué de la superposition de deux couches : l'une en $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$ (la couche de contact) et l'autre en $\text{Al}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Sb}$ ou $\text{Al}_{0,33}\text{In}_{0,67}\text{As}_{0,31}\text{Sb}_{0,69}$ (la couche d'émetteur). Comme nous le verrons par la suite, les deux matériaux d'émetteur (AlInSb et AlInAsSb) révèlent des différences de comportements vis-à-vis des solutions de gravure étudiées. Nous distinguons donc dans cette section les deux cas et détaillons pour chacun les solutions identifiées pour la gravure du mesa d'émetteur.

3.2.4.A. Cas d'un émetteur AlInSb (Structures S090114 et S090413)

3.2.4.A.a. Sélectivité de gravure GaInSb /AlInSb

La gravure de la couche de contact d'émetteur en GaInSb peut être réalisée par gravure non sélective par rapport au matériau d'émetteur. Néanmoins, l'obtention d'une sélectivité de gravure entre ces deux matériaux favorise un meilleur contrôle et une bonne reproductibilité de l'étape de formation du mesa d'émetteur.

Nous vérifions dans cette section s'il existe une sélectivité de gravure entre une couche d'émetteur en $\text{Al}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Sb}$ et la couche de contact en $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$ lorsque cette dernière est gravée dans la solution $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ (4g:5ml:100ml) développée au paragraphe précédent. Nous nous intéressons pour cela à la vitesse de gravure de l' $\text{Al}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Sb}$ dans cette solution chauffée à différentes températures. Tout comme pour GaInSb, la gravure d'AlInSb dans la solution $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ (4g:5ml:100ml) est activée thermiquement mais la vitesse d'attaque reste inférieure à 250 Å/min sur toute la gamme de température. La valeur de l'énergie d'activation E_a a été évaluée à 17,5 kcal/mol (équation (3.4)) ce qui atteste d'un mécanisme de gravure limité par la cinétique de réaction. La sélectivité de gravure $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}/\text{Al}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Sb}$ est donnée Figure 3.10.a en fonction de la température de la solution. On note qu'elle augmente avec la température jusqu'à une valeur maximale de 14 à 60°C. La Figure 3.10.b. présente une image par AFM d'un mesa d'AlInSb gravé dans la solution à 40°C pendant 2 minutes. Les rugosités de surface avant et après gravure sont similaires avec une légère augmentation du rms de 3,4 à 3,7 nm.

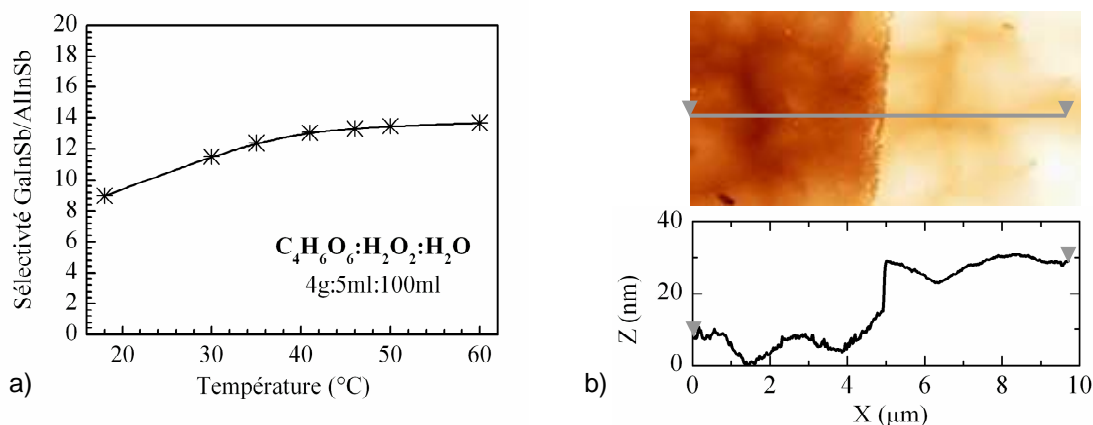


Figure 3.10 : a) Sélectivité de gravure de $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$ par rapport à $\text{Al}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Sb}$ en fonction de la température dans la solution $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ (4g:5ml:100ml),
 b) observation par AFM (surface de $5 \times 10 \mu\text{m}^2$) d'un mesa AlInSb après 2 minutes de gravure par cette solution chauffée à 40°C

En définitive, la solution $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ (4g:5ml:100ml) chauffée (30-50°C) s'avère très bien adaptée à la gravure sélective de la couche de contact d'émetteur en $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$ par

rapport à un émetteur en $\text{Al}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Sb}$ (structures S090114 et S090413) grâce à des vitesses de gravure contrôlables de l'ordre de 500 à 2000 Å/min et une sélectivité supérieure à 10.

3.2.4.A.b. Etude d'une solution sélective entre AlInSb et GaInSb:C

Ce paragraphe s'intéresse à la gravure d'un émetteur en $\text{Al}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Sb}$ avec pour objectif d'obtenir des vitesses d'attaque maîtrisables et une sélectivité aussi élevée que possible par rapport à la couche de base en $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$ de nos TBH (cf. paragraphe 3.2.1.C).

L'absence de littérature sur la gravure des ternaires antimoniés, et plus particulièrement de l' AlInSb , nous a poussés à étudier les publications qui traitent de la gravure chimique d' AlSb [Morpugo97, Gatzke97]. Les travaux de Morpugo et al. qui font référence à une sélectivité de gravure entre les binaires AlSb et GaSb ont retenu notre attention [Morpugo97]. Néanmoins, la solution de gravure décrite ($\text{HF:H}_2\text{O}$ diluée dans l'éthanol) n'est pas adaptée à la gravure de nos couches : nos différents essais aboutissent à un effet de sur-gravure très prononcé (rapport $b/a > 2$) en bord de masque comme observé sur la Figure 3.11, et ceci quelques soient les proportions utilisées et le degré d'agitation. Cet effet de tranchée qui n'apparaît que lorsque la gravure est limitée par la diffusion est lié à une sur-concentration locale des réactifs.

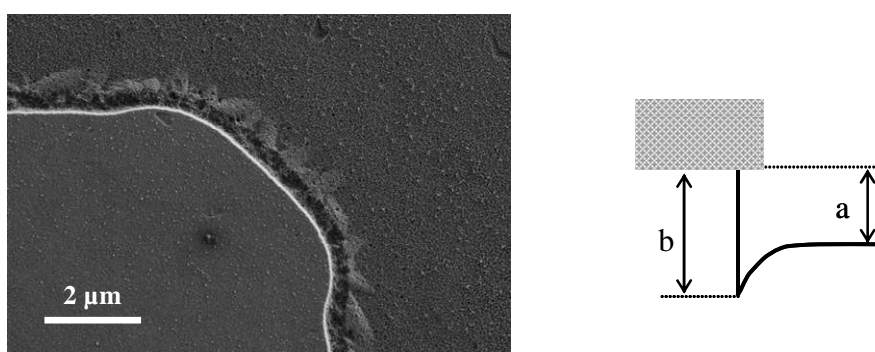


Figure 3.11 : Observation au MEB de l'effet de tranchée après gravure de l' AlInSb (n. i. d.) par une solution ($\text{HF:H}_2\text{O}$):ethanol

Il a été rapporté que les composés III-V tels AlGaAs , AlInAs et AlAsSb contenant de l'aluminium en proportion suffisante sont facilement gravés par des solutions d' HCl dilué [Dumke72, Sauer92, Srnáneek96]. Nous avons donc considéré des solutions d' HCl avec des concentrations de 0,6 à 2,6 mol/l (afin d'éviter toute dégradation du substrat d' InP [Notten84]) pour la gravure sélective des couches en $\text{Al}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Sb}$ par rapport au $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$. Cependant, l' $\text{Al}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Sb}$ présente des vitesses de gravure très lentes de l'ordre de la dizaine d'angström par minute dans ces solutions. L'introduction d'un faible volume d' H_2O_2 a permis d'accélérer l'oxydation du semiconducteur, d'augmenter la vitesse d'attaque de l' AlInSb et d'obtenir une sélectivité de gravure. Ainsi, la Figure 3.12 décrit l'évolution, à température ambiante, de la vitesse de gravure de l' AlInSb et du GaInSb ainsi que de la sélectivité AlInSb/GaInSb en fonction de la concentration en H_2O_2 pour une solution de $\text{HCl:H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$

(20:x:80). On observe une augmentation de la vitesse de gravure des deux matériaux associée à une décroissance de la sélectivité avec la concentration en H_2O_2 . Des vitesses de gravure d'AlInSb contrôlables de l'ordre de 250 à 2000 Å/min et une sélectivité supérieure à 5, adaptées à notre application, ont été obtenues pour les plus faibles volumes en H_2O_2 ($0 < x < 0,5$). Dans cette gamme de concentration, les surfaces gravées d'AlInSb et de GaInSb présentent par ailleurs une très bonne morphologie.

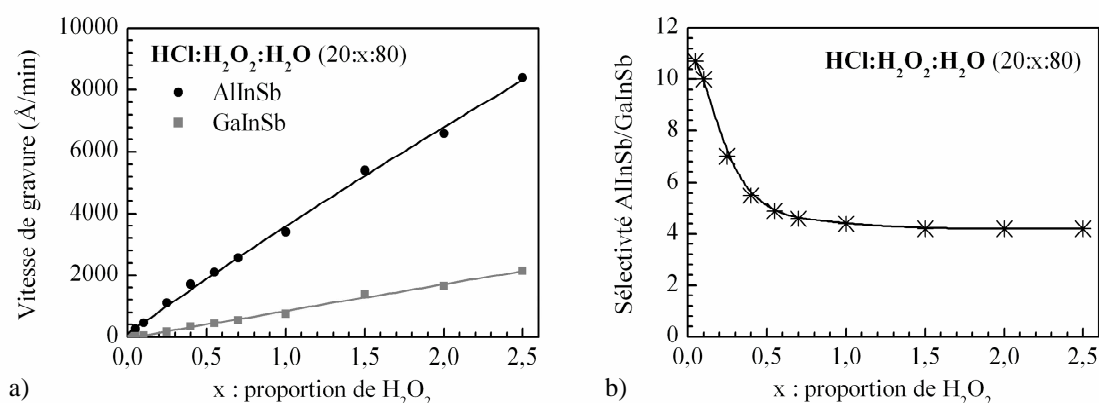


Figure 3.12 : a) Vitesses de gravure de l'AlInSb et du GaInSb et b) sélectivité AlInSb/GaInSb en fonction de la proportion x en H_2O_2 dans une solution de $HCl:H_2O_2:H_2O$ (20:x:80)

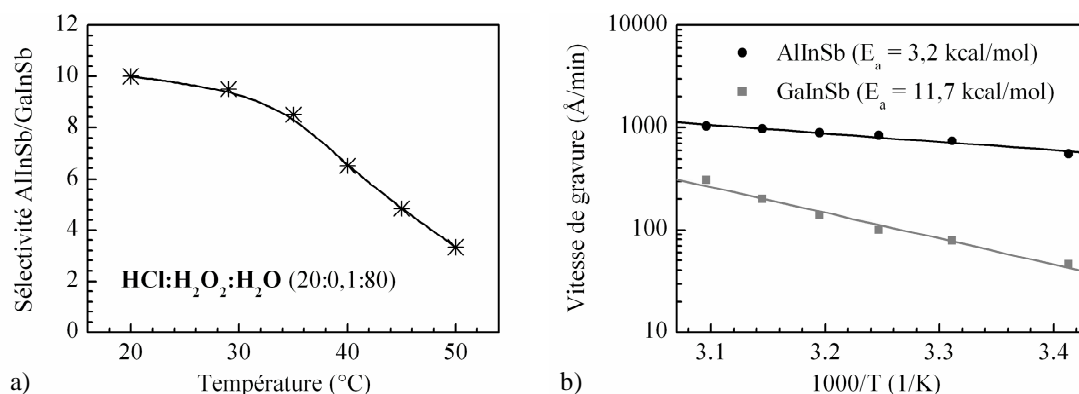


Figure 3.13 : a) Sélectivité AlInSb/GaInSb en fonction de la température et b) tracé d'Arrhenius des vitesses de gravure de l'AlInSb et du GaInSb dans une solution $HCl:H_2O_2:H_2O$ (20:0,1:80)

L'influence de la température d'une solution de $HCl:H_2O:H_2O_2$ (20:80:0,1) sur la sélectivité AlInSb/GaInSb a également été déterminée. Les résultats sont présentés sur la Figure 3.13.a et montrent que l'augmentation de la température ne permet pas d'augmenter la sélectivité de gravure. Les énergies d'activation respectives de l'AlInSb et du GaInSb de 3,2 kcal/mol et 11,7 kcal/mol (Figure 3.13.b.) indiquent que la gravure de l'AlInSb dans cette solution est limitée par la diffusion des réactifs alors que pour la gravure du GaInSb, le mécanisme limitant est la cinétique de réaction.

Pour conclure ce travail, la Figure 3.14 montre la morphologie de bonne qualité de la surface de base, obtenue après gravure du mesa d'émetteur d'une hétérostructure TBH (S090115). La gravure du contact d'émetteur en GaInSb a été réalisée par la solution sélective d'acide tartrique développée au paragraphe précédent ($V_{\text{GaInSb}} = 800 \text{ \AA}/\text{min}$ et $S_{\text{GaInSb/AlInSb}} = 14$) et la gravure de l'émetteur en AlInSb utilise la solution $\text{HCl:H}_2\text{O:H}_2\text{O}_2$ (20:80:0,1) à température ambiante ($V_{\text{AlInSb}} = 450 \text{ \AA}/\text{min}$ et $S_{\text{AlInSb/GaInSb}} = 10$).

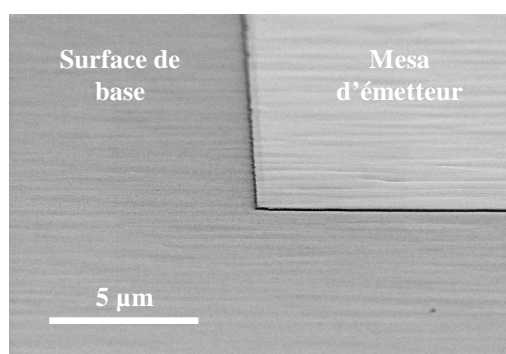


Figure 3.14 : Morphologie de surface après gravure du mesa d'émetteur d'une structure TBH (S090115) par les solutions sélectives $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ (4g:5ml:100ml) à 40°C et $\text{HCl:H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ (20:0,1:80) à température ambiante

3.2.4.B. Cas d'un émetteur AlInAsSb (Structures S090411 et S090412)

Les études de gravures sélectives menées précédemment ne sont pas transposables au cas d'un transistor bipolaire avec émetteur en matériau quaternaire $\text{Al}_{0,33}\text{In}_{0,67}\text{As}_{0,31}\text{Sb}_{0,69}$. En effet, l'incorporation d'éléments As modifie complètement les sélectivités obtenues avec l' $\text{Al}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Sb}$. Ainsi, alors qu'une solution $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ (4g:5ml:100ml) chauffée à 40°C offre une sélectivité $S_{\text{GaInSb/AlInSb}} = 14$, adaptée à la gravure sélective de la couche du contact d'émetteur $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$ par rapport à un émetteur $\text{Al}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Sb}$, elle présente une sélectivité inversée entre AlInAsSb et GaInSb ($S_{\text{AlInAsSb/GaInSb}} \sim 2$) avec une vitesse de gravure de l'alliage quaternaire de l'ordre de $1600 \text{ \AA}/\text{min}$. De même, la solution à base d'acide chlorhydrique ($\text{HCl:H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ (20:0,1:80)) utilisée pour la gravure sélective de l'émetteur en $\text{Al}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Sb}$, n'est pas adaptée à la gravure sélective d'un émetteur en $\text{Al}_{0,33}\text{In}_{0,67}\text{As}_{0,31}\text{Sb}_{0,69}$ par rapport à la couche de base en $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$ (dans cette solution, $V_{\text{AlInAsSb}} \sim V_{\text{GaInSb}}$).

Ces constatations nous ont poussés vers l'étude d'une solution de gravure alternative pour AlInAsSb avec comme objectif principal une sélectivité de gravure $S_{\text{AlInAsSb/GaInSb}} > 5$. Toutefois, les nombreux essais réalisés n'ont pas permis d'atteindre cette exigence. Nous avons entre autre envisagé d'utiliser une solution de gravure comme celle utilisée pour la gravure de couches arséniées à base d'acide phosphorique et de peroxyde d'hydrogène [Zaknourne99]. Cette solution $\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ en proportion en volume 10:0,2:100 permet une vitesse de gravure du quaternaire de l'ordre de $500 \text{ \AA}/\text{min}$ et ne semble pas graver le

GaInSb. Cependant, l'immersion de GaInSb dans cette solution mène à la formation d'une couche marron superficielle et particulièrement rugueuse qui semble être le résultat d'une violente oxydation du matériau. La dilution de la solution $H_3PO_4:H_2O_2:H_2O$ n'a pas permis d'améliorer de manière satisfaisante cette gravure qui semble être soumise à un compromis entre vitesse de gravure du quaternaire (i.e. $S_{AlInAsSb/GaInSb}$) et oxydation néfaste de la surface de base après gravure.

Ainsi, la seule solution qui permet, à notre connaissance, de graver l' $Al_{0,33}In_{0,67}As_{0,31}Sb_{0,69}$ sans dégrader la surface de base extrinsèque par une réaction d'oxydation reste la solution d'acide tartrique chauffée. Cependant, cette solution présente une vitesse de gravure de l' $AlInAsSb$ importante et une faible sélectivité par rapport à la couche de base en $Ga_{0,65}In_{0,35}Sb$, ce qui rend difficile l'arrêt précis sur cette dernière. L'introduction de deux fines couches d'arrêt en $Al_{0,5}In_{0,5}Sb$ adjacentes à l'émetteur en $AlInAsSb$ (comme exposée précédemment dans le paragraphe 2.4.5), est une solution à ce problème. Elles permettent en effet de ralentir et d'homogénéiser la gravure de l'émetteur et introduisent une marge supplémentaire sur le contrôle de la gravure jusqu'à la couche de base. Nous avons donc adopté cette stratégie pour faciliter la réalisation technologique de TBH à simple et double hétérojonction $AlInAsSb/GaInSb$ (structures S090411 et S090412).

3.2.4.C. Sous-gravure d'émetteur

Une technologie avec auto-alignement de la base requiert une sous-gravure de l'émetteur. Néanmoins, la réduction de la surface de l'émetteur a des effets néfastes sur :

- la résistance d'émetteur R_E (la partie sous-gravée sous le contact ne participant plus à la conduction électrique)
- la résistance de base extrinsèque $R_{Baccès}$ (du fait de l'augmentation de la surface de base extrinsèque),

qui pénalisent les performances fréquentielles des transistors. La dimension de la sous-gravure étant indépendante de la dimension du transistor fabriqué, l'augmentation de ces résistances est d'autant plus importante que le transistor est de faible dimension (i.e. la proportion inutilisée de la surface d'émetteur devient plus importante). Ainsi le contrôle de la sous-gravure devient déterminant lorsqu'il s'agit d'atteindre des largeurs d'émetteur inférieures au micron [Nodjiadjim09].

La gravure humide des matériaux III-V n'est pas totalement isotrope et montre des variations de vitesse de gravure selon les directions cristallographiques. Cette caractéristique est peu prononcée dans le cas de nos gravures comme le montre la Figure 3.15. Ceci associé à des vitesses de gravure de 500 à 2000 Å/min permet un bon contrôle de la sous-gravure d'émetteur dont la profondeur est de l'ordre de 60 à 100 nm (équivalente à l'épaisseur gravée).

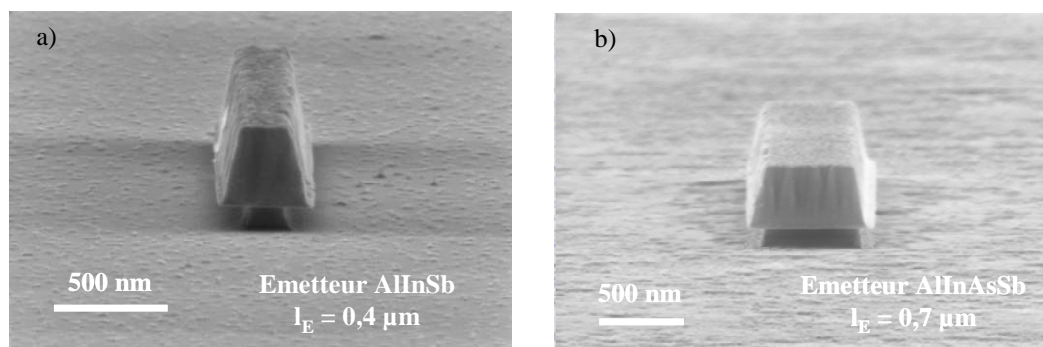


Figure 3.15 : Vues perpendiculaires de la gravure d'un émetteur a) en AlInSb (S090115) et b) en AlInAsSb (S090412)

3.2.5. Conclusion

Le procédé de fabrication d'un TBH nécessite plusieurs étapes de gravure pour la définition des mesa. La gravure chimique par voie humide nous est apparue comme le meilleur moyen d'accéder aux couches actives de nos composants. L'étude de diverses solutions chimiques et l'analyse des mécanismes qui régissent les processus d'attaque des différents matériaux qui composent nos structures, nous ont permis de définir les procédés les mieux adaptés aux TBH à base $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$. Plusieurs solutions de gravure ont été identifiées et sont résumées ici :

- La gravure des couches en $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$ (couches de contact, de base et de collecteur dans le cas des TBSH) est réalisée dans une solution à base d'acide tartrique chauffée qui autorise une gravure lente avec une vitesse de l'ordre de 500 à 800 Å/min en fonction du dopage de la couche.
- La gravure des couches en $\text{Al}_{0,33}\text{In}_{0,67}\text{As}_{0,31}\text{Sb}_{0,69}$ (couches d'émetteur et de collecteur dans le cas des TBDH) est réalisée dans la même solution d'acide tartrique. Le manque de sélectivité entre $\text{Al}_{0,33}\text{In}_{0,67}\text{As}_{0,31}\text{Sb}_{0,69}$ et $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$ a rendu nécessaire l'introduction de couches d'arrêt en $\text{Al}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Sb}$ adjacentes à l'émetteur afin d'améliorer le contrôle de la gravure lors de la formation du mesa d'émetteur.
- La gravure de la couche d'émetteur en $\text{Al}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Sb}$ utilise une solution $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ qui offre une vitesse de gravure de 450 Å/min et une sélectivité de près de 10 par rapport à la couche de base en $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$

3.3. Optimisation des contacts ohmiques

La réalisation des électrodes de contact sur les zones actives est une étape critique de tout procédé de fabrication de composants. L'interface semiconducteur/métal est en effet le siège d'une résistance électrique, proportionnelle à la résistivité de contact ρ_c , qu'il convient généralement de minimiser pour accroître les performances des dispositifs. Dans le cas des TBH, ces résistances de contact contribuent aux résistances totales d'émetteur, de base et de

collecteur comme le rappelle la Figure 1.22. Leur réduction est donc essentielle et agit sur les performances des transistors par l'intermédiaire de deux mécanismes distincts :

- D'une part, la réduction des résistances de contact d'émetteur R_{Ec} et de collecteur R_{Cc} entraîne une augmentation de la fréquence de coupure via la diminution des temps de charge $R_E C_{BC}$ et $R_C C_{BC}$:

$$\frac{1}{2\pi f_T} = \tau_B + \tau_C + r_E(C_{BE} + C_{BC}) + C_{BC}(R_E + R_C) \quad (3.5)$$

Il est important de souligner qu'en raison des tailles relatives des contacts ohmiques d'émetteur et de collecteur, la résistance de collecteur est en général quatre à dix fois plus faible que la résistance d'émetteur [Rodwell01]. Ceci implique que c'est le temps de charge $R_E C_{BC}$ qui est le plus critique. Notons enfin que la diminution de R_{Ec} s'avère d'autant plus importante que la résistance d'émetteur est largement dominée par le contact métal/semiconducteur, avec une faible contribution du mesa d'émetteur malgré sa grande épaisseur nécessaire à l'auto-alignement du contact de base [Griffith05].

- D'autre part, minimiser la résistance de contact de base R_{Bc} induit une réduction de R_B et par conséquent une augmentation de la fréquence maximale d'oscillation :

$$f_{MAX} = \sqrt{\frac{f_T}{8\pi R_B C_{BC}}} \quad (3.6)$$

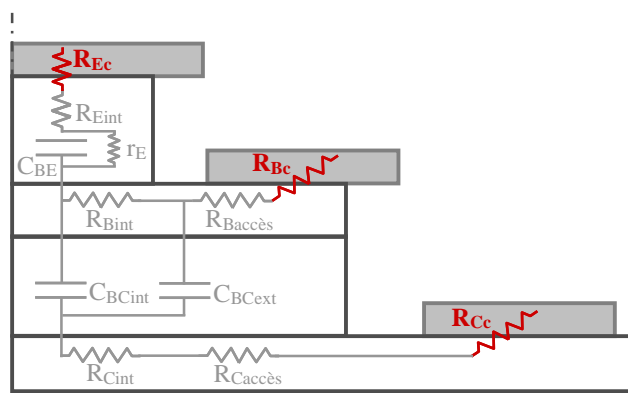


Figure 3.16 : Origine des éléments parasites dans un TBH (demi-coupe latérale)

Après un bref rappel théorique sur le mécanisme de fonctionnement du contact ohmique et la méthode de caractérisation utilisée, nous présentons dans ce qui suit l'étude menée dans le but d'obtenir des contacts ohmiques de bonne qualité sur les couches GaInSb de contact de nos structures TBH.

3.3.1. Mécanisme du contact ohmique

Un contact métal/semiconducteur est dit ohmique lorsqu'il existe une relation linéaire entre la chute de tension V à ses bornes et le courant I qui le traverse. Le coefficient de proportionnalité R_C est appelé résistance de contact.

Le produit de R_C par la surface de contact détermine la résistance spécifique de contact ρ_C dont l'expression est donnée par :

$$\rho_C = \left(\frac{\partial V}{\partial J} \right)_{V \rightarrow 0} \quad (3.7)$$

On considère généralement qu'un contact ohmique est de bonne qualité quand ρ_C est inférieur à $10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$.

Dans un contact métal/semiconducteur, trois mécanismes principaux gouvernent le passage du courant comme décrit sur la Figure 3.17 : l'émission thermoïonique, le passage par effet tunnel assisté thermiquement ou l'effet tunnel pur. L'importance relative de ces phénomènes peut être déterminée à partir d'un terme E_{00} appelé paramètre tunnel et donné par [Shen92] :

$$E_{00} = \frac{qh}{4\pi} \sqrt{\frac{N}{\epsilon m^*}} \quad (3.8)$$

où q est la charge électronique, h la constante de Planck, ϵ la constante diélectrique du matériau, N le dopage et m^* la masse effective des porteurs.

Lorsque $E_{00} \ll kT$ (i.e. pour les faibles niveaux de dopage : $N \leq 1.10^{17} \text{ cm}^{-3}$), le courant à travers la jonction métal/semiconducteur est, sous faible polarisation, de nature thermoïonique (Figure 3.17.a). La large zone de déplétion rend difficile le passage des porteurs par effet tunnel. Les porteurs ne passent par-dessus la barrière de potentiel que si la hauteur de barrière est faible ou si leur activation thermique est suffisante. En revanche, pour les très faibles dopages ou lorsque la hauteur de barrière est très grande, la majorité des porteurs ne peut franchir la barrière ce qui mène à un comportement non-ohmique du contact. Pour un mode de conduction dominant de type émission thermoïonique, la résistance spécifique est proportionnelle à [Sze06]:

$$\rho_C \propto \exp\left(\frac{q\phi_B}{kT}\right) \quad (3.9)$$

et est clairement dépendante de la hauteur de barrière Φ_B et de la température T .

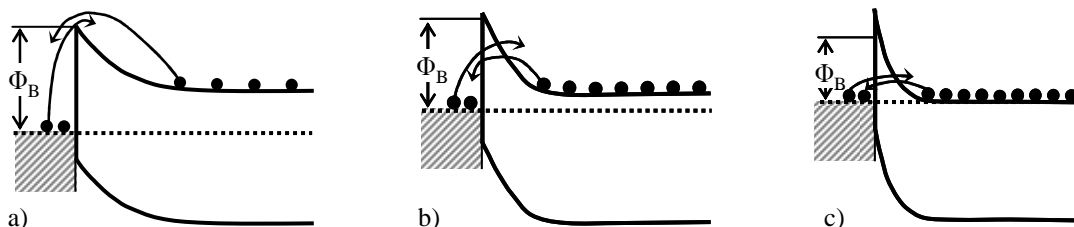


Figure 3.17 : Modes de conduction dans les contacts métal/semiconducteur

(cas d'un semiconducteur de type n)

a) émission thermoïonique, b) effet tunnel assisté thermiquement, c) effet tunnel

Lorsque $E_{00} \gg kT$ (i.e. pour les dopages suffisamment élevés : $N \geq 1.10^{18} \text{ cm}^{-3}$), la zone de déplétion est étroite et la probabilité de passage par effet tunnel pur n'est plus négligeable (Figure 3.17.c) : le mode de conduction prédominant est donc l'effet tunnel. Dans ce cas, la résistance spécifique de contact ρ_C dépend fortement de la concentration en dopants, et est proportionnelle à [Sze06] :

$$\rho_C \propto \exp\left(\frac{q\phi_B}{E_{00}}\right) \quad (3.10)$$

Lorsque $E_{00} \approx kT$ (i.e. pour les dopages intermédiaires : $1.10^{17} < N < 1.10^{18} \text{ cm}^{-3}$), une partie des électrons traversent le haut de la barrière par effet tunnel (Figure 3.17.b). Les mécanismes émission thermoïonique et tunnel coexistent avec une résistance ρ_C qui dépend à la fois de la température et du dopage N par l'intermédiaire de E_{00} [Sze06] :

$$\rho_C \propto \exp\left[\frac{q\phi_B}{E_{00} \coth\left(\frac{E_{00}}{kT}\right)}\right] \quad (3.11)$$

Ainsi, ce sont les caractéristiques de la barrière (hauteur, largeur...) qui vont déterminer les phénomènes de transport à l'interface métal/semiconducteur. Pour obtenir un contact ohmique de faible résistivité, il est nécessaire d'utiliser un semiconducteur :

- de faible énergie de bande interdite pour minimiser la hauteur de barrière,
- fortement dopé pour réduire la largeur de la barrière de potentiel et favoriser le passage des porteurs par effet tunnel.

En l'absence d'états d'interfaces, la hauteur de la barrière de potentiel observée par les électrons Φ_{Bn} et par les trous Φ_{Bp} est donnée par la différence entre le travail de sortie du métal Φ_M et l'affinité électronique du porteur dans le semiconducteur telle que :

$$q\phi_{Bn} = q\phi_M - q\chi_{SC} \quad (3.12)$$

$$q\phi_{Bp} = E_g + q\chi_{SC} - q\phi_M \quad (3.13)$$

où χ_{SC} est l'affinité électronique de l'électron dans le semiconducteur et E_g la largeur de bande interdite du semi-conducteur. Dans ce cas idéal, le choix d'un métal dont le travail de sortie minimise la hauteur de barrière s'avère donc primordial pour l'obtention d'un contact ohmique de bonne qualité.

Toutefois, l'existence d'états d'interface au contact entre le métal et le semiconducteur peut avoir un rôle non négligeable sur le profil de potentiel et donc la hauteur de barrière. En effet, en dehors de l'ultravide, la surface d'un semiconducteur est immédiatement polluée par l'adsorption d'atomes étrangers, comme l'oxygène qui entraîne une oxydation de la surface. La présence de ces atomes étrangers associée à la différence de paramètre de maille entre le

semiconducteur et son oxyde crée des états électroniques en surface différents de ceux du volume. Si les niveaux d'énergie introduits sont situés dans le gap du semiconducteur et si leur densité est suffisamment élevée, la courbure de bande est modifiée à la surface du semiconducteur et il se produit ce qu'on appelle l'ancrage du niveau de Fermi (*Fermi level pinning*) par les états de surface [Mathieu04] : après la mise en contact du métal et du semiconducteur, le niveau de Fermi du semiconducteur reste quasiment dans la même position. Dans cette configuration, la hauteur de barrière est donc largement déterminée par les états de surface et devient peu dépendante du métal utilisé [Bardeen47].

Nous venons de définir les paramètres qui peuvent être utilisés dans l'optimisation du contact ohmique que l'on souhaite très peu résistif. A ces considérations, il convient d'ajouter des critères qui tiennent compte de l'utilisation des TBH. Le contact métallique utilisé doit présenter :

- une bonne stabilité thermique afin d'éviter toute dégradation lors de traitements thermiques associés au procédé technologique ou lors de l'auto-échauffement en cours d'utilisation,
- une bonne définition et un bon état de surface pour éviter les court-circuits avec les zones actives voisines,
- une bonne adhérence afin de supporter des contraintes mécaniques,
- une bonne uniformité des résistivités sur l'échantillon et une bonne reproductibilité.

3.3.2. Caractérisation de la résistivité de contact par mesures TLM

La résistivité spécifique d'un contact ohmique peut être déterminée par la mesure dite TLM (Transmission Line Method) [Berger72]. Cette technique étant largement répandue, nous n'en rappelons ici que le principe de base.

La méthode TLM nécessite la réalisation de motifs d'échelle de résistance, i.e. une série de contacts métalliques espacés par des intervalles croissants (Figure 3.18.a) et consiste à mesurer la résistance pour chaque couple de contacts voisins. Les mesures de résistances sont effectuées par la méthode des « 4 pointes » (Figure 3.18.a) qui permet de s'affranchir des résistances externes (pointes, circuit).

La résistance entre deux contacts de longueur d et de largeur W séparés par une distance variable L (Figure 3.18.a) vérifie la loi :

$$R(L) = 2R_C + R_{\square} \frac{L}{W} \quad (3.14)$$

où R_C est la résistance de contact entre le métal et le semiconducteur et R_{\square} est la résistance de couche du semiconducteur. Notons qu'on néglige ici la résistance du métal et qu'on suppose que la résistance de couche du semiconducteur est la même entre les contacts et sous les

contacts. Cette dernière approximation est acceptable dans le cas de contacts non-alliés pour lesquels la diffusion sous les contacts est faible.

La régression linéaire de la résistance mesurée en fonction de la distance inter-électrodes nous renseigne donc sur R_{\square} à partir de la pente de la droite et R_C à partir de l'ordonnée à l'origine, comme représenté sur la Figure 3.18.b. L'extrapolation de la distance L pour une valeur de résistance nulle permet d'extraire la longueur de transfert L_T . Cette longueur caractéristique correspond à la distance sur laquelle se produit le transfert entre le plot métallique et le semiconducteur d'une proportion $1/e$ du courant total. Elle varie en principe d'une fraction de μm à quelques μm .

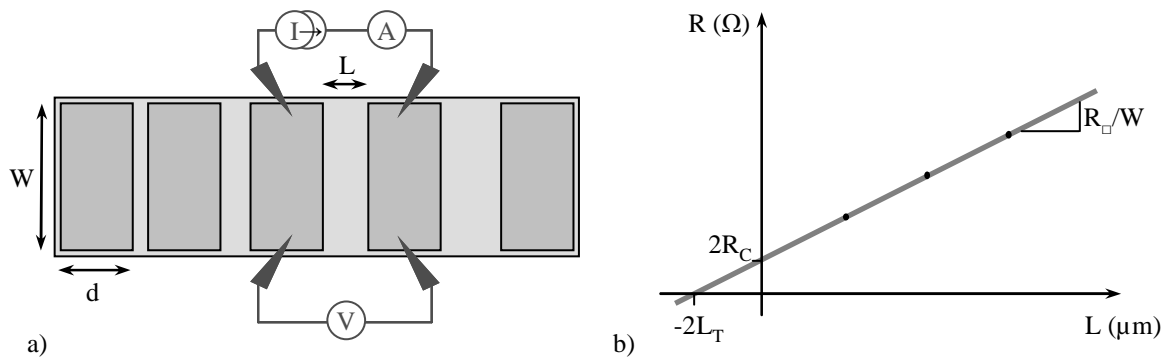


Figure 3.18 : Extraction de la résistivité spécifique de contact et de la résistance de couche par TLM - a) Structure TLM et mesure 4 points, b) Résistance en fonction de la longueur inter-électrodes

La résistance de contact R_C est donnée par :

$$R_C = \frac{\sqrt{R_{\square}\rho_C}}{W} \coth \frac{d}{L_T} \quad (3.15)$$

En faisant l'hypothèse que la largeur du contact d est très grande par rapport à la longueur de transfert L_T , on obtient des relations simples entre R_{\square} , ρ_C et L_T [Reeves82].

La résistance de contact R_C devient :

$$R_C = \frac{\sqrt{R_{\square}\rho_C}}{W} = \frac{R_{\square}L_T}{W} \quad (3.16)$$

et la résistivité spécifique de contact est reliée à L_T par l'expression :

$$\rho_C = L_T^2 R_{\square} \quad (3.17)$$

3.3.3. Etat de l'art du contact ohmique sur Ga(In)Sb

On a vu que la résistance des contacts ohmiques limite les performances des composants. Il est donc primordial d'étudier l'influence de divers facteurs liés aux séquences de métallisation utilisées mais aussi à leur mise en œuvre technologique (traitement de surface, technique de dépôt, température et durée de recuit...). Ce type d'études étant disponible dans la littérature

pour p-GaSb, p-GaInSb et n-GaSb, nous présentons dans cette section les principaux résultats obtenus afin d'orienter notre étude d'optimisation de contact ohmique sur GaInSb.

3.3.3.A. Contact ohmique sur p-GaSb et p-GaInSb

Des études sur la formation de contacts ohmiques sur p-GaSb ont été menées par plusieurs auteurs à partir du milieu des années 1990. Il apparaît que des contacts ohmiques de type p de faibles résistivités sont aisément obtenus sur GaSb du fait de l'ancrage du niveau de Fermi proche du haut de la bande de valence [Dutta97]. Ainsi, des résistivités spécifiques de contact inférieures à $10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$ ont été rapportées par Tadayon et al. pour de simples contacts Au/p-GaSb recuits 60 s à 200°C. [Tadayon95]. Ces contacts maintiennent une faible résistance après vieillissement pendant 10 h à 100°C mais sont néanmoins fortement dégradés après un recuit de 1 min à 250°C. Ces résultats sont en accord avec les travaux de Piotrowska et al. qui rapportent une faible stabilité thermique du système Au/p-GaSb [Piotrowska95] avec des processus de diffusion qui se révèlent très profonds sur des distances de 100 nm après recuit de 3 min à 180°C et jusqu'à 750 nm à 300°C. Milnes et al. rendent compte d'une meilleure stabilité des performances électriques des contacts à base d'Ag par rapport aux contacts à base d'Au. Leurs contacts ohmiques Ag/p-GaSb présentent en effet une résistivité spécifique de contact de $5 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$, non dégradée après vieillissement pendant 30 h à 350°C [Milnes94]. On retiendra également les travaux de Vogt et al. qui étudient le comportement de contacts non-alliés. Ainsi, la séquence Ti/Pt/Au atteint une résistivité de contact honorable de $5,8 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$, stable jusqu'à 450°C [Vogt96]. Les auteurs observent en effet une forte augmentation de la résistivité de contact après un recuit de 90 s à cette température. Néanmoins, l'analyse par microscopie électronique en transmission d'un contact recuit à 200°C pendant 2 h révèle une interface Ti-GaSb rugueuse et donc peu favorable à la formation de contacts ohmiques peu profonds. Des contacts Pd/Au sont également étudiés par ce même groupe et des résistivités spécifiques de contact de l'ordre de $2,9 \cdot 10^{-7} - 3 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ sont obtenues [Vogt99]. Malheureusement, la stabilité thermique de ce contact n'est pas discutée.

L'importance du traitement de surface avant dépôt des contacts métalliques a également été illustrée par les travaux de Tadayon et al. qui signalent une amélioration de la résistivité de contact après désoxydations successives dans des solutions HCl:H₂O (1:1) et BOE²:H₂O (1:1) par rapport à un traitement qui utilise de l'acide sulfurique (H₂SO₄) [Tadayon95].

Ce n'est que récemment que des études de contacts ohmiques sur p-Ga_{0,73}In_{0,27}Sb sont apparues dans la littérature. Les travaux de Wang et al. étudient la stabilité thermique de contacts à base du matériau réfractaire W déposés par pulvérisation ainsi que l'influence de la préparation de surface et notamment, l'effet d'une passivation de la surface avant dépôt des

² Le BOE (Buffered Oxide Etch) est une solution d'acide fluorhydrique (HF) tamponnée par du fluorure d'ammonium (NH₄F).

contacts par une solution de sulfure d’ammonium ((NH₄)₂S) [Wang03, Wang04a, Wang05]. Une faible résistivité spécifique de contact $< 3.10^{-7} \Omega.cm^2$ est atteinte avec une métallisation Pd/W/Au (2/50/145 nm) après désoxydation HCl et passivation à l’aide de la solution (NH₄)₂S [Wang04a]. D’autres travaux ont été menés avec une métallisation plus conventionnelle Pd/Pt/Au [Champlain06]. Les résistivités spécifiques obtenues sont inférieures à $1.10^{-7} \Omega.cm^2$ sur une couche fortement dopée p de Ga_{0,73}In_{0,27}Sb.

3.3.3.B. Contact ohmique sur n-GaSb

Tableau 3.1 : Contacts ohmiques sur GaSb de type n.

Métal (Å) ³	Technique de dépôt	Dopage GaSb (cm ⁻³)	Traitement de surface	Traitement thermique	ρ_c ($\Omega.cm^2$)
[Yang96] Pd/Te/Pd/In/Au (75/50/75/500/2000)	Evaporation par faisceau d’électrons	Te : 10^{18}	HCl:H ₂ O/BOE:H ₂ O	250°C, 120 s	$< 10^{-6}$
[Varblianska97] Pd/Ge (500/800)	Evaporation par faisceau d’électrons	Te : 8.10^{17}	C ₄ H ₆ O ₆ :HF:H ₂ O ₂	300°C, 30 min	3.10^{-2}
Sb/Pd/Ge (100/500/1250)				300°C, 30 min	$\leq 10^{-2}$
Pd (1000)				350°C, 30 min	$4,5.10^{-3}$
Sb/Pd (120/1000)				300°C, 30 min	$\sim 10^{-4}$
[Vogt98] [Sigmund01] Pd/Ge/Au/Pd/Au (130/400/100/789/577)	Evaporation thermique / faisceau d’électrons	Te : $9,9.10^{17}$	HCl:H ₂ O/HF	300°C, 60 s	$4,2.10^{-5}$
Pd/Ge/Au/Pt/Au (87/560/233/476/1056)				300°C, 45 s	$4,9.10^{-6}$
[Ikossi02] Pd/Ge/Pd/In/Pd	Evaporation par faisceau d’électrons	Te : $5,6.10^{17}$	non précisé	300°C, 60 s	$1,2.10^{-6}$
Pd/Ge/Pd		Te : $1,8.10^{18}$		400°C, 60 s	$3,8.10^{-6}$
[Robinson04] Pd (500)	Evaporation par faisceau d’électrons	Te : 2.10^{18}	HCl:H ₂ O	350°C, 10 min	$4,1.10^{-5}$
Pd/Pt/Au (120/350/600)				350°C, 10 min	$1,7.10^{-5}$
Pd/Ge/Au/Pt/Au (87/560/233/476/1056)				300°C, 45 s	$8,3.10^{-6}$
Pd/In/Pd/Pt/Au (40/403/57/500/1000)				125°C, 120 min + 350°C, 10 min	$2,4.10^{-6}$

Un contact ohmique de type n de faible résistivité est intrinsèquement plus difficile à réaliser sur GaSb du fait de l’ancrage du niveau de Fermi proche du haut de la bande de valence [Dutta97]. Les recherches se sont principalement axées sur des contacts ohmiques alliés qui :

³ Les métaux sont indiqués dans l’ordre de dépôt

- utilisent des dopants tels que Sn, Ge, ou Te dans le contact afin de former, après diffusion et recristallisation, une couche fortement dopée à l'interface métal/semiconducteur [Heinz83, Villemain93, Yang96, Varblianska97, Vogt98, Sigmund01, Ikossi02, Robinson04],
- contiennent de l'Indium pour créer un nouveau composé $Ga_xIn_{1-x}Sb$ de faible largeur de bande interdite à la surface du GaSb et ainsi abaisser la hauteur de barrière à l'interface métal/semiconducteur [Yang96, Ikossi02, Robinson04].

En adoptant ces stratégies, des résistivités spécifiques de contact de l'ordre de $10^{-6} \Omega.cm^2$ ont été obtenues comme indiquées dans le Tableau 3.1 qui établit la liste des principaux résultats rapportés dans la littérature.

3.3.4. Etude d'optimisation des contacts ohmiques sur $Ga_{0,35}In_{0,65}Sb$

Il est nécessaire de distinguer deux types de contacts : les contacts alliés ou diffusants (comme ceux utilisés dans la littérature pour la formation de contacts ohmiques sur n-GaSb) et les contacts non-alliés.

Les contacts ohmiques alliés sont constitués de matériaux qui serviront de dopants et diffuseront lors d'un recuit d'activation. Une phase de recuit est en effet nécessaire afin d'initier des phénomènes d'inter-diffusion relativement complexes qui conduiront, après recristallisation, à la formation de composés constitués d'éléments du métal et du semiconducteur et à l'incorporation des impuretés dopantes. Ce procédé aboutit donc à une couche unique avec une transition progressive entre le métal et le semiconducteur. Les inconvénients liés à cette technique sont qu'elle nécessite un bon contrôle de la réaction métallurgique et de sa profondeur de diffusion ainsi qu'une bonne gestion des morphologies de la zone interfaciale et du contact. Dans le cas des TBH, la diffusion du contact dans la partie active du transistor peut être une cause de dégradation prématurée des composants [Caffin97], voire de dysfonctionnement total (court-circuit de la jonction base-collecteur) [Chor96b].

A l'opposé, les contacts non-alliés ont pour principal inconvénient de devoir être déposés sur une couche fortement dopée puisqu'en l'absence de dopants apportés par la diffusion des métaux du contact, la résistivité spécifique de contact est déterminée par le dopage de la couche semiconductrice. Ce type de contact peut également faire l'objet d'une étape de recuit qui entraîne une faible diffusion du métal et favorise un contact intime entre le métal et le semiconducteur grâce à des réactions en phase solide au niveau de l'interface.

Les couches de contact de nos structures TBH étant suffisamment dopées ($n = 2.10^{18} cm^{-3}$ et $p = 1.10^{19} cm^{-3}$), nous proposons dans cette section de vérifier la faisabilité de contacts ohmiques non-alliés de faible résistivité ($10^{-6} \Omega.cm^2$) sur GaInSb dopé n et p.

Pour ce faire, une étude comparative des performances de contacts à base de titane et de contacts à base de molybdène a été menée. Les séquences de métallisations étudiées sont :

- Ti/Au (200 Å / 2500 Å)
- Ti/Pd/Au (200 Å / 400 Å / 2500 Å)
- Ti/Pt/Au (200 Å / 400 Å / 2500 Å)
- Mo/Au (500 Å / 2500 Å)
- Mo/Pt/Au (250 Å / 400 Å / 2500 Å)
- Pd/Mo/Pt/Au (20 Å / 250 Å / 400 Å / 2500 Å)

Le Tableau 3.2 donne les travaux de sortie des différents métaux utilisés dans cette étude. Le titane est utilisé pour ses bonnes propriétés d'adhérence avec le semiconducteur. Le platine joue un rôle de barrière contre la diffusion d'espèces métalliques lors d'un éventuel recuit thermique ou lors du vieillissement du composant, et en particulier contre la diffusion de l'or. Ce dernier est choisi pour former la partie supérieure des contacts du fait de sa faible résistivité électrique. Le palladium est sélectionné parce qu'il est connu pour pénétrer de fines couches (quelques nm) d'oxyde natif sur GaAs, même à température ambiante [Sands88]. Enfin, l'introduction d'un matériau réfractaire (W) pour assurer la stabilité thermique du contact a été étudiée sur p-GaInSb par Wang et al. [Wang03, Wang04a, Wang05]. Notre choix s'est tourné vers le molybdène qui peut être déposé plus facilement par évaporation que le tungstène. En effet, comme nous le verrons par la suite, tous les métaux sont déposés par évaporation, méthode qui favorise l'obtention de métaux à faibles résistivités et qui est compatible avec la technique du lift-off.

Tableau 3.2 : Travaux de sortie des métaux utilisés [Blank07]

Métal	Travail de sortie (eV)
Au	5,1 - 5,2
Pd	5,17
Pt	5,43 – 5,65
Mo	4,21
Ti	3,83 – 4,33

3.3.4.A. Procédé expérimental

L'étude d'optimisation de contacts ohmiques présentée dans cette section a été réalisée sur une structure TBH épitaxiée par EJM dont les caractéristiques sont détaillées dans le Tableau 3.3.

La fabrication des motifs TLM nécessaires à la caractérisation des contacts ohmiques sur cette structure TBH suit une technologie classique « triple-mesa ». Cette technologie consiste à graver par voie humide la couche de l'émetteur jusqu'à atteindre celle de la base, puis la couche de base jusqu'à atteindre celle du sous-collecteur et enfin la couche de sous-collecteur

pour la réalisation du mesa d'isolation. Les solutions de gravure sélectives utilisées sont celles développées au paragraphe précédent, à savoir, $C_4H_6O_6:H_2O_2:H_2O$ (4g:5ml:100ml) chauffée à 40°C pour la gravure des couches en $Ga_{0,35}In_{0,65}Sb$ (émetteur, base et sous-collecteur) et $HCl:H_2O_2:H_2O$ (20:0,1:80) pour la gravure des couches en $Al_{0,4}In_{0,6}Sb$ (émetteur et collecteur). Il est à noter que des jonctions émetteur-base et base-collecteur de grandes dimensions ($A = 10^4 \mu m^2$) sont fabriquées en même temps que les motifs TLM.

Tableau 3.3 : Caractéristiques de la structure TBH utilisée pour l'optimisation des contacts ohmiques sur $GaInSb$ ($a = 6,3 \text{ \AA}$)

Nature de la couche	Matériaux	Dopage	Epaisseur
Contact d'émetteur	$Ga_{0,35}In_{0,65}Sb$	Te : $2.10^{18} \text{ cm}^{-3}$	400 Å
Emetteur	$Al_{0,4}In_{0,6}Sb$	Te : $1.10^{17} \text{ cm}^{-3}$	400 Å
Base	$Ga_{0,35}In_{0,65}Sb$	C : $4,5.10^{19} \text{ cm}^{-3}$	400 Å
Collecteur	$Al_{0,4}In_{0,6}Sb$	Te : $1.10^{17} \text{ cm}^{-3}$	1500 Å
Sous-collecteur	$Ga_{0,35}In_{0,65}Sb$	Te : $2.10^{18} \text{ cm}^{-3}$	2500 Å
Couche tampon	graduel	non dopé	1,81 μm
Substrat	InP	semi-isolant	350 μm

Les plots de contacts des échelles de résistance et des diodes sont définis par lithographie électronique ou optique et technique du lift-off. Avant le dépôt du contact, un traitement de surface est systématiquement appliqué aux échantillons. Dans le cas des essais des sections 3.3.4.B et 3.3.4.C, ce traitement consiste à graver une fine partie de la surface de l'échantillon par un faisceau d'ions Ar^+ de faible énergie (150 eV) dans le bâti de dépôt (préparation *in situ*). Le nettoyage avec un gaz appartenant à la famille des gaz rares permet de ne pas activer la surface du semiconducteur et donc de la conserver inerte. Les traitements de surface utilisés dans le cadre du paragraphe 3.3.4.D seront précisés ultérieurement. Une fois le traitement de surface réalisé, les empilements métalliques sont déposés simultanément sur les couches de contact d'émetteur, de base et de sous-collecteur dans un bâti d'évaporation par faisceau d'électrons sous vide poussé, avec une vitesse de dépôt de $\sim 1-3 \text{ \AA/s}$. Après lift-off, les dimensions des distances L (4, 5, 6, 7, 8, 10, 15 et 20 μm) entre les contacts des TLM sont mesurées au microscope électronique à balayage afin de s'assurer une bonne précision sur la mesure des résistivités spécifiques de contact par la méthode des 4 pointes. Les expériences de recuits sont effectuées dans un four à recuit rapide (RTA pour *Rapid Thermal Annealing*) sous atmosphère d'azote hydrogénée (95% N_2 + 5 % H_2) à des températures variant de 200 à 350 °C pendant 20 s.

3.3.4.B. Le contact de type n : émetteur et collecteur

L'évolution de la résistance spécifique de contact des dépôts Ti/Au, Ti/Pd/Au, Ti/Pt/Au, Mo/Au, Mo/Pt/Au et Pd/Mo/Pt/Au sur $Ga_{0,35}In_{0,65}Sb$ de type n sont présentés sur la Figure 3.19. Ces résultats sont extraits des mesures TLM réalisées sur la couche de contact d'émetteur dont la surface a été traitée par attaque ionique Ar^+ . Les mesures effectuées sur la couche de sous-collecteur donnent des valeurs similaires et ne sont donc pas présentées ici.

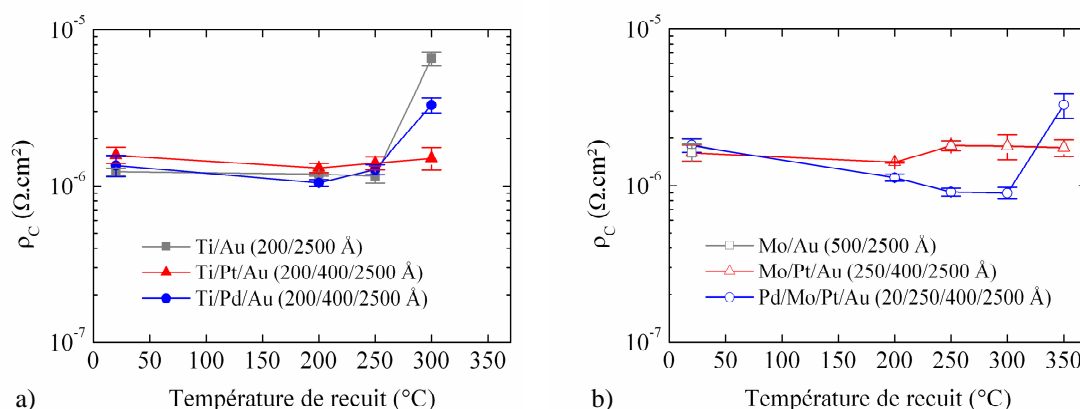


Figure 3.19 : Influence de la température de recuit sur la résistivité spécifique de contact sur la couche de contact d'émetteur $n-Ga_{0,35}In_{0,65}Sb$ ($n = 2 \cdot 10^{18} cm^{-3}$)

a) Contacts à base de Ti, b) Contacts à base de Mo

Avant recuit, toutes les séquences de métallisation présentent des valeurs de résistances spécifiques satisfaisantes dans la gamme $1,2-1,8 \times 10^{-6} \Omega \cdot cm^2$. Cependant, l'application de recuits rapides fait apparaître des différences de comportements en termes de tenue en température et donne un premier aperçu de la stabilité thermique des contacts étudiés.

On s'intéresse tout d'abord aux métallisations à base de Ti dont les performances après recuit sont présentées sur la Figure 3.19.a. Alors que le contact Ti/Pt/Au est stable après recuit à 300 $^{\circ}C$, on assiste à une augmentation de la résistivité des contacts Ti/Au et Ti/Pd/Au, signe d'une dégradation de l'interface métal/semiconducteur. L'augmentation de la température de recuit jusqu'à 350 $^{\circ}C$ conduit au court-circuit des diodes émetteur-base dont les électrodes sont en Ti/Au, Ti/Pd/Au et Ti/Pt/Au, du fait d'une diffusion importante des métallisations comme le montrent les Figures 3.20.a et b ; c'est pourquoi, nous ne présentons pas les valeurs de ρ_c des contacts à base de Ti recuits à $T = 350^{\circ}C$. Il est toutefois à noter que la morphologie du contact Ti/Pt/Au recuit à 350 $^{\circ}C$ est moins dégradée que celles des électrodes Ti/Au et Ti/Pd/Au, avec une diffusion uniquement localisée en bord de contacts qui confirme la supériorité du Pt comme barrière de diffusion.

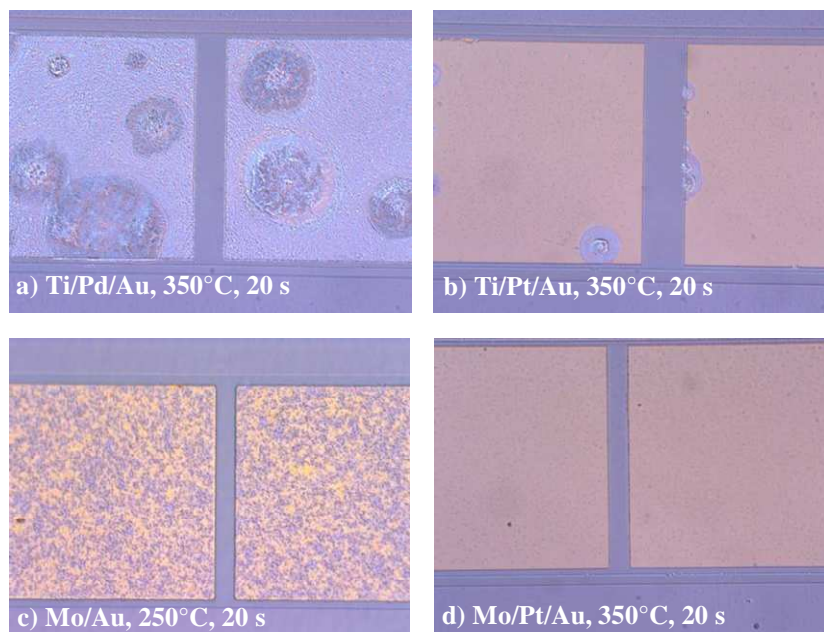


Figure 3.20 : Morphologies des contacts après recuit

Les résistivités spécifiques des contacts Mo/Pt/Au et Pd/Mo/Pt/Au recuits sont présentées sur la Figure 3.19.b. Nous ne présentons pas les résultats pour les contacts Mo/Au. En effet, les mesures I(V) sur les diodes émetteur-base dont les électrodes sont en Mo/Au (500/2500 Å) révèlent des caractéristiques court-circuitées dès recuit à 200°C. De plus, après recuit à $T \geq 250^\circ\text{C}$, la morphologie des contacts Mo/Au est très dégradée (cf. Figure 3.20.c). Ce comportement est attribué à une diffusion précoce de l'Or à travers la couche de Mo. En effet, il a déjà été rapporté que les propriétés de barrière de diffusion du Mo sont fortement influencées par la technique et les conditions de dépôt [Harris75, Nowicki78, Mukherjee79]. Dans les conditions de dépôts et d'épaisseur de notre étude, Mo n'est pas une bonne barrière de diffusion pour l'or. Ceci est confirmé par le fait que la tenue en température du contact Mo/Au est largement améliorée par l'introduction d'une fine couche de 400 Å de Pt entre le Mo et l'Or. En effet, les métallisations Mo/Pt/Au et Pd/Mo/Pt/Au ne montrent pas de signe de diffusion profonde sur toute la gamme de température étudiée (Figure 3.20.d). Toutefois, seule la métallisation Pd/Mo/Pt/Au présente une amélioration de la résistance de contact avec la température avec une résistivité minimale de $(8,7 \pm 0,7) \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$, obtenue après recuit de 20 s à 300°C. Ceci est en accord avec les travaux de Wang et al. qui démontrent une réaction du Pd avec $\text{Ga}_{0,73}\text{In}_{0,27}\text{Sb}$ dès 100°C, susceptible d'abaisser la hauteur de barrière de potentiel à l'interface Pd/n- $\text{Ga}_{0,73}\text{In}_{0,27}\text{Sb}$ [Wang05].

3.3.4.C. Le contact de base

L'évolution de la résistance spécifique de contact, extraite des mesures TLM, des dépôts Ti/Au, Ti/Pd/Au, Ti/Pt/Au, Mo/Pt/Au et Pd/Mo/Pt/Au sur la couche de base en $\text{Ga}_{0,35}\text{In}_{0,65}\text{Sb}$

de type p, traitée par attaque Ar^+ , est présentée sur la Figure 3.21. Avant recuit, les métallisations étudiées présentent des résistivités spécifiques de contact inférieures à $1,3 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ avec une valeur record de $(5,5 \pm 0,8) \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$ pour le système Au/Pt/Mo/Pd/p-GaInSb. Les meilleures performances du contact Pd/Mo/Pt/Au sont attribuées à la capacité du Pd à pénétrer la fine couche d'oxyde natif en surface du GaInSb et ainsi à réaliser un contact intime avec le semiconducteur [Wang05].

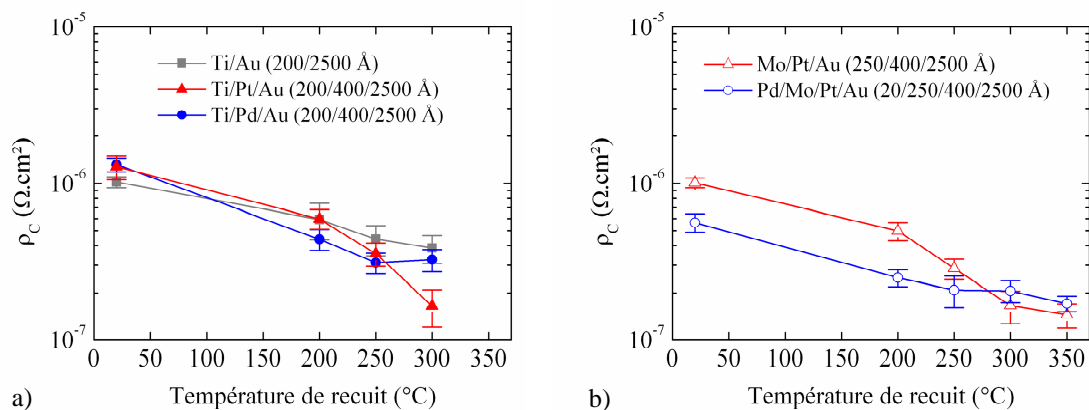


Figure 3.21 : Influence de la température de recuit sur la résistivité spécifique de contact sur la couche de base p-Ga_{0,35}In_{0,65}Sb ($p = 4,5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)
 a) Contacts à base de Ti, b) Contacts à base de Mo

Contrairement aux contacts ohmiques sur n-GaInSb, l'augmentation de la température de recuit jusqu'à 300°C entraîne une diminution des résistivités spécifiques de contact de toutes les séquences de métallisation et des valeurs de $\rho_c \leq (3,9 \pm 0,8) \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$ sont atteintes. Ce comportement est sûrement le résultat de l'ancrage du niveau de Fermi proche du haut de la bande de valence à la surface de GaInSb, comme cela a été observé pour GaSb [Dutta97] et InSb [Wagner93]. Cette propriété physique, qui peut être associée à la présence de défauts à la surface du semiconducteur [Wang04b], est en effet favorable à la formation de contacts ohmiques de type p de faibles résistivités.

Tout comme pour le contact d'émetteur (paragraphe 3.3.4.B), on observe une dégradation de la morphologie des contacts Ti/Au, Ti/Pd/Au et Ti/Pt/Au recuits à 350°C et la mesure des caractéristiques courant-tension des diodes base-collecteur révèle des jonctions en court-circuit. Cela est dû à des phénomènes d'inter-diffusion significatifs entre ces contacts et la couche en GaInSb.

Les contacts à base de Mo/Pt démontrent encore une stabilité thermique supérieure aux contacts à base de Ti, grâce à l'association du métal réfractaire Mo et de la barrière de diffusion Pt. Des résistivités spécifiques de contact minimum de $(1,5 \pm 0,3) \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$ et $(1,7 \pm 0,2) \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$ sont respectivement obtenues après recuit à 350°C des séquences Mo/Pt/Au et Pd/Mo/Pt/Au.

3.3.4.D. Influence de la préparation de surface

La préparation de surface avant dépôt des contacts métalliques a été largement étudiée sur GaInAs et s'est révélée primordiale pour l'amélioration de la qualité et de l'homogénéité de l'interface métal/semiconducteur ainsi que pour la reproductibilité des valeurs de résistivités [Nodjiadjim09]. L'importance de ce paramètre a également été mise en exergue dans le cas des contacts ohmiques sur p-GaSb [Tadayon95] et p-GaInSb [Wang04a] qui, en tant que composés III-Sb, sont particulièrement sujets à l'oxydation [Liu03a].

Dans cette section, nous étudions donc l'influence du traitement de pré-métallisation sur la résistivité des contacts Mo/Pt/Au sur GaInSb de types n et p. Plusieurs traitements de surface ont été testés et les résultats extraits des mesures TLM sur Mo/Pt/Au non-recuits sont présentés dans le Tableau 3.4.

Tableau 3.4 : Influence de la préparation de surface sur la résistivité spécifique de contact sur $Ga_{0,35}In_{0,65}Sb$ de types n et p

Traitement de surface réalisé sur contact non recuit Mo/Pt/Au (250 Å / 400 Å / 2500 Å)	Résistivité spécifique de contact ($\Omega.cm^2$)	
	type n $n = 2.10^{18} cm^{-3}$	type p $p = 4,5.10^{19} cm^{-3}$
non traité	non-ohmique	non-ohmique
Désoxydation HCl et BOE HCl:H ₂ O (1:1), 30 s / BOE:H ₂ O (1:1), 30 s / EDI, 10 s	$(8,9 \pm 0,5) \times 10^{-6}$	$(2,1 \pm 0,2) \times 10^{-6}$
Attaque ionique Ar ⁺ <i>in situ</i> 150 eV, 1 min	$(1,5 \pm 0,2) \times 10^{-6}$	$(1,2 \pm 0,1) \times 10^{-6}$
Désoxydation HCl et passivation de surface (NH ₄) ₂ S ⁴ HCl:H ₂ O (1:1), 30 s / (NH ₄) ₂ S:H ₂ O (1:1), 2 s	$(1,3 \pm 0,1) \times 10^{-6}$	$(5,3 \pm 1,2) \times 10^{-8}$
Traitement UV-ozone ⁵ et désoxydation HCl Uv-ozone, 5 min / HCl:H ₂ O (1:10), 10 s / EDI, 10 s	$(8,7 \pm 0,7) \times 10^{-7}$	$(2,9 \pm 1,7) \times 10^{-8}$

Alors que des caractéristiques I(V) non-ohmiques sont observées pour les échantillons qui n'ont subi aucun traitement préalable au dépôt de la métallisation, une simple préparation par voie chimique comprenant des désoxydations successives dans des solutions d'acide chlorhydrique et de BOE suivies d'une introduction rapide (< 5 min) dans le bâti d'évaporation par faisceau d'électrons permet d'obtenir l'ohmicité des contacts sur GaInSb de types n et p. Ce même traitement avait déjà révélé son efficacité sur p-GaSb [Tadayon95]

⁴ (NH₄)₂S : Solution aqueuse de sulfure d'ammonium à 20-24% en masse.

⁵ Ce traitement a été réalisé dans un bâti de nettoyage UV/Ozone, modèle 42-220 de Jelight Company Inc.

et p-Ga_{0,73}In_{0,27}Sb [Wang04a]. Néanmoins, comme discuté dans les paragraphes précédents, un traitement de surface par attaque ionique Ar⁺ permet d'atteindre de meilleures résistivités spécifiques de contact ($\rho_C \leq 1,5 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$). L'avantage de ce dernier est qu'il est réalisé *in situ* et évite donc une ré-oxydation de la surface de l'échantillon après traitement. Il est toutefois sujet à compromis. En effet, bien qu'il assure l'élimination de la couche d'oxyde en surface de manière efficace, il peut mener à la création d'une interface plus ou moins abrupte entre une couche de surface fortement désordonnée et le semiconducteur monocristallin. Cette couche de surface peut contenir une densité élevée de défauts structuraux (lacunes, interstitiels) électriquement actifs, susceptibles de détériorer les performances électriques du système métal/semiconducteur [Stareev93].

De nombreux semiconducteurs peuvent être passivés par traitement dans une solution de (NH₄)₂S. Après un tel traitement, les surfaces sont recouvertes d'une monocouche d'atomes de soufre [Oigawa91]. Cette configuration sature toutes les liaisons pendantes à la surface du semiconducteur qui est alors passivée chimiquement et présente une bonne résistance à l'oxydation à l'air libre. Wang et al. ont exploité cette approche sur le système Au/W/Pd/p-Ga_{0,73}In_{0,27}Sb et ont observé une diminution de plus d'une décade de la résistivité de contact par rapport à un contact traité par un procédé conventionnel de désoxydations HCl et BOE [Wang04a]. Nous avons appliqué le même traitement à nos contacts Mo/Pt/Au sur Ga_{0,35}In_{0,65}Sb. L'oxyde natif de surface est réduit dans une solution d'acide chlorhydrique puis la surface est passivée dans une solution diluée de (NH₄)₂S. Une immersion rapide de 2 secondes permet de limiter la ré-oxydation de la surface du semiconducteur entre la phase de désoxydation ex-situ par voie chimique et la phase d'introduction dans le bâti de métallisation. Cette préparation de surface révèle des résistivités spécifiques de contact inférieures à $7 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{cm}^2$ sur p-GaInSb.

Des analyses par spectroscopie de photoélectrons (XPS pour *X-ray photoelectron spectroscopy*) ont été menées sur GaInSb de type p non traité et après le traitement de désoxydation HCl et passivation (NH₄)₂S. Ces analyses ont permis de mettre en évidence le greffage du soufre via l'apparition d'un pic S 2s à 226,1 eV sur le spectre de l'échantillon passivé (Figure 3.22). La Figure 3.23 présente les spectres de photoémission des niveaux de cœur Ga 2p_{3/2}, In 3d_{5/2} et Sb 4d enregistrés avec un angle θ de 45° par rapport à la surface. Dans le cas de l'antimoine, on note l'élimination de l'oxyde Sb₂O₃ (décalage de 2,6 eV par rapport à Sb-Ga/In) et l'apparition d'une nouvelle composante provenant de liaisons Sb-S (décalage de 1,6 eV par rapport à Sb-Ga/In) après traitement de passivation (NH₄)₂S [Kitamura96, Lin98, Liu03]. Ces effets sont beaucoup moins marqués sur l'indium pour lequel on observe peu de réduction de l'oxyde après traitement HCl + (NH₄)₂S. On note tout de même l'apparition d'une nouvelle composante attribuée aux liaisons avec le soufre en surface (décalage de 0,66 eV par rapport à In-Sb) [Petrovykh05] qui n'apparaît pas clairement lors de la décomposition du pic Ga 2p_{3/2}, les liaisons Ga-O et Ga-S étant difficiles à

distinguer [Hinkle09]. Concernant ce dernier, bien qu'on observe une diminution des oxydes Ga_2O_3 (décalage de 1,2 eV par rapport à Ga-Sb) [Hinkle09, Liu03], on note un élargissement du niveau de cœur Ga $2p_{3/2}$ vers les hautes énergies de liaison. La composition chimique de cette nouvelle composante n'est pas clairement identifiée mais nous la supposons liée à la formation de groupements $Ga(OH)_x$ [Liu03, Hinkle09] et/ou GaO_xCl_y [Liu03].

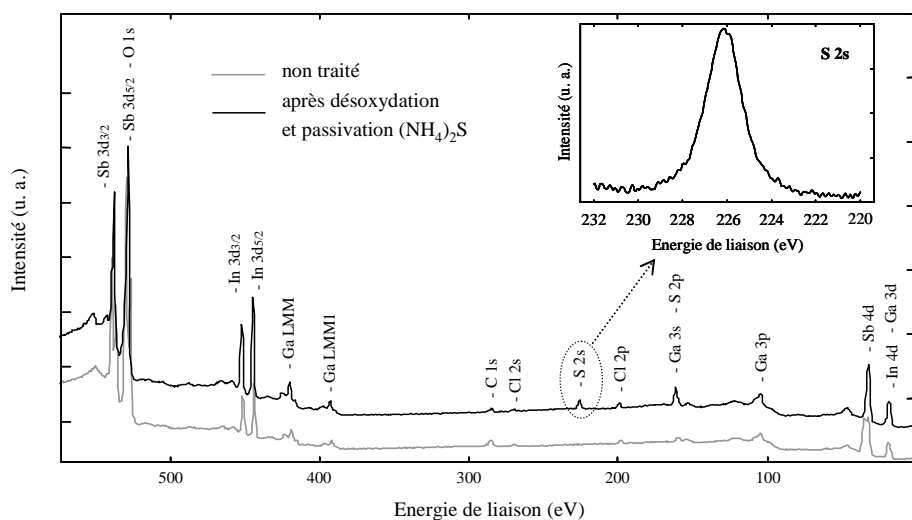


Figure 3.22 : Analyses XPS de la surface de GaInSb de type p avant et après traitement de passivation $(NH_4)_2S$

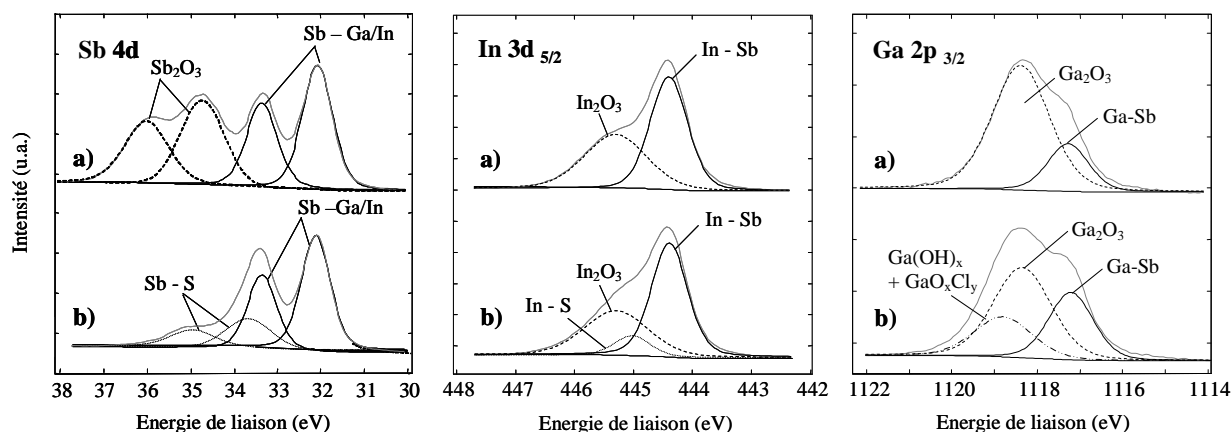


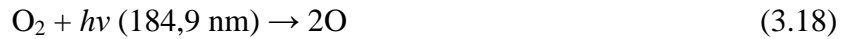
Figure 3.23 : Spectres de photoémission de Sb 4d, In $3d_{5/2}$ et Ga 2p.

- a) p-GaInSb non traité (après gravure des couches d'émetteur),
 b) p-GaInSb après désoxydation HCl et passivation $(NH_4)_2S$

Le traitement qui associe l'action de l'ozone et des rayons ultra-violet a été très étudié dans les années 80 et en particulier par Vig qui en a explicité le principe [Vig85]. Cette technique, basée sur un ensemble complexe de réactions photochimiques, permet l'élimination des contaminants organiques et une oxydation sèche de la surface des échantillons traités. L'échantillon est placé sous une lampe à vapeur de mercure à basse pression de vapeur qui

émet deux rayonnements à des longueurs d'onde de 184,9 nm et 253,7 nm. Ces deux rayonnements jouent un rôle complémentaire dans le processus.

Le rayonnement à 184,9 nm est absorbé par les molécules de dioxygène O_2 présentes dans l'air qui se dissocient selon :



Les atomes d'oxygène isolés forment avec le dioxygène O_2 des molécules d'ozone O_3 . Ces molécules d'ozone sont ensuite dissociées par le rayonnement à 253,7 nm :



Ainsi, la présence des deux radiations permet d'obtenir un régime stationnaire entre les phénomènes de production et de destruction de l'ozone. Ces deux rayonnements contribuent également à la production d'atomes O isolés et par conséquent à l'oxydation accélérée de la surface de l'échantillon par rapport à celle réalisée avec de l'oxygène moléculaire.

La plus grande longueur d'onde (253,7 nm) apporte une autre contribution puisqu'elle est responsable de la décontamination organique de la surface de l'échantillon. Ce rayonnement est en effet absorbé par la majorité des hydrocarbures qu'il excite et/ou dissocie (rupture des liaisons C-H et C-O). Les produits de dissociation des composants organiques se combinent alors avec l'oxygène pour donner des composants volatils de type CO_2 et H_2O .

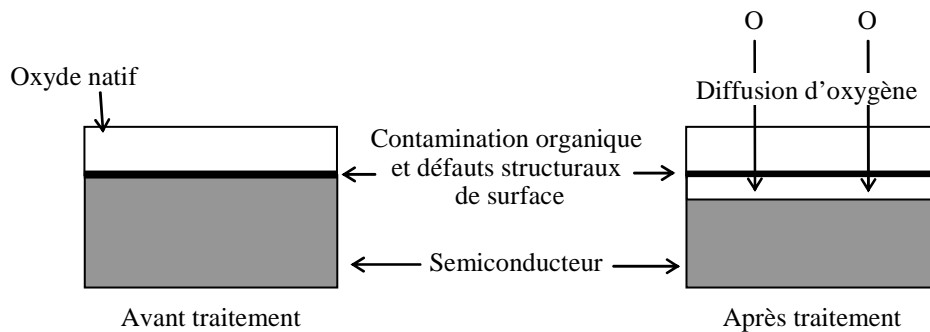


Figure 3.24 : Représentation schématique du nettoyage de la surface des semiconducteurs par oxydation UV/ozone

Plusieurs études ont démontré l'efficacité de cette méthode pour le nettoyage de la surface des couches en GaInAs [Driad98] ainsi que pour la formation de contacts ohmiques de très faibles résistivités sur GaInAs de types n [Crook07] et p [Dahlström03, Nodjiadjim09]. Il a en effet été démontré que la contamination organique et les défauts structuraux présents à la surface du semiconducteur sont piégés dans la couche d'oxyde de quelques angströms d'épaisseur créée au cours du traitement (cf. Figure 3.24) et qu'une exposition de 10 minutes permet de rétablir la stœchiométrie de surface [Driad98]. Comme indiqué dans le Tableau 3.4, une préparation de surface par UV/ozone et désoxydation dans une solution HCl avant dépôt des métallisations Mo/Pt/Au entraîne une réduction significative des résistivités de contact sur nos

couches GaInSb. Des résistivités spécifiques de $(8,7 \pm 0,7) \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$ et de $(2,9 \pm 1,7) \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{cm}^2$ sont respectivement obtenues sur n-GaInSb et p-GaInSb ce qui représente les plus faibles valeurs atteintes dans le cadre de cette étude.

3.3.4.E. Conclusion sur l'étude d'optimisation

Nous avons entrepris une étude comparative des performances de contacts ohmiques à base de Ti et à base de Mo sur $\text{Ga}_{0,35}\text{In}_{0,65}\text{Sb}$ de types n et p. Des différences en termes de stabilité thermique de ces contacts ont été observées et les dépôts qui associent le matériau réfractaire Mo et le Pt comme barrière contre la diffusion de l'or ont démontré une meilleure tenue en température.

L'introduction d'une fine couche de Pd à l'interface métal/p-GaInSb semble particulièrement adaptée à la formation d'un contact de faible résistivité sur p-GaInSb et donc sur la couche de base de nos transistors. Ceci est probablement lié à la faculté qu'a le Pd à pénétrer de fines couches d'oxyde natif comme observé sur GaAs [Sands88].

Nous avons également mis en évidence l'influence significative de la préparation de la surface du GaInSb avant dépôt du contact. L'utilisation d'un traitement UV-ozone a permis d'améliorer très largement la résistance d'un contact Mo/Pt/Au non recuit. Les résistivités spécifiques de contact ont été réduites par un facteur ~ 2 sur n-GaInSb et par un facteur 40 sur p-GaInSb par rapport à un traitement par attaque ionique Ar^+ traditionnellement utilisé au laboratoire.

3.3.5. Applications aux TBH à base $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$ de petites dimensions

Comme nous l'avons mentionné préalablement (section 3.1), le procédé de fabrication de nos TBH comporte sept niveaux de masquage, tous réalisés en lithographie électronique.

La préparation de surface par passivation $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ étant incompatible avec les résines électroniques utilisées dans ce procédé pour définir les plots de contact, elle n'a pas pu être incorporée dans le processus technologique des transistors de petites dimensions. Il en est de même pour le traitement UV-ozone tel qu'il a été exécuté dans le cadre de l'étude précédente, c'est-à-dire, en suivant l'ordre chronologique : 1. définition des plots par lithographie, 2. traitement UV-ozone, 3. désoxydation HCl, 4. métallisation des contacts, puisqu'une fois exposée aux UV profonds, la bicouche de résine électronique s'est révélé peu résistant à l'immersion dans la solution de désoxydation HCl. Toutefois, en modifiant l'ordre de ces étapes technologiques (à savoir, 1. traitement UV-ozone, 2. définition des plots par lithographie, 3. désoxydation HCl, 4. métallisation des contacts), nous avons pu appliquer un traitement UV-ozone au niveau du contact d'émetteur. En revanche, une préparation de surface par faisceau d'ions Ar^+ a été utilisée pour les contacts de base et de collecteur. Les résistivités de contact mesurées par TLM sur la structure TBH $\text{AlInAsSb}/\text{GaInSb}/\text{AlInAsSb}$ (S090412) sont rapportées dans le Tableau 3.5.

Tableau 3.5 : Résultats des mesures TLM sur la structure S090412

	Métal Épaisseur (Å)	Traitement de pré-métallisation	R_{\square} (Ω/\square)	ρ_c ($\Omega.cm^2$)	L_T (μm)
Émetteur	Ti/Pt/Au 200/400/3000	Uv-ozone / HCl	83 ± 2	$(2,5 \pm 0,2) \times 10^{-6}$	$1,7 \pm 0,1$
Base	Pd/Pt/Au 20/100/550	Attaque ionique Ar^+	845 ± 30	$(2,4 \pm 1,5) \times 10^{-7}$	$0,17 \pm 0,05$
Collecteur	Ti/Pt/Au 200/400/3000	Attaque ionique Ar^+	24 ± 1	$(1,4 \pm 0,2) \times 10^{-6}$	$2,4 \pm 0,2$

Il apparaît que les résistivités de contact obtenues sur l'émetteur et le collecteur sont du même ordre de grandeur (autour de $2 \times 10^{-6} \Omega.cm^2$) et ce, malgré la différence des traitements de pré-métallisation utilisés. Cette observation peut mettre en doute l'efficacité du traitement UV-ozone, tel qu'il a été appliqué lors du procédé technologique des TBH de petites dimensions. Il est néanmoins important de préciser que des variations de résistivité sont parfois observées, sans qu'elles puissent être clairement corrélées à l'empilement métallique ou au traitement de surface. Ces variations semblent alors être liées à des paramètres technologiques difficilement contrôlables tels que la présence d'une éventuelle contamination. En ce qui concerne le contact de base, la résistivité spécifique de contact est faible, de l'ordre de $2,5 \times 10^{-7} \Omega.cm^2$, comme attendu sur un contact métal/Pd/p-GaInSb.

3.4. Connexion du transistor par ponts à air

Les dernières étapes du procédé technologique de fabrication d'un TBH consistent en la réalisation des connexions métalliques entre les électrodes du composant et son environnement extérieur (éléments d'un circuit ou plots de mesures).

Cette section est dédiée à la phase de connexion de nos dispositifs. Nous présentons tout d'abord les deux approches technologiques généralement utilisées, à savoir la connexion par vias et la connexion par arasement, puis après avoir décrit le principe de la lithographie électronique, nous détaillons le procédé de réalisation de ponts à air (Figure 3.2.h et g) mis en place pour la connexion de nos TBH à base GaInSb.

3.4.1. Connexion par vias ou arasement

La procédure générale de fabrication d'un pont à air, reportée sur la Figure 3.25, comprend plusieurs étapes :

- définition d'un motif sacrificiel en résine qui recouvre le composant et qui servira de support au pont (Figure 3.25.a),
- réalisation des ouvertures, nommées vias, dans la résine pour accéder aux électrodes des zones actives (Figure 3.25.b),

- étape de fluage qui permet d'adoucir les flancs de la résine et d'éviter les risques de rupture des ponts (Figure 3.25.c),
- définition et métallisation du pont (Figure 3.25.d).
- lift-off et élimination du support de pont (Figure 3.25.e)

Un tel procédé nécessite donc deux niveaux de masquage distincts. Le premier niveau de résine fixe la hauteur du pont à air et définit la zone des piliers. Le deuxième niveau définit la structure du pont.

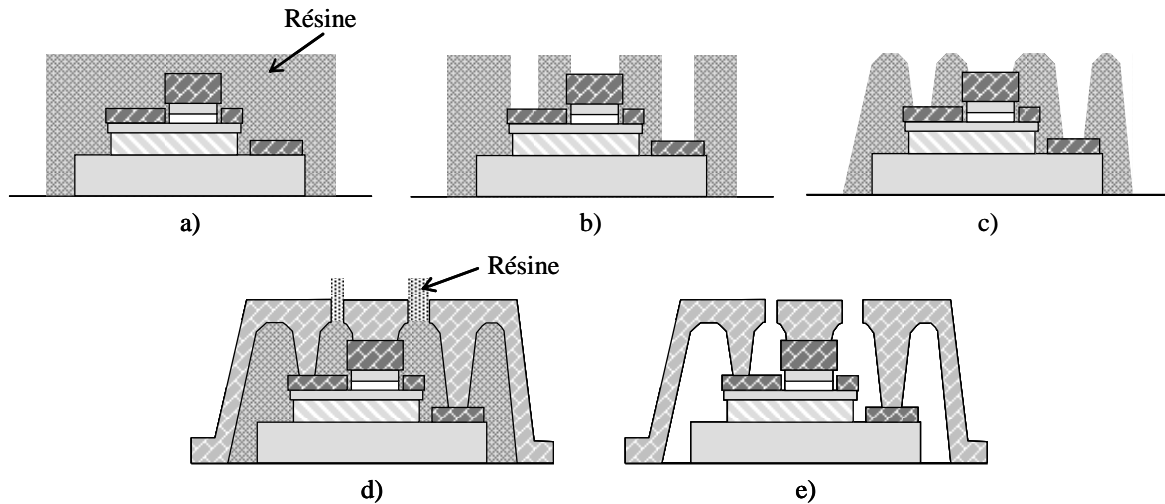


Figure 3.25 : Technique de réalisation des ponts à air par vias

Lorsqu'elle est réalisée par photolithographie, la connexion par vias pose des problèmes pour les transistors de très petite taille. Plus particulièrement, l'ouverture d'un via sur un contact d'émetteur de dimension inférieure au micron est difficile. On estime en effet que la taille minimale des vias pour une ouverture reproductible est de l'ordre de $1\ \mu\text{m}$ [Nodjiadjim09]. Dans cette configuration, l'alignement du masque du deuxième niveau (définition de la structure du pont) peut devenir très délicat.

Une méthode alternative a été proposée afin de s'affranchir des difficultés de la connexion par via d'un émetteur de dimension submicronique : la connexion par arasement, présentée Figure 3.26. Cette technique consiste à graver uniformément la résine du support de pont (Figure 3.26.a) par gravure sèche jusqu'à découvrir une partie de la métallisation d'émetteur (Figure 3.26.b). La connexion de la base et du collecteur reste réalisée par vias et les dernières étapes du procédé (Figure 3.26.c et d) sont similaires à celles décrites Figure 3.25.

Une des principales limitations de cette approche est liée à la difficulté de planarisation du support de pont, étape critique à l'obtention d'une bonne uniformité sur l'échantillon. Ceci est d'autant plus vrai que le contact métallique d'émetteur est souvent volontairement épaissi afin de faciliter l'étape de mise à l'air du métal (Figure 3.26.b). Ainsi la résine utilisée pour le support de pont doit permettre d'obtenir une épaisseur importante (typiquement $3\ \mu\text{m}$) afin de

planariser la surface autour du transistor, mais le dépôt de résine doit également présenter une épaisseur homogène sur l'ensemble de l'échantillon (différence d'épaisseur inférieure à 100 nm entre les différents motifs). L'étape de gravure sèche peut également être source d'inhomogénéité sur la plaque et la vitesse de gravure mérite d'être déterminée avant chaque process puisqu'elle est fortement dépendante de divers paramètres tels que la quantité de matériau à graver ou l'état de la chambre de gravure.

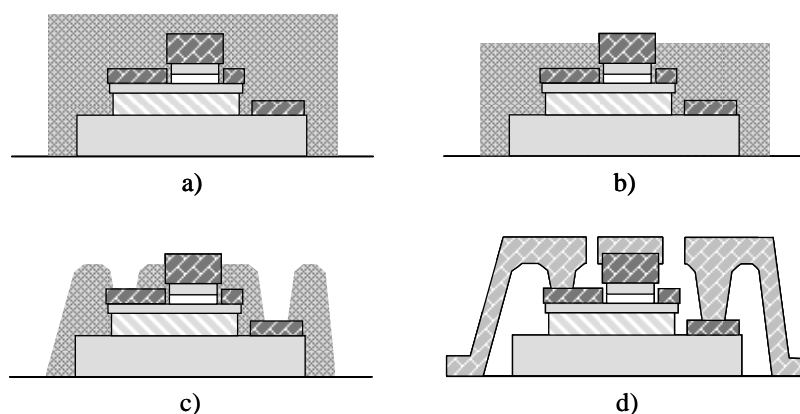


Figure 3.26 : Technique de connexion de l'émetteur par arasement

Afin de s'affranchir de toutes ces difficultés, nous avons choisi d'utiliser la connexion par vias. Néanmoins, les dimensions des contacts d'émetteur ainsi que la précision requise d'un point de vue des alignements justifient l'emploi de la lithographie électronique. Une telle technique n'ayant pas été mise en œuvre au laboratoire avant ces travaux de thèse, nous avons dû effectuer l'optimisation de chacune des étapes précédemment décrites sur la Figure 3.25. Après avoir posé les bases de la lithographie électronique, nous donnons dans la suite de ce chapitre les détails du procédé utilisé qui s'est révélé adapté à la connexion de composants avec des largeurs d'émetteur de $0,4 \mu\text{m}$.

3.4.2. Lithographie électronique

Pour utiliser la lithographie électronique, nous avons besoin de comprendre cette méthode dans son ensemble et d'appréhender ses limites. Dans ce but, nous allons nous intéresser au fonctionnement d'une écriture électronique, aux paramètres d'exposition du motif, à l'interaction du faisceau d'électrons avec la résine et à la chimie des résines électroniques. Pour une description plus détaillée de cette technique, le lecteur peut se reporter à la référence [Martinez05]

3.4.2.A. Principe

La lithographie électronique est une technologie issue du développement de la microscopie à balayage qui est apparue au début des années 60 [Chang67]. Cette technique consiste à focaliser un faisceau d'électrons accélérés sur une résine électro-sensible afin d'en modifier

les propriétés structurales. Comme la longueur d'onde associée aux électrons accélérés est inférieure à l'angström, la diffraction affecte peu la résolution de la lithographie électronique. Cette dernière dépend de la finesse de focalisation du faisceau (ou spot) et de ses interactions avec la résine (cf. paragraphe 3.4.2.C). Elle peut typiquement être inférieure à 10 nm ce qui permet une résolution d'alignement entre deux niveaux en-deçà de 30 nm. La lithographie électronique est donc un outil très performant pour la fabrication de structures à haute résolution.

Le faisceau d'électrons est généré à partir d'une source. Il est ensuite mis en forme à l'aide d'un système optique constitué de lentilles et de diaphragmes puis balayé pour reproduire le motif sur l'échantillon. L'écriture électronique par faisceau focalisé utilise une exposition point par point (Figure 3.27.a). C'est donc une méthode séquentielle qui se traduit par des temps d'écriture très longs pouvant atteindre plusieurs heures. Cette technique est néanmoins la plus utilisée dans le domaine de la recherche puisqu'elle permet d'atteindre une très bonne résolution. Afin d'augmenter les rendements de production, des techniques alternatives peuvent être utilisées. C'est le cas des systèmes à faisceaux préformés à géométrie fixe ou variable, pour lesquels une seule insolation suffit à définir un motif de forme égale à la section de la sonde (Figure 3.27.b). Bien qu'elle augmente la vitesse d'écriture, cette technique présente une résolution limitée (~ 200 nm) et une compatibilité restreinte de la géométrie des motifs avec la forme de la sonde. Elle est surtout utilisée dans l'industrie pour la fabrication des masques. Notons également les travaux de Bruggen et al. qui présentent un système à 100 faisceaux d'électrons (Figure 3.27.c) afin d'optimiser le temps d'écriture [Bruggen05].

Le masqueur électronique utilisé au cours de ces travaux de thèse est le masqueur EBPG 5000+ de Vistec Lithography Inc. qui utilise un faisceau d'électrons focalisé (Figure 3.27.a).

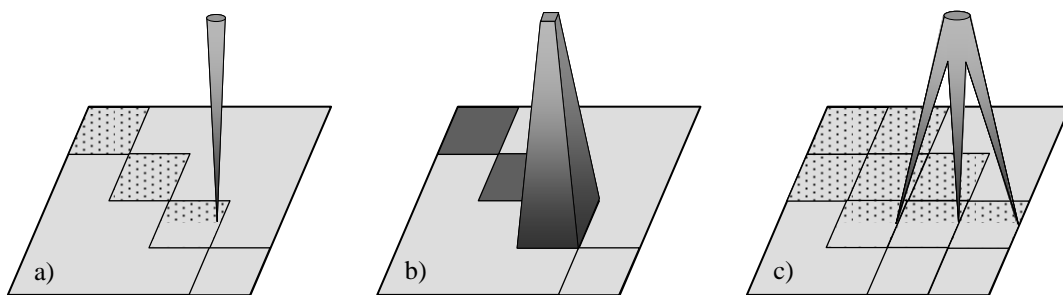


Figure 3.27 : Techniques de lithographie électronique : a) par faisceau d'électrons focalisé, b) par faisceau préformé, c) multi-faisceaux

3.4.2.B. Paramètres d'exposition

Beaucoup de facteurs influencent une écriture électronique et nécessitent d'être contrôlés ou compensés. Les différents paramètres ajustables lors de l'exposition d'une résine sont :

- La tension d'accélération des électrons qui détermine la directivité du faisceau. Plus cette tension est élevée, plus le faisceau est directif (cf. paragraphe 3.4.2.C). Le système de lithographie utilisé ici autorise des tensions d'accélération de 20, 50 et 100 kV⁶.
- La taille du spot : elle est limitée par les répulsions électrons-électrons dans le faisceau. Une petite taille de spot est donc obtenue pour un faible courant de faisceau.
- Le pas de déplacement Δ du faisceau entre chaque exposition : un grand pas de déplacement augmente la vitesse d'écriture alors qu'un pas de déplacement plus petit améliore la résolution et la définition des motifs.
- Le temps d'exposition t correspond au temps pendant lequel la résine est insolée entre chaque déplacement du faisceau. La fréquence de travail maximale du masqueur EBPG 5000+ étant de 50 MHz, le temps d'exposition minimum est de 20 ns.

Les trois derniers paramètres définissent la dose de base D (C/cm²) qui correspond au nombre d'électrons primaires par unité de surface qui s'introduisent dans la résine via le faisceau pendant l'impact. Ainsi, si on considère une surface carrée de côté Δ , couverte par un faisceau de courant I pendant un temps t , la dose D qu'elle reçoit est donnée par l'équation :

$$D = \frac{I.t}{\Delta^2} \quad (3.20)$$

3.4.2.C. Effets de proximité

Lors de l'exposition, les électrons du faisceau incident pénètrent dans la résine avec une énergie cinétique fonction de la tension d'accélération et avec une certaine trajectoire. Ces électrons vont alors subir divers mécanismes d'interaction avec la résine et le substrat qui vont limiter la résolution. Ces phénomènes sont communément appelés « effets de proximité ». En effet, au fur et à mesure que les électrons progressent dans la résine, les électrons subissent une multitude de collisions (élastiques et inélastiques) qui diminuent leur énergie et modifient leur trajectoire. Du fait des collisions inélastiques, les électrons se dispersent le long de leur parcours avec un angle petit par rapport à la normale et ils génèrent des électrons secondaires. Ce processus, appelé dispersion vers l'avant (*forward scattering*), engendre un élargissement de la zone d'interaction comme indiqué sur la Figure 3.28.

Une partie des électrons introduits par le faisceau subissent des collisions quasi-élastiques avec les atomes du réseau de l'échantillon. Tout en conservant leur énergie, ces électrons incidents sont déviés de leur direction avec un grand angle, si bien qu'ils peuvent retourner dans la résine. Ils deviennent alors des électrons rétrodiffusés (Figure 3.28). A leur tour, les électrons rétrodiffusés, dont l'énergie est relativement élevée, sont susceptibles d'engendrer des électrons secondaires à la suite d'événements inélastiques.

⁶ Pour une tension d'accélération de x kV, l'énergie des électrons du faisceau s'élève à x keV.

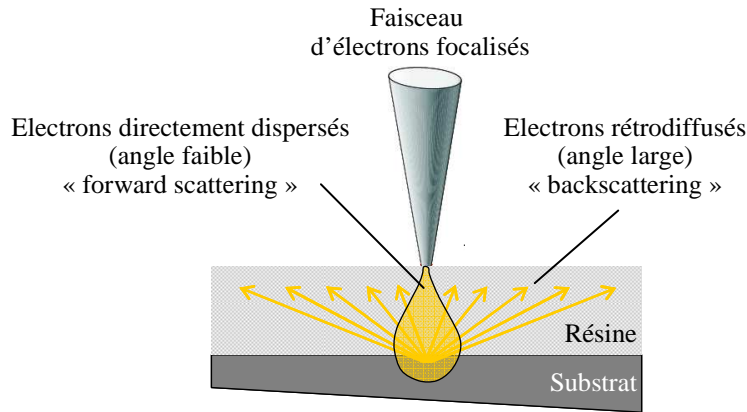


Figure 3.28 : Répartition et nature des électrons lors d'une insolation électronique.

Ces différents mécanismes, qui dépendent de la masse atomique, de la densité de la résine, de la nature du substrat, ainsi que de l'énergie des électrons incidents (tension d'accélération), contribuent à exposer la résine dans des régions qui ne devraient pas être insolées. La dose liée à l'exposition latérale est fonction de la géométrie des motifs, de l'épaisseur de résine et du substrat et peut atteindre quelques dizaines de micromètres. Elle va donner lieu à un élargissement des petits motifs lorsqu'un motif de grande taille est situé à proximité ou encore à une dégradation du résultat lithographique dans le cas de réseaux denses de motifs. Ce dernier cas est illustré sur la Figure 3.29 où il est clair que si la densité des motifs est importante, les effets de proximité sont prédominants et conduisent à une sur-exposition des espaces inter-motifs. Lorsque la dose reçue est supérieure au seuil de révélation, les motifs au centre du réseau ne seront pas dissociés.

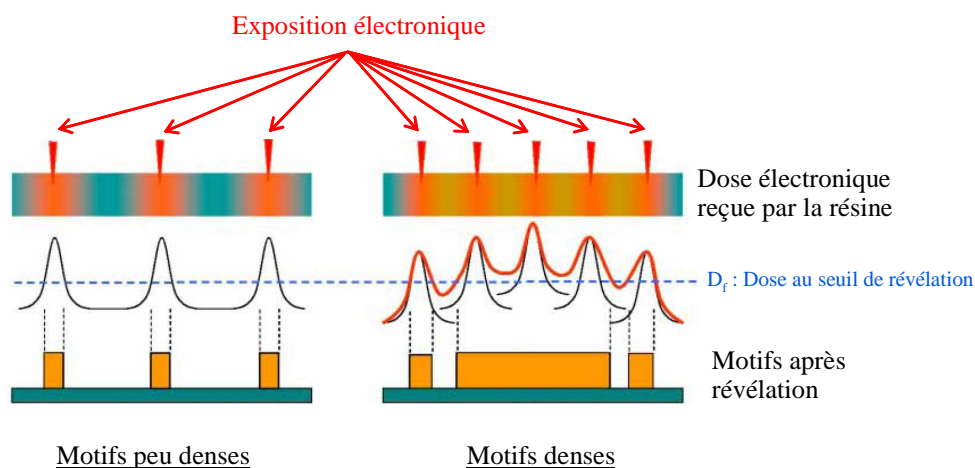


Figure 3.29 : Illustration des effets de proximité sur des réseaux de motifs, cas d'une résine négative [Martinez05]

Afin de limiter l'impact des effets de proximité, la dose reçue par la résine est modulée en fonction de la géométrie des motifs. Des fichiers de correction sont obtenus à partir de

simulations Monte-Carlo de la trajectoire des électrons dans un empilement de matériaux qui fournissent la distribution radiale de la densité électronique reçue par la résine. En convoluant la contribution de chaque pixel au dessin de masque utilisé, l'énergie totale reçue en chaque point du masque est obtenue. Ainsi, sur la base du dessin du masque et du fichier contenant le profil d'énergie, chaque motif est fracturé en trapèzes. Chaque trapèze se voit attribuer un coefficient de correction, optimisé de manière à compenser les effets de proximité et à obtenir une exposition conforme à celle prévue par le masque.

Un autre moyen de limiter ces effets de proximité est d'utiliser une forte énergie pour le faisceau d'électrons. En effet, les simulations Monte-Carlo montrent que plus la tension d'accélération est élevée, plus la longueur de rétrodiffusion des électrons dans la résine est grande, mais la densité des électrons est faible. En d'autres termes, plus la tension d'accélération est élevée, moins les électrons rétrodiffusés auront d'influence sur la résine. Ainsi, la Figure 3.30 donne le profil de diffusion des électrons pour des tensions d'accélération de 50 et 100 kV. On remarque que pour les distances inférieures à 7 μm , la densité d'électrons dans la résine est environ 10 fois plus importante pour la tension de 50 kV. Dans le cadre de ces travaux, nous avons donc utilisé une énergie de 100 keV pour le faisceau électronique.

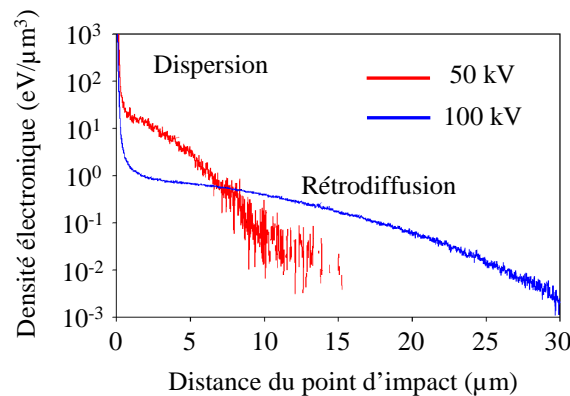


Figure 3.30 : Effet de la tension d'accélération sur la distribution radiale de la densité d'électrons dans un empilement PMMA/GaAs

3.4.2.D. Résines électro-sensibles

En lithographie électronique, le faisceau d'électrons incident définit un motif dans la résine en la modifiant localement. L'énergie dissipée dans la résine va en effet provoquer des transformations locales. Dans le cas des résines positives, il s'agit d'une scission des liaisons carbone-carbone de la chaîne principale qui s'accompagne d'une diminution de la masse molaire moyenne des macromolécules. Pour les résines négatives, il y a au contraire formation de liaisons carbone-carbone entre les macromolécules avec augmentation de la masse molaire moyenne des macromolécules.

La sensibilité d'une résine correspond à la facilité avec laquelle elle se modifie sous l'effet du faisceau d'électrons. Elle est liée à la dose (nombre d'électrons par unité de surface) provoquant une modification suffisante de la résine pour faire apparaître le motif lors du développement.

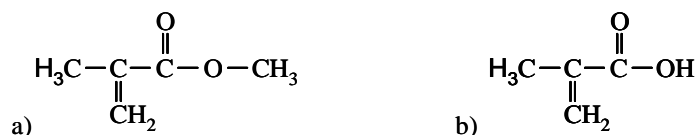


Figure 3.31 : Représentation des monomères a) MMA et b) MAA

Les résines électroniques utilisées dans le cadre de cette étude sont des résines positives constituées de chaînes polymérisées sur la base de deux monomères, le MMA (méthylméthacrylate) et le MAA (acide méthacrylique) (Figure 3.31). L'énergie requise pour briser la chaîne polymère PMMA (pour poly-méthylméthacrylate) est plus importante que celle nécessaire pour briser le PMAA. Par conséquent, un copolymère PMMA/MAA est plus sensible qu'une résine PMMA. La sensibilité de la résine copolymère est ainsi fonction du pourcentage de monomère MAA par rapport au monomère MMA. Les résines PMMA sont des résines haute résolution qui se différencient par leur poids moléculaire. Généralement, les résines PMMA avec un haut poids moléculaire (950K, 495K) sont choisies pour leur fort contraste (cf. paragraphe 3.4.2.E) et leur bonne résolution. Les résines PMMA et copolymère PMMA/MAA sont par ailleurs largement utilisées du fait de leur bonne adhérence et de leur résistance aux attaques chimiques acides.

Le solvant, dans lequel est dissout le polymère, procure au mélange une viscoélasticité suffisante pour son étalement sur un substrat. Le type de solvant et sa proportion influence la viscosité de la solution de résine et donc l'épaisseur de sa couche à l'issue du dépôt. Le solvant n'a généralement pas d'impact sur les performances lithographiques. Il reste toutefois un facteur important dans le cas de procédés multicouches où des incompatibilités de solvants peuvent surgir. Le solvant est partiellement évacué de la couche pendant l'étape d'enduction, puis complètement au moyen d'un recuit. Le recuit permet aussi de relaxer les contraintes accumulées dans le film, de diminuer la rugosité de la résine, et d'améliorer son adhésion au substrat. Les conditions du recuit (temps, température) ont un impact sur la qualité des motifs et la vitesse de dissolution de la résine lors du développement.

3.4.2.E. Développement de la résine exposée

Lors du développement d'une résine positive, le solvant dissout progressivement les zones exposées jusqu'à ce que l'épaisseur de résine soit nulle. Le développement est basé sur le principe de solubilité : la vitesse de dissolution d'un polymère dans un solvant est d'autant plus rapide que son poids moléculaire est faible. Ceci est illustré par la Figure 3.32 qui

représente la variation relative de l'épaisseur de résine après le développement (e_f) par rapport à son épaisseur initiale (e_i) en fonction de la dose d'exposition.

Cette courbe est une figure de mérite d'un procédé complet de lithographie qui inclut la nature de la résine et ses conditions de recuit, les conditions d'exposition ainsi que la solution et la température de développement. Elle est obtenue expérimentalement et renseigne sur la sensibilité et le contraste du procédé.

Le contraste détermine le caractère abrupt de la transition entre les régions exposées et non exposées. Plus le contraste est élevé, plus la solution de développement est capable de révéler de petites variations de dose dans la résine. Il est déterminant pour l'inclinaison des flancs de résine, le contrôle des dimensions des structures et la résolution [Martinez05]. Il correspond à la pente de la courbe de la Figure 3.32 et est donné par :

$$\gamma = \left(\log \frac{D_0}{D_1} \right)^{-1} \quad (3.21)$$

D_0 définit la dose minimale à partir de laquelle l'épaisseur du film résiduel de résine devient non mesurable. Plus D_0 est faible, plus la sensibilité est élevée. D_1 définit la dose maximale (extrapolée) jusqu'à laquelle l'épaisseur finale de résine est proche de l'épaisseur initialement déposée.

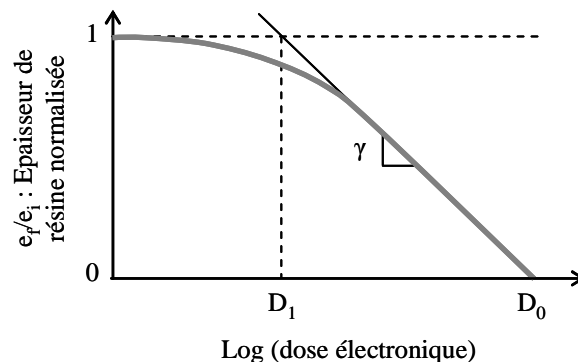


Figure 3.32 : Courbe de contraste d'une résine positive

3.4.3. Réalisation technologique des ponts à air par lithographie électronique

Cette partie propose d'étudier le procédé de lithographie électronique mis en place afin de fabriquer les ponts à air nécessaires à la connexion de nos TBH à base GaInSb.

Comme indiqué au paragraphe 3.4.1, un procédé de fabrication de ponts à air nécessite deux niveaux de masquage distincts. Le premier niveau de résine (niveau 6 du procédé technologique de fabrication des TBH à base GaInSb de la Figure 3.2) fixe la hauteur du pont à air et définit la zone des piliers. Le deuxième niveau (niveau 7) définit la structure des ponts.

La Figure 3.33 donne la succession des principales étapes du procédé lithographique complet pour la réalisation des ponts à air.

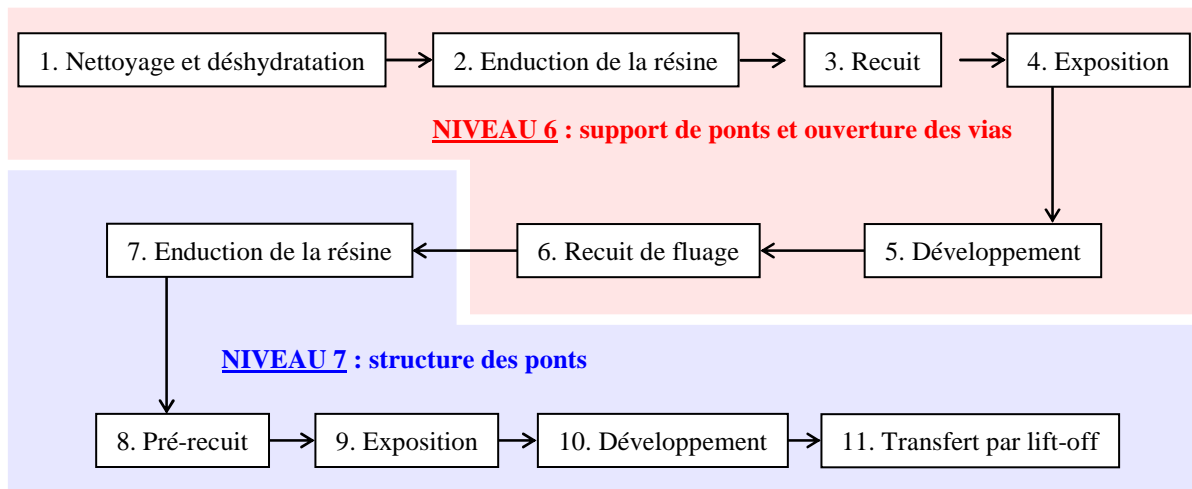


Figure 3.33 : Succession des étapes du procédé lithographique de réalisation des ponts à air

L'emploi simultané des deux résines impose un critère qui va largement conditionner le choix du procédé. En effet, il est essentiel que le développeur de la résine du niveau 7 n'interagisse pas avec la résine du niveau 6 et ce, afin d'éviter toute dissolution du support de pont lors de la révélation (cf. Figure 3.34 qui illustre le cas de la dissolution du support de pont après révélation du niveau 7, observée lors d'un essai préliminaire à cette étude).

Afin de respecter ce critère, le procédé décrit dans la suite de cette section exploite la différence de sensibilité des résines PMMA et copolymère PMMA/MAA.

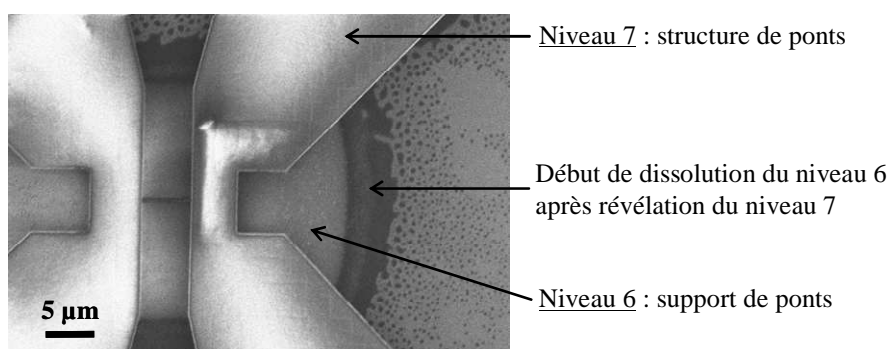


Figure 3.34 : Observation MEB lors d'un essai préliminaire qui illustre le cas d'une dissolution du support de pont du fait d'une interaction du développeur de la résine du niveau 7 avec la résine du niveau 6. Le support de pont est en copolymère PMMA/MAA (ici, seule l'ouverture du via d'émetteur a été réalisée) et la structure du pont est définie avec un bicouche PMGI/nLOF

3.4.3.A. Définition du support de pont et ouverture des vias : PMMA 950K

Cette étape permet de définir le profil de la résine sacrificielle du support de pont. Elle est essentielle puisqu'elle conditionne la forme finale du pont à air.

Afin de réaliser l'ouverture de vias de dimensions submicroniques (ouverture de 300 nm de large pour accéder à un émetteur de largeur 0,4 μm), nous avons choisi la résine PMMA 950K pour ses propriétés électro-sensibles haute résolution. En plus de sa résolution élevée, la PMMA 950K présente une faible sensibilité, qui sera mise à profit lors de la définition de la structure de pont (paragraphe 3.4.3.B), ainsi qu'un bon contraste.

Nous utilisons une solution commerciale fournie par MicroChem Corporation. Il s'agit de la résine la moins diluée disponible au laboratoire qui se compose d'une solution de PMMA dosée à 5% dissoute dans le solvant anisole. Cette dilution permet d'atteindre des épaisseurs de 1900 à 5900 Å. A l'issue de la réalisation des TBH à base GaInSb, il faut rattraper un dénivelé de l'ordre de 9000 Å pour le contact d'émetteur. L'obtention d'une épaisseur suffisante pour recouvrir le transistor avec la PMMA se fait donc par dépôts successifs de 2 couches de 4700 Å d'épaisseur entre lesquels on effectue un recuit thermique.

Pour obtenir des ouvertures de largeur définie, une étude sur l'ingénierie des doses a été réalisée. La PMMA est une résine bien connue au laboratoire et n'a pas posé de difficulté particulière. Ainsi, une optimisation du procédé lithographique (conditions de pré-recuit, conditions d'exposition, solution et temps de développement) et l'application d'une correction de dose adaptée pour pallier les effets de proximité (cf. paragraphe 3.4.2.C) a permis d'atteindre la résolution requise pour l'ouverture du via d'émetteur comme le montre la Figure 3.35. Le procédé utilisé est détaillé en annexe 2.

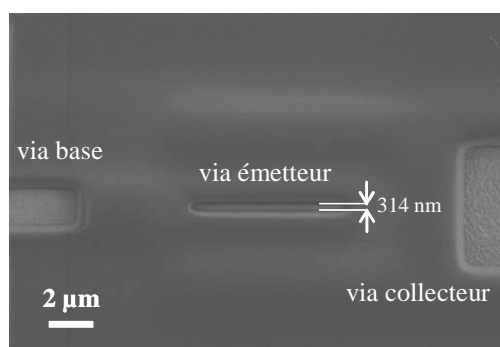


Figure 3.35 : Ouverture des vias d'émetteur, de base et de collecteur après recuit de fluage sur un TBH de largeur d'émetteur de 0,4 μm

La dernière étape du niveau 6 du procédé technologique des TBH consiste en un recuit post-révélation (étape 6 de la Figure 3.33). Celui-ci doit garantir, grâce au fluage de la résine, une transition douce afin de favoriser un bon recouvrement métallique au passage de la marche. Ainsi, la maîtrise du profil de résine est un paramètre important pour obtenir des ponts

métalliques fiables. Afin d'obtenir des profils de résines arrondis, nous avons fixé la température du recuit à 150°C et fait varier sa durée. La Figure 3.36 montre l'évolution du profil du pont en fonction du temps de recuit de fluage.

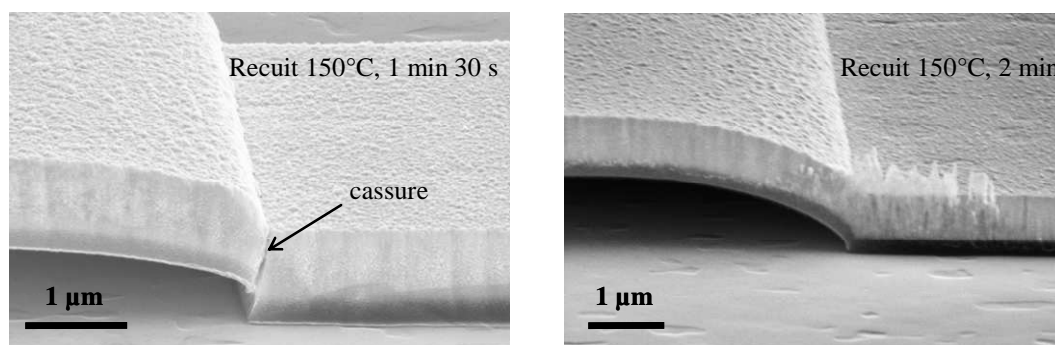


Figure 3.36 : Evolution du profil du pont à air en fonction du temps de recuit post-révélation

3.4.3.B. Définition de la structure des ponts : copolymère PMMA/MAA(33%)

Comme indiqué en introduction de cette section, ce niveau de masquage doit être réalisé avec une résine électro-sensible dont la sensibilité est supérieure à celle du PMMA qui constitue le support de pont. Ce critère est en effet primordial pour ne pas affecter le support de pont, préalablement déposé, lors de l'étape de développement (étape 11 de la Figure 3.33).

Nous utilisons donc une résine copolymère PMMA/MAA. La sensibilité de ce type de résine étant fonction du pourcentage de monomère MAA par rapport au monomère MMA, notre choix s'est tourné vers le copolymère PMMA/MAA(33%) du fournisseur Allresist GmbH qui présente la plus grande proportion de monomère MAA (33%) parmi les résines disponibles au laboratoire. L'épaisseur de la résine qui définit la structure des ponts (niveau 7) doit être plus importante que celle du PMMA (niveau 6). Cette condition résulte du fait que, lors du dépôt métallique des ponts à air, il est nécessaire d'avoir une différence de hauteur importante entre la zone à métalliser (définie par le PMMA/MAA(33%)) et le haut du support de pont (défini par le PMMA 950K). Afin d'obtenir les épaisseurs de résine les plus importantes possibles, le copolymère PMMA/MAA(33%) le moins dilué est choisi. Il s'agit du produit connu sous le nom commercial AR-P 617.14 qui contient 14% de solides dilués dans le solvant 1-méthoxy-2-propanol et qui permet de déposer des épaisseurs jusqu'à 2,3 µm.

La température de recuit du copolymère (étape 8 de la Figure 3.33) est un élément important de ce procédé technologique. Il est en effet indispensable qu'elle soit inférieure à la température utilisée lors du recuit de fluage (150°C) de la PMMA 950K afin de ne pas modifier le profil du support de pont. La température de pré-recuit du copolymère a donc été fixée à 120°C.

Le choix du révélateur est un des facteurs critiques pour la réussite de ce procédé technologique basé sur la différence de sensibilité des deux résines qui définissent le support

et la structure des ponts. En effet, le révélateur affecte la solubilité de la résine exposée. Ainsi, les résines copolymères sont insolubles dans les solvants non polaires tels que le chlorobenzène ou le toluène alors que les résines de type PMMA sont très solubles dans ces solvants [Hatzakis80]. A l'inverse, les copolymères auront une solubilité très importante dans les révélateurs à base d'alcool, du fait d'une grande affinité du méthacrylate, contenant des groupes acides, aux solvants hydroxyliques.

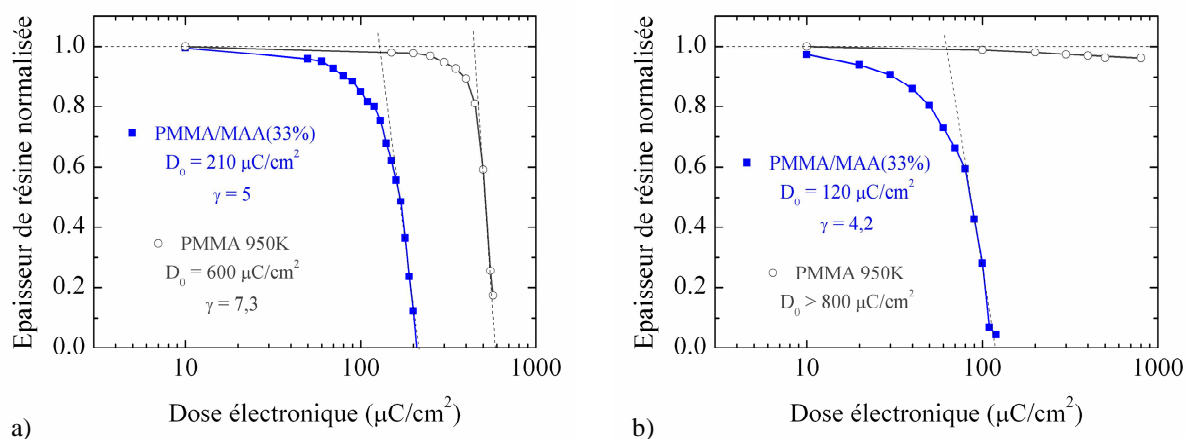


Figure 3.37 : Comparaison des courbes de contraste du copolymère PMMA/MAA(33%) recuit à 120°C et du PMMA 950K recuit à 180°C

- a) le développement est fait dans une solution MIBK:IPA (1:3) pendant 60 s
 b) le développement est fait dans une solution méthanol:IPA (1:3) pendant 60 s.

Nous avons cherché à qualifier la différence de solubilité du copolymère PMMA/MAA(33%) et de la PMMA 950K dans deux solutions à base d'alcool. La première solution, largement utilisée, est basée sur un mélange de méthyl isobutyl cétone (MIBK) et d'alcool isopropylique (IPA). Le second révélateur est une solution à base de méthanol et d'IPA. Pour cela, de larges plots carrés de 50 μm de coté sont insolés à différentes doses électroniques (la tension d'accélération est de 100 kV). Après révélation, l'épaisseur des motifs de résine est mesurée au profilomètre en fonction de la dose électronique. La Figure 3.37 montre que l'utilisation du mélange méthanol:IPA permet d'améliorer d'une manière significative la sélectivité de révélation du PMMA/MAA(33%) par rapport au PMMA. En contre partie, le gain en sensibilité s'accompagne d'une légère dégradation du contraste lithographique du copolymère PMMA/MAA(33%) qui diminue de 5 à 4,2 lorsque le MIBK est remplacé par du méthanol. Il reste néanmoins suffisant à l'obtention de flancs verticaux (Figure 3.38.a) [Martinez05], propriété indispensable au bon déroulement du lift-off. La Figure 3.38.b présente la superposition des résines des niveaux 6 et 7, après révélation du copolymère PMMA/MAA(33%) et démontre que le support de pont n'est pas altéré dans la solution méthanol:IPA (1:3).

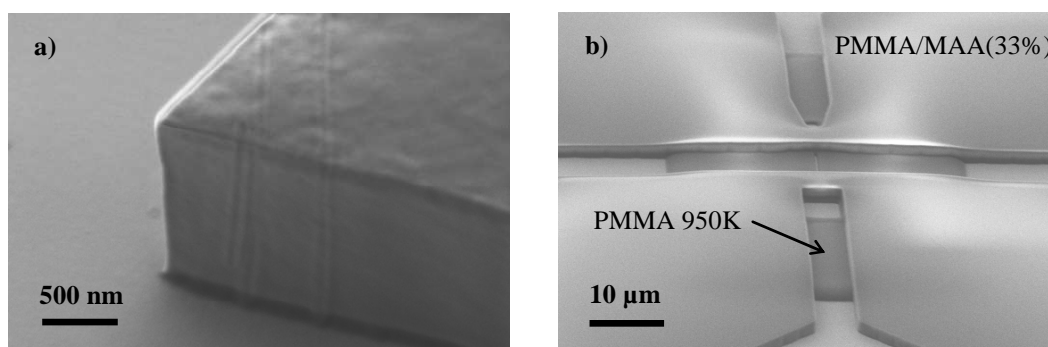


Figure 3.38 : a) Profil vertical du PMMA/MAA(33%) et b) superposition des résines des niveaux 6 et 7, après révélation dans une solution méthanol:IPA (1:3)

La dernière étape de ce niveau de masquage consiste à transférer les motifs par lift-off (étape 11 de la Figure 3.33). Le pont est réalisé durant la même métallisation que celle des lignes d'accès coplanaires qui serviront à la caractérisation des composants (Figure 3.39.a). La séquence métallique des lignes est composée d'une couche d'accrochage en titane et d'une couche d'or et déposée par évaporation par faisceau d'électrons. L'épaisseur totale de la séquence est de 1 μm. Le support de pont est ensuite dissout lors du lift-off après la métallisation des ponts et des lignes. La Figure 3.39 présente des observations au microscope électronique à balayage de différents TBH après métallisation des ponts à air.

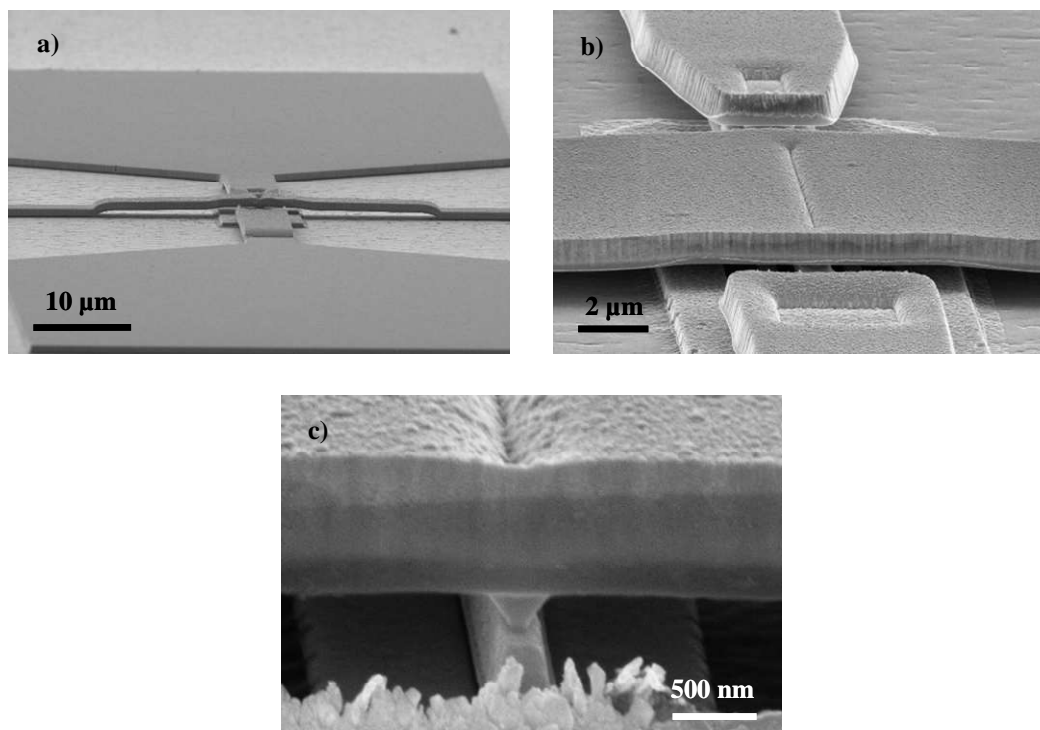


Figure 3.39 : Vues au MEB a) d'un TBH avec ses lignes d'accès coplanaires, b) d'un TBH avec ses sorties par ponts à air, c) de la connexion du pont sur un doigt d'émetteur de 0,4 μm de largeur

3.5. Conclusion

La mise au point d'une procédure technologique de réalisation d'un transistor bipolaire est une étape difficile et fortement liée aux matériaux de la structure concernée. Ainsi, la fabrication de TBH dans le système AlIn(As)Sb/GaInSb moins bien connu que les systèmes plus classiques InP/InGaAs ou InP/GaAsSb a nécessité le développement de briques technologiques propres.

L'étude de solutions de gravure pour la réalisation des mesa a tout d'abord été entreprise. La gravure par voie humide des ternaires $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$ et $\text{Al}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Sb}$ a fait l'objet d'une étude approfondie qui a permis d'identifier de nouvelles solutions chimiques à base d'acide tartrique et d'acide chlorhydrique, adaptées à la gravure sélective de ces matériaux. Dans le cas des hétérostructures $\text{Al}_{0,33}\text{In}_{0,37}\text{As}_{0,31}\text{Sb}_{0,69}/\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$, le manque de sélectivité de gravure entre l'alliage quaternaire et le GaInSb a rendu nécessaire l'introduction de couches d'arrêt en $\text{Al}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Sb}$ adjacentes à l'émetteur afin de permettre la gravure du mesa d'émetteur de manière maîtrisée et reproductible.

Une attention particulière a ensuite été portée sur la minimisation des résistivités spécifiques de contact sur GaInSb de type n et p. Une étude qualitative a permis de dégager les paramètres critiques à l'obtention de contacts ohmiques de bonne qualité sur les couches de contact en GaInSb. Pour le contact de base de nos structures, nous avons opté pour un contact qui comprend une fine couche de Pd (20 Å), assurant de faibles résistivités de contacts inférieures à $5 \times 10^{-7} \Omega.\text{cm}^2$. Au niveau des contacts d'émetteur et de collecteur, les résistivités spécifiques de contact obtenues sont plus importantes (quelques $10^{-6} \Omega.\text{cm}^2$), probablement du fait de l'ancrage du niveau de Fermi proche du haut de la bande de valence dans GaInSb.

Enfin, dans une dernière étape, l'optimisation des paramètres de lithographie électronique a finalisé le procédé de fabrication des TBH à base $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$ en permettant la connexion des composants par ponts à air. La Figure 3.39 qui présente des transistors achevés avec leurs sorties de ponts à air démontre la pertinence de l'ensemble des solutions identifiées. Les caractéristiques statiques et les performances dynamiques de ces composants sont examinées en détail dans le chapitre suivant.

4 ■ Caractérisations électriques de TBH de petites dimensions

Ce chapitre concerne la caractérisation des TBH à base $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$ dont nous avons décrit le procédé de fabrication au cours du chapitre précédent.

Cette étude a pour objectif de démontrer la faisabilité et l'intérêt de la technologie développée mais également de mieux comprendre les mécanismes régissant et limitant les transistors que nous avons fabriqués. Pour cela, nous concentrons notre analyse sur les TBDH $\text{AlInAsSb}/\text{GaInSb}/\text{AlInAsSb}$ qui, comme nous allons le voir, présentent les meilleures caractéristiques statiques et dynamiques. Aussi, nous nous intéressons tout d'abord aux caractéristiques statiques de ces composants et montrons que leurs performances sont limitées par les recombinaisons en surface. Nous nous intéressons ensuite à leurs performances dynamiques et à l'évaluation des effets parasites liés à leur géométrie (résistances et capacités). Nous examinerons enfin l'effet d'améliorations technologiques potentielles.

4.1. Caractéristiques statiques des TBH de petites dimensions

Avant d'étudier les performances statiques des TBDH $\text{AlInAsSb}/\text{GaInSb}/\text{AlInAsSb}$ en détail, nous présentons les caractéristiques statiques de toutes les structures étudiées. Pour rappel, nous détaillons dans le Tableau 4.1 les structures de couches dont la sélection a été présentée au paragraphe 2.4. Les principales différences qui existent entre les quatre structures étudiées sont les suivantes :

- Les couches S090114 et S090413 ont un émetteur en $\text{Al}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Sb}$ alors que les couches S090412 et S090411 utilisent un alliage quaternaire en $\text{Al}_{0,33}\text{In}_{0,67}\text{As}_{0,31}\text{Sb}_{0,69}$ afin d'abaisser la barrière d'énergie vue par les électrons ($\Delta E_C \sim 0$ eV) et d'améliorer le confinement des trous dans la base ($\Delta E_V = 0,39$ eV) (cf. Figure 2.9).

- Les structures S090114 et S090413 se différencient par leur couche de collecteur. La première utilise le même matériau que la base, à savoir le $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$. Le collecteur de la couche S090413 est réalisé dans un matériau à plus grand gap $\text{Al}_{0,33}\text{In}_{0,67}\text{As}_{0,31}\text{Sb}_{0,69}$ dont la composition a été justifiée au paragraphe 2.4.3.
- De même pour les couches S090411 et S090412 : S090411 est une structure à simple hétérojonction (collecteur en $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$) et S090412 est une structure à double hétérojonction avec un collecteur en $\text{Al}_{0,33}\text{In}_{0,67}\text{As}_{0,31}\text{Sb}_{0,69}$.

Tableau 4.1 : Récapitulatif des structures étudiées

 ($\text{GaInSb} = \text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$; $\text{AlInSb} = \text{Al}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Sb}$; $\text{AlInAsSb} = \text{Al}_{0,33}\text{In}_{0,67}\text{As}_{0,31}\text{Sb}_{0,69}$)

	Dopage (cm^{-3})	S090114	S090413	S090411	S090412	
Contact émetteur	Te : 2×10^{18}	GaInSb				} ~ 1000 Å
Emetteur	Te : 1×10^{17}	AlInSb (200 Å)		couche d'arrêt AlInSb (20 Å) AlInAsSb (400 Å) couche d'arrêt AlInSb (20 Å)		
Base	C : 1×10^{19}	GaInSb				} 400 Å
Collecteur	Te : 5×10^{16}	GaInSb	AlInAsSb	GaInSb	AlInAsSb	} 1500 Å
Sous-collecteur	Te : 2×10^{18}	GaInSb				} 2500 Å

4.1.1. Caractéristiques $I_C(V_{CE})$

La Figure 4.1 présente les caractéristiques de sortie des TBH d'émetteur $2 \times 15 \mu\text{m}^2$ pour les quatre structures présentées précédemment. Plusieurs paramètres importants obtenus à partir de ces graphiques sont donnés dans le Tableau 4.2.

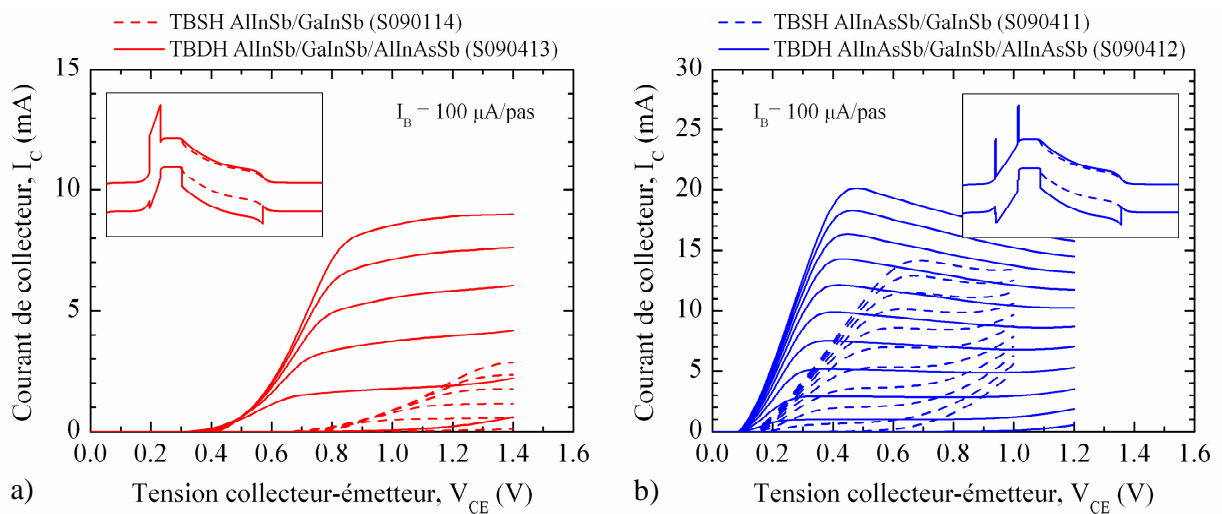


Figure 4.1 : Caractéristiques statiques des TBH $2 \times 15 \mu\text{m}^2$. a) TBH dont l'émetteur est en $\text{Al}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Sb}$. b) TBH dont l'émetteur est en $\text{Al}_{0,33}\text{In}_{0,67}\text{As}_{0,31}\text{Sb}_{0,69}$. L'insert donne les diagrammes de bande correspondants aux structures

Tableau 4.2 : Principaux paramètres statiques des TBH $2 \times 15 \mu\text{m}^2$

	S090114	S090413	S090411	S090412
Gain statique maximum β_{MAX} à $I_C = 1 \text{ mA}$	5	19 à $I_C = 4 \text{ mA}$	14 à $I_C = 10 \text{ mA}$	20 à $I_C = 15 \text{ mA}$
Tension de claquage, BV_{CE0} (définie à $J_c = 10 \mu\text{A}/\mu\text{m}^2$)	1,5 V	1,3 V	0,7 V	1,2 V
Tension de seuil, ΔV_{CE}	750 mV	380 mV	150 mV	90 mV
Tension de saturation V_{sat} pour $I_B = 500 \mu\text{A}$	1,3 V	0,8 V	0,5 V	0,35 V

On note tout d'abord des différences de gains statiques entre les 4 composants avec notamment un très faible gain pour la structure S090114. Cette différence peut s'expliquer par l'utilisation d'une couche tampon optimisée pour les structures S090413, S090411 et S090412 par rapport à celle de la couche S090114 (cf. Annexe 1) qui améliore la morphologie de la surface et diminue la densité de dislocations émergentes. La dégradation du gain en courant de S090114 peut donc être le résultat d'une plus forte densité de dislocations émergentes à travers les couches actives qui facilitent les recombinaisons électron-trou par piégeage des porteurs et induisent une augmentation des courants de recombinaison dans la zone de charge d'espace, à l'interface émetteur-base ou en volume de base [Makimoto91,Ito92].

La tension de claquage des quatre composants est relativement faible du fait de l'épaisseur de collecteur (1500 \AA) optimisée pour favoriser un fonctionnement rapide du transistor. Les structures à simple hétérojonction S090114 et S090411 présentent une plage de fonctionnement réduite, la couche de collecteur étant réalisée dans le même matériau que la base, à savoir $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$ dont la faible largeur de bande interdite ($0,44 \text{ eV}$) favorise l'augmentation du courant de fuite de la jonction B/C par effet tunnel bande à bande.

Les caractéristiques des structures S090411 et S090412 présentent une conductance de sortie négative aux plus fortes densités de courant ($J_C > 50 \text{ kA}/\text{cm}^2$) (Figure 4.1.b) qui met clairement en évidence un phénomène d'auto-échauffement dans le composant. Comme introduit au chapitre 1, l'augmentation de la température dans la partie active du composant entraîne une réduction de l'efficacité d'injection émetteur-base responsable de la diminution du gain statique en courant. Les effets thermiques observés sont liés à l'épaisse couche tampon métamorphique ($1,5 \mu\text{m}$) qui permet d'accommoder le désaccord de maille avec le substrat InP. Cette couche tampon utilise une gradualité en $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$ (cf. paragraphe 2.5.4.D) dont la faible conductivité thermique contribue à la mauvaise évacuation de la chaleur du TBH [Kim02]. Il est en effet intéressant de noter que les alliages ternaires possèdent une

conductivité thermique inférieure à celle des matériaux binaires qui les composent [Adachi09]. Ainsi, le Tableau 4.3 donne la conductivité thermique de quelques semiconducteurs et montre que le $\text{Ga}_{0,47}\text{In}_{0,53}\text{As}$ possède une conductivité thermique beaucoup plus faible que celles du GaAs et de l'InAs. Malgré le manque de littérature relative à la conductivité thermique de l' $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$, une tendance similaire est à prévoir pour ce matériau ternaire.

Tableau 4.3 : Conductivité thermique des principaux semiconducteurs [Adachi09]

	InP	GaAs	InAs	$\text{Ga}_{0,47}\text{In}_{0,53}\text{As}$	GaSb	AlSb	InSb
Conductivité thermique à 300 K (W/K.cm)	0,68	0,45	0,3	0,05	0,36	0,57	0,75

Les structures dont l'émetteur est en $\text{Al}_{0,33}\text{In}_{0,67}\text{As}_{0,31}\text{Sb}_{0,69}$ présentent les plus faibles tensions de seuil avec une très basse valeur de 90 mV pour le TBDH (S090412). La tension de seuil ΔV_{CE} a été discutée dans le chapitre 1. L'expression (1.21) montre que ce paramètre dépend de nombreux facteurs de la structure. Cependant, lorsque $n_{\text{EB}} = n_{\text{BC}} = n$, l'équation (1.21) peut être simplifiée :

$$\Delta V_{\text{CE}} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{A_C}{A_E} \frac{J_{\text{BCsat}}}{\alpha J_{\text{BEsat}}} \right) + I_B R_E \quad (4.1)$$

Dans ce cas, ΔV_{CE} est largement conditionnée par la dissymétrie des deux jonctions d'un point de vue tant géométrique qu'électrique. La tension de seuil de la structure S090411, pour laquelle les coefficients d'idéalité des diodes n_{EB} et n_{BC} sont de l'ordre de 1,5, a été calculée avec l'équation (4.1). Les courants de saturation des jonctions émetteur-base et base-collecteur ont été extrapolés à partir des mesures des diodes et valent respectivement $2 \cdot 10^{-8}$ A et $1,5 \cdot 10^{-6}$ A. Ce calcul donne 165 mV (à $I_B = 500 \mu\text{A}$), valeur qui correspond bien au ΔV_{CE} mesuré (150 mV).

On note enfin que la pente décrite par les tensions de saturation (équation (1.23)) qui correspond à la somme des résistances d'accès d'émetteur et de collecteur, est plus faible pour la structure S090412. Cette pente est particulièrement importante pour le composant de la couche S090114 pour laquelle les contacts ohmiques de type n sont de mauvaise qualité, induisant de plus fortes résistances séries. Les résistivités de contact d'émetteur et de collecteur se sont en effet révélées excessivement élevées avec des valeurs de l'ordre de $10^{-5} \Omega/\text{cm}^2$.

Il semble par ailleurs, que pour des résistivités de contact d'émetteur et de collecteur fixées, les structures avec émetteur en AlInSb (S090114 et S090413) présenteront toujours des résistances d'accès plus importantes que les structures avec émetteur en AlInAsSb, du fait de

la couche d'AlInSb qui, en mode de fonctionnement normal, est susceptible de provoquer l'apparition d'une résistance série supplémentaire due au blocage des électrons. Cet effet est illustré sur la Figure 4.2 qui donne le diagramme de bande d'une jonction émetteur-base $\text{Al}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Sb}/\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$ sous polarisation directe.

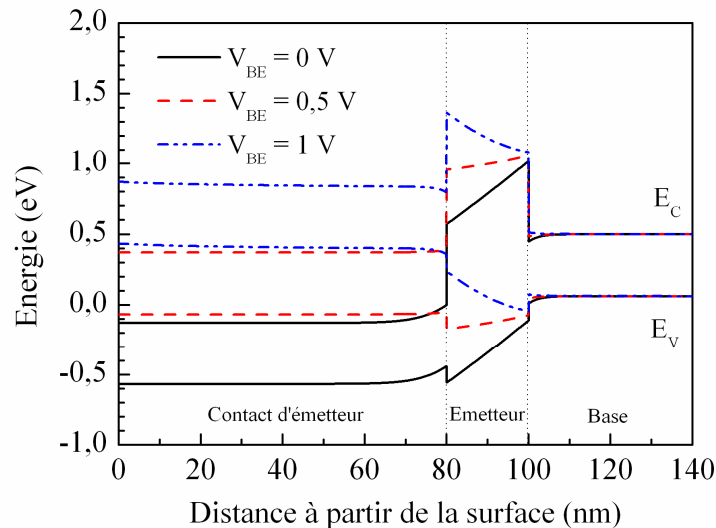


Figure 4.2 : Diagramme de bande de la jonction émetteur-base $\text{Al}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Sb}/\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$ (structures S090114 et S090413) sous polarisation directe.

4.1.2. Courbes de Gummel

Nous montrons dans cette section les courbes de Gummel obtenues sur les TBH $2 \times 15 \mu\text{m}^2$ des deux structures qui présentent les gains statiques en courant les plus importants, à savoir S090412 et S090413. Il est à noter que les mesures sur la structure TBSH AlInSb/GaInSb (S090114) ont montré des tracés de Gummel similaires à ceux obtenus pour les TBDH AlInSb/GaInSb/AlInAsSb (S090413), notamment en termes de facteur d'idéalité des courants de base et de collecteur. De même, les TBSH AlInAsSb/GaInSb (S090411) ont un comportement similaire aux TBDH AlInAsSb/GaInSb/AlInAsSb (S090412) et ne sont donc pas présentés dans cette section.

4.1.2.A. Structure avec émetteur en AlInSb (S090413)

La Figure 4.3 montre les courants I_B et I_C ainsi que le gain en courant β en fonction de la tension de polarisation V_{BE} pour un transistor à double hétérojonction avec émetteur en $\text{Al}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Sb}$ de doigt d'émetteur $2 \times 15 \mu\text{m}^2$ (structure S090413). Le maximum de gain en courant est de 17 pour une polarisation émetteur-base de 0,9 V. Les valeurs des facteurs d'idéalité des courants de base et de collecteur sont anormalement élevées ($n_B = 3,6$ et $n_C = 2$) et sont certainement liés à la configuration peu classique du diagramme de bande de la jonction émetteur-base en polarisation directe (cf. Figure 4.2).

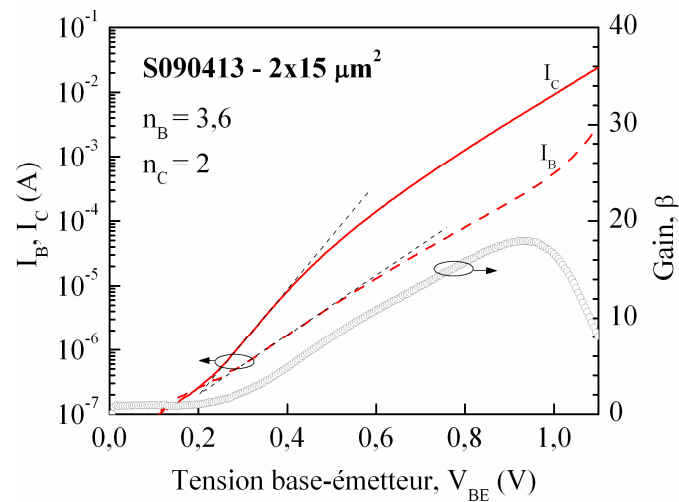


Figure 4.3 : Courbe de Gummel et gain en courant d'un TBDH AlInSb/GaInSb/AlInAsSb de surface d'émetteur de $2 \times 15 \mu\text{m}^2$ (structure S090413).

4.1.2.B. Structure avec émetteur en AlInAsSb (S090412)

Le comportement électrique des composants est largement amélioré par l'introduction d'un émetteur en $\text{Al}_{0,33}\text{In}_{0,67}\text{As}_{0,31}\text{Sb}_{0,69}$ accordé en maille comme le montre la Figure 4.4 qui présente les courants I_B et I_C ainsi que le gain en courant β en fonction de la tension de polarisation V_{BE} pour un TBH $2 \times 15 \mu\text{m}^2$ de la structure S090412. On retrouve le maximum de gain en courant de 20 pour une polarisation émetteur-base de 0,5 V.

Le courant de collecteur révèle un facteur d'idéalité de 1,15. La faible dispersion de ce facteur nous renseigne sur la qualité et l'uniformité de l'efficacité d'injection des porteurs de l'émetteur vers la base. En effet, la Figure 4.5.a qui présente les différentes valeurs du coefficient d'idéalité n_C en fonction de la surface de l'émetteur, montre que n_C est totalement indépendant de la surface des dispositifs. Par ailleurs, la valeur proche de l'unité démontre que l'introduction de la couche d'arrêt en $\text{Al}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Sb}$ entre l'émetteur en AlInAsSb et la base en GaInSb ne pénalise pas la qualité de l'injection. Ceci est confirmé par la Figure 4.5.b qui représente les courants de collecteur et d'émetteur mesurés respectivement en mode direct et inverse. En mode inverse, les électrons sont injectés du collecteur vers l'émetteur, la jonction base-collecteur étant polarisée en directe et la jonction émetteur-base en inverse. Le fait que les deux courbes se superposent quasiment aux niveaux de courants intermédiaires et présentent la même idéalité démontre la quasi-symétrie électrique des jonctions E/B et B/C. La différence entre I_C et I_E à plus forte injection est le résultat d'une chute de tension aux bornes des résistances d'accès plus importante en mode inverse du fait du faible niveau de dopage du collecteur (cf. paragraphe 1.3.3).

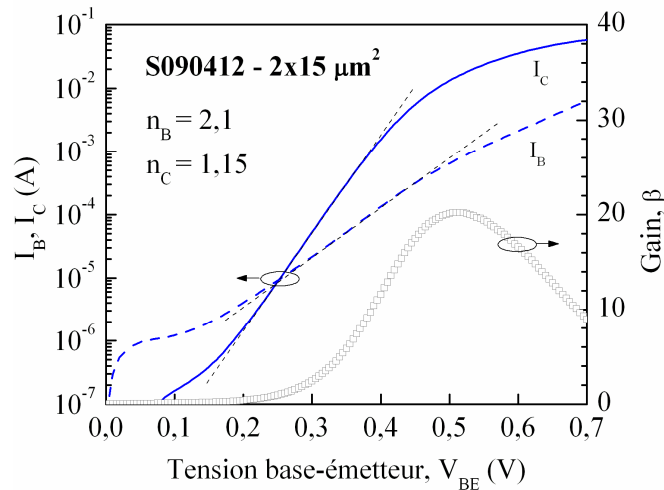


Figure 4.4 : Courbe de Gummel et gain en courant d'un TBDH $\text{AlInAsSb}/\text{GaInSb}/\text{AlInAsSb}$ de surface d'émetteur de $2 \times 15 \mu\text{m}^2$ (structure S090412)

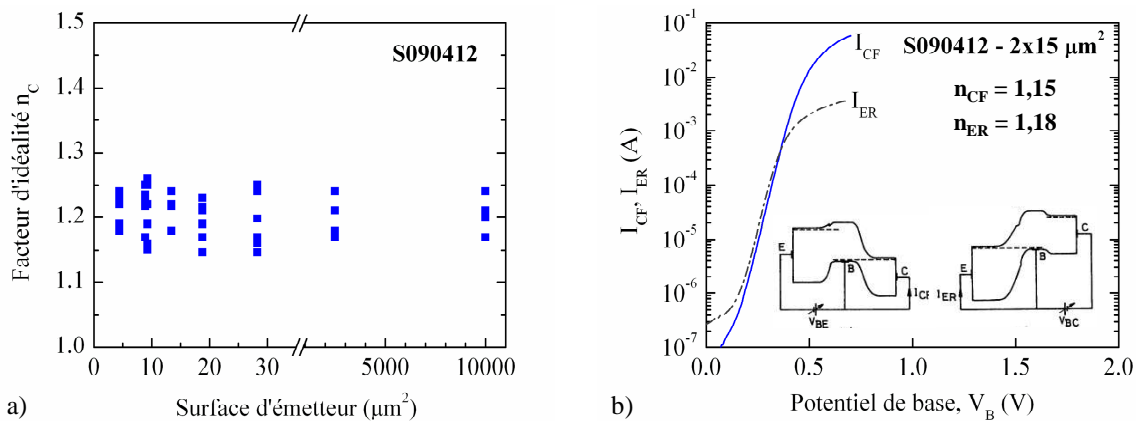


Figure 4.5 : a) Facteur d'idéalité du courant collecteur en fonction de la surface d'émetteur. b) Courants de collecteur (en fonction de V_{BE} , à $V_{CB} = 0 \text{ V}$) et d'émetteur (en fonction de V_{BC} , à $V_{EB} = 0 \text{ V}$) mesurés respectivement en mode direct et en mode inverse pour un TBDH $\text{AlInAsSb}/\text{GaInSb}/\text{AlInSb}$ de $2 \times 15 \mu\text{m}^2$ (S090412)

Contrairement à I_C , le courant de base I_B présente un comportement non idéal et est très important à faible polarisation, ce qui se traduit par une forte chute du gain statique en courant pour les faibles valeurs de V_{BE} (Figure 4.4). Ce phénomène peut être attribué à des effets de recombinaison en surface. En effet, la Figure 4.6 montre que la densité de courant de base augmente quand la surface d'émetteur diminue : pour une polarisation V_{BE} de $0,5 \text{ V}$, le courant de base du TBH $1 \times 5 \mu\text{m}^2$ subit une augmentation de 87% par rapport au courant de base du TBH $2 \times 15 \mu\text{m}^2$ alors qu'une augmentation de seulement 15% , liée à la dispersion des caractéristiques sur l'échantillon, est observée pour le courant de collecteur. L'effet des recombinaisons, responsable de l'augmentation du courant de base, est donc plus sensible pour les transistors de petites dimensions pour lesquels le rapport du périmètre du méso

d'émetteur sur sa surface est beaucoup plus important. Ceci laisse entrevoir des effets de recombinaisons en surface, phénomène que nous examinons plus en détail dans la section suivante.

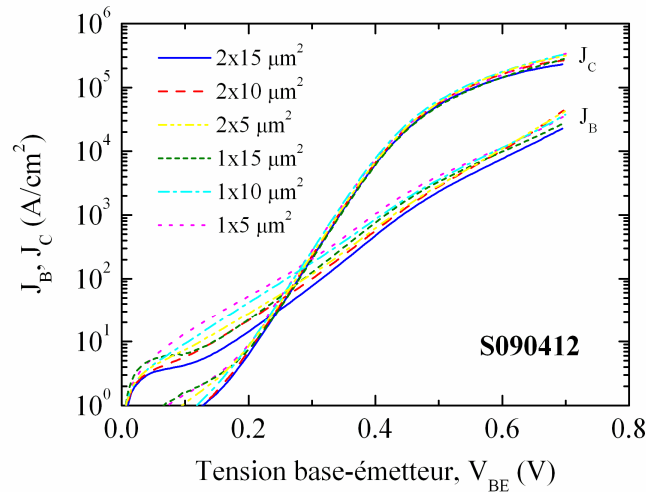


Figure 4.6 : Courbes de Gummel pour des TBDH AlInAsSb/GaInSb/AlInAsSb (S090412) de différentes dimensions d'émetteur

4.1.3. Analyse des courants de recombinaison dans les TBH à base $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$

La Figure 4.7 présente l'évolution du gain en courant de TBH AlInAsSb/GaInSb/AlInAsSb de différentes dimensions d'émetteur en fonction de la densité de courant collecteur. On constate que le gain en courant varie avec la géométrie des composants : celui-ci est d'autant plus faible que les dimensions du contact d'émetteur sont petites. Ainsi, une réduction de plus de 25 % du gain en courant maximum est mesurée entre les TBH de surfaces $2 \times 15 \mu\text{m}^2$ et $1 \times 5 \mu\text{m}^2$.

Ce phénomène est connu pour les TBH des filières AlGaAs/GaAs [Tiwari88, Hayama90], GaInP/GaAs [Liu93, Bourguiga99], InP/GaInAs [Rohner01, Jin04] et InP/GaAsSb [Tao05, Liu08, Zeng08]. La réduction des dimensions du TBH, indispensable à l'amélioration de ses performances dynamiques, donne de plus en plus d'importance aux effets dus aux surfaces du composant par rapport à ceux liés au volume. Les effets de recombinaisons en surface sont ainsi responsables de la dégradation du gain en courant à mesure que les dimensions des TBH sont réduites⁷.

Cette section est donc dédiée à l'étude expérimentale des effets de recombinaison en surface dans les TBDH AlInAsSb/GaInSb/AlInAsSb (structure S090412) afin de qualifier leur importance.

⁷ En anglais, ce phénomène est connu sous l'expression : *emitter-size effect*

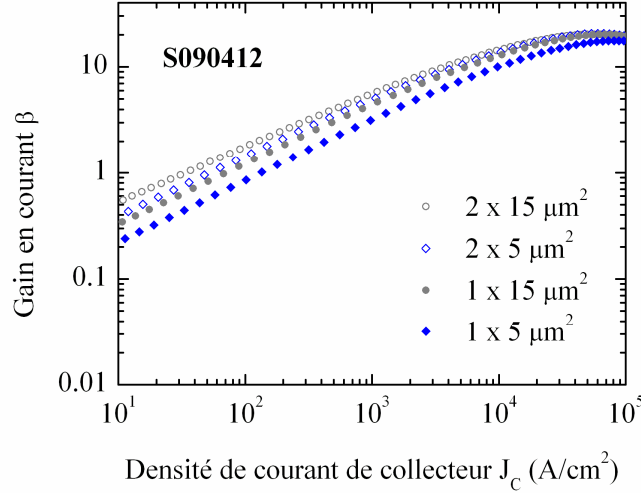


Figure 4.7 : Gain statique en courant en fonction de la densité de courant collecteur mesuré à $V_{CB} = 0$ V pour des TBH AlInAsSb/GaInSb/AlInAsSb réalisés en technologie auto-alignée

4.1.3.A. Composantes du courant de base

Comme discuté au paragraphe 1.3.1, dans le cas d'une technologie triple mesas, le courant de base d'un TBH, en mode de fonctionnement direct, peut être décomposé en cinq composantes (si on néglige I_{pEB} , courant direct de trous injectés de la base vers l'émetteur, du fait de la discontinuité $\Delta E_V \sim 0,39$ eV à l'hétérojonction émetteur base, ainsi que I_{CB0} , courant inverse électrons-trous injectés à la jonction base-collecteur) :

$$I_B = I_{rB,vol} + I_{rEB,int\ erf} + I_{rEB,zce} + I_{rB,surf} + I_{rB,cont} \quad (4.2)$$

où $I_{rB,vol}$ représente le courant de recombinaison en volume de base, $I_{rEB,int\ erf}$ le courant de recombinaison à l'interface émetteur-base, $I_{rEB,zce}$ le courant de recombinaison dans la zone de charge d'espace E/B, $I_{rB,surf}$ le courant de recombinaison en surface de base extrinsèque et $I_{rB,cont}$ le courant de recombinaison au niveau du contact de base.

Les trois premiers termes de l'équation (4.2) sont liés à la croissance épitaxiale et proviennent de la zone intrinsèque de la base. A ce titre, ils sont proportionnels à la surface de la jonction émetteur-base. Les courants de recombinaisons en surface de base extrinsèque et au niveau du contact de base sont eux attribués aux procédés technologiques et sont supposés proportionnels au périmètre de cette même jonction. Le courant de base total peut donc s'écrire sous la forme :

$$I_B = A_E \cdot J_{rB,int} + P_E \cdot (K_{rB,surf} + K_{rB,cont}) \quad (4.3)$$

où A_E et P_E sont respectivement la surface et le périmètre de la jonction émetteur-base. $J_{rB,int}$ représente la densité de courant de base relative aux composantes intrinsèques. $K_{rB,surf}$ et $K_{rB,cont}$ représentent les courants de recombinaison de la zone de base extrinsèque divisés par le périmètre de la jonction E/B.

En utilisant la définition du gain en courant $\beta = \frac{I_C}{I_B}$, l'équation (4.3) peut être reformulée :

$$\frac{J_C}{\beta} = J_{rB,int} + \frac{P_E}{A_E} (K_{rB,surf} + K_{rB,cont}) \quad (4.4)$$

Cette équation montre que pour une densité de courant de collecteur fixée, le gain en courant diminue avec la surface de la jonction émetteur-base. Ainsi, pour un procédé donné, la comparaison des performances mesurées pour des composants de différentes dimensions permet de qualifier expérimentalement les différents courants de recombinaison. La régression linéaire de J_C/β en fonction du rapport d'aspect P_E/A_E renseigne en effet sur $(K_{rB,surf} + K_{rB,cont})$ à partir de la pente de la droite et sur la densité de courant relative aux recombinaisons en volume $J_{rB,int}$ à partir de l'ordonnée à l'origine.

4.1.3.B. Résultats expérimentaux

Afin de quantifier les courants de recombinaison de la structure S090412, des transistors de différentes dimensions d'émetteur ont été fabriqués en utilisant les éléments de technologie développés au chapitre 3. Les composants fabriqués ont des largeurs d'émetteur W_E de 1 et 2 μm avec une longueur L_E variable de 5, 10 et 15 μm . Trois différentes technologies sont également comparées, à savoir :

- une technologie avec contact de base auto-aligné,
- une technologie avec distance émetteur-base d_{E-B} de 0,3 μm ,
- une technologie avec distance émetteur-base d_{E-B} de 0,5 μm .

Notons que les dimensions données ici correspondent aux valeurs nominales. Les différents calculs utilisés dans cette section tiennent compte des dimensions réelles des transistors, mesurées au microscope électronique à balayage. Signalons enfin que les transistors sélectionnés pour cette étude sont situés à proximité sur l'échantillon afin de limiter les effets de dispersion des propriétés électriques.

Pour estimer les courants de recombinaison de périphérie, la relation (4.4) est appliquée aux résultats des mesures statiques. La Figure 4.8.a montre ainsi l'évolution de J_C/β en fonction du rapport P_E/A_E pour différentes densités de courant collecteur J_C dans le cas des composants non auto-alignés dont la distance émetteur-base d_{E-B} est de 0,3 μm . De même, la Figure 4.8.b compare l'évolution de J_C/β en fonction du rapport P_E/A_E pour les trois technologies étudiées à $J_C = 10^4 \text{ A/cm}^2$. Comme indiqué précédemment, l'ordonnée à l'origine de ces courbes donne $J_{rB,int}$ et leur pente représente la somme de $(K_{rB,surf} + K_{rB,cont})$.

La Figure 4.8.b révèle une différence de pente entre les technologies non auto-alignée et la technologie auto-alignée indiquant une augmentation du courant de périphérie $(K_{rB,surf} + K_{rB,cont})$ dans le cas des TBH auto-alignés. On retrouve cette tendance quelque soit la densité de courant collecteur comme le montre la Figure 4.9 qui présente l'évolution de

$(K_{rB,surf} + K_{rB,cont})$ en fonction de la densité de courant J_C , extraits à partir de courbes similaires à celles de la Figure 4.8.

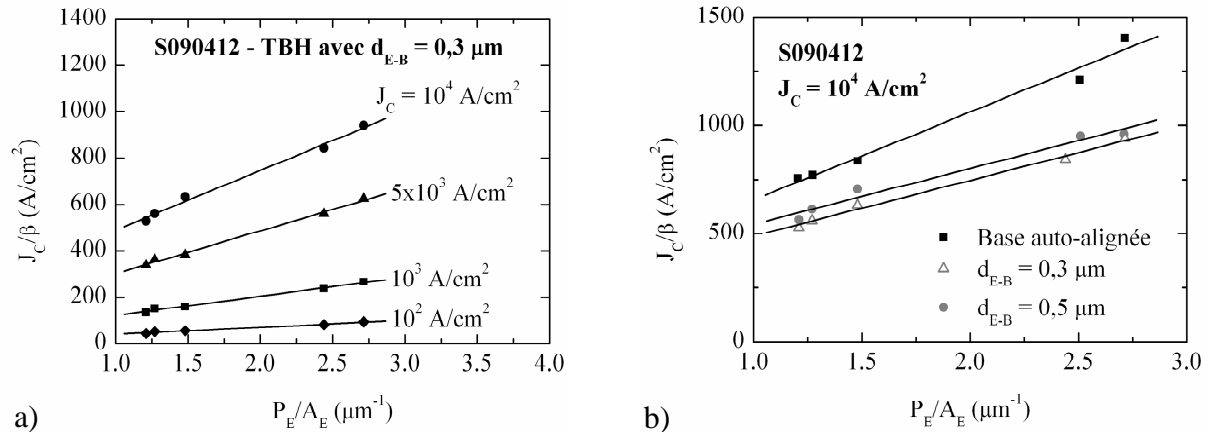


Figure 4.8 : Evolution de J_C/β en fonction du rapport P_E/A_E pour
 a) la technologie $d_{E-B} = 0,3 \mu\text{m}$, à différentes densités de courant collecteur
 b) les trois technologies étudiées (auto-alignée, $d_{E-B} = 0,3 \mu\text{m}$ et $d_{E-B} = 0,5 \mu\text{m}$), à une densité de courant de collecteur $J_C = 10^4 \text{ A/cm}^2$

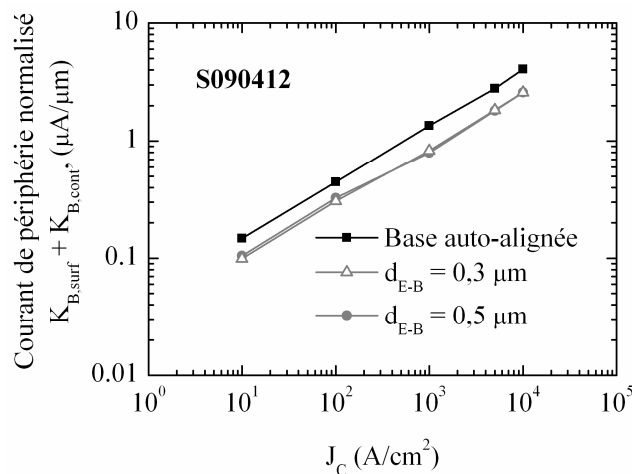


Figure 4.9 : Courant de périphérie normalisé $(K_{rB,surf} + K_{rB,cont})$ en fonction de la densité de courant collecteur J_C pour les TBDH $\text{AlInAsSb/GaInSb/AlInAsSb}$ (S090412)

Ainsi, à $J_C = 10^4 \text{ A/cm}^2$, $(K_{rB,surf} + K_{rB,cont})$ est de l'ordre de $2,7 \mu\text{A}/\mu\text{m}$ pour les technologies non auto-alignés et de l'ordre de $4 \mu\text{A}/\mu\text{m}$ pour la technologie auto-alignée. Cette différence est attribuée à une augmentation du courant $K_{rB,cont}$ dans le cas de la technologie auto-alignée. En effet, cette composante du courant de base est liée aux porteurs minoritaires de la base qui diffusent latéralement vers le contact de base. Comme la densité de porteurs décroît rapidement quand on s'éloigne du bord de la région de base intrinsèque [Liu92a], $K_{rB,cont}$ est faible quand la distance émetteur-base est grande (cas de nos technologies non auto-alignées avec $d_{E-B} \geq 0,3 \mu\text{m}$). Cependant, la technique de l'auto-alignement de la base, utilisée pour

limiter la résistance de base extrinsèque et la capacité base-collecteur afin d'augmenter les performances dynamiques des composants, introduit une faible distance émetteur-base (de l'ordre de la profondeur de la sous-gravure de l'émetteur), susceptible d'augmenter $K_{rB,cont}$. La distance émetteur-base minimum nécessaire pour éviter une dégradation du gain en courant du fait de courant de recombinaison au niveau du contact de base a été étudiée théoriquement par Liu et al. [Liu92a]. Les résultats de leur étude indiquent qu'elle dépend du niveau de dopage et de l'épaisseur de la base ainsi que de la largeur de l'émetteur et qu'elle varie de 400 à 1300 Å dans le cas des TBH AlGaAs/GaAs.

Tableau 4.4 : Comparaison des niveaux de courant de périphérie normalisé pour différents TBH non passivés avec base uniforme, extraits à $J_C = 10^4 \text{ A/cm}^2$

Filière	Type	Technologie SA / NSA*	Dopage base (cm^{-3})	Épaisseur base (Å)	Jonction émetteur-base	$K_{rB,surf} + K_{rB,cont}$ ($\mu\text{A}/\mu\text{m}$)	Références
AlInAsSb/GaInSb	TBDH	SA	1×10^{19}	400	abrupte	4	Ce travail
		NSA				$\sim 2,7$	
AlGaAs/GaAs	TBSH	SA	4×10^{19}	800	graduelle	~ 8	[Hayama90]
AlGaAs/GaAs	TBSH	NSA	5×10^{18}	1000	graduelle	1,76	[Liu92b]
AlGaAs/GaAs	TBSH			500		1,6	
AlGaAs/GaAs	TBSH			200		0,28	
GaInP/GaAs	TBSH	NSA	4×10^{19}	500	abrupte	0,12	[Hsin00]
GaInP/GaAs	TBDH			500		0,016	
GaInP/GaAs	TBDH			200		0,02	
GaInP/GaAs	TBSH	NSA	3×10^{19}	600	abrupte	1,86	[Ito93]
InP/GaAsSb	TBDH	NSA et SA	3×10^{19}	200	abrupte	0,6	[Tao05]

* SA : auto-alignée, NSA : non auto-alignée

Pour comparaison, le Tableau 1.3 rassemble quelques valeurs de ($K_{rB,surf} + K_{rB,cont}$) tirées de travaux rapportés dans la littérature sur différentes filières de TBH. Notons que ces valeurs concernent uniquement des TBH non passivés avec une base uniforme. On constate que les niveaux de courant de périphérie caractérisés expérimentalement dans le cadre de notre étude sont dans la gamme de ceux obtenus pour les TBH AlGaAs/GaAs. Les études menées sur TBH AlGaAs/GaAs montrent que le courant de recombinaison en surface est favorisé par :

- une vitesse de recombinaison en surface de base élevée (de l'ordre de 10^6 - 10^7 cm/s sur GaAs (résiduel n) [Casey77]),
- une absence de sélectivité chimique marquée entre l'émetteur AlGaAs et la base GaAs qui renforce le risque de sur-gravure de la base : la jonction EB est alors exposée comme illustré sur la Figure 4.10 [Hsin00]. Ainsi, le gain en courant des TBH GaInP/GaAs apparaît moins sensible au rapport P_E/A_E du fait, d'une part de la vitesse

de recombinaison en surface plus importante pour AlGaAs que pour GaInP [Pearson94], mais également de la sélectivité de gravure existante entre l'émetteur GaInP et la base GaAs qui réduit le risque d'exposer la jonction EB [Hsin00].

Tout comme pour les TBH AlGaAs/GaAs, les forts courants de recombinaison en surface de nos TBDH AlInSb/GaInSb/AlInSb peuvent en partie s'expliquer par les faibles sélectivités de gravure mise en jeu lors la formation du mesa d'émetteur (cf. paragraphe 3.2.4) qui ne permettent pas un arrêt suffisamment précis sur la base en $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$.

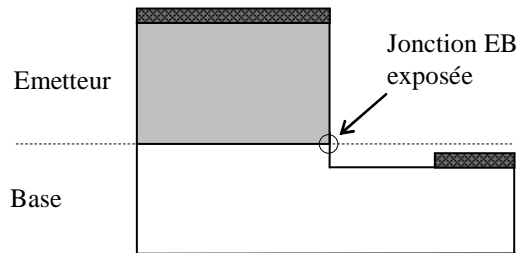


Figure 4.10 : Représentation schématique de la sur-exposition de la jonction émetteur-base

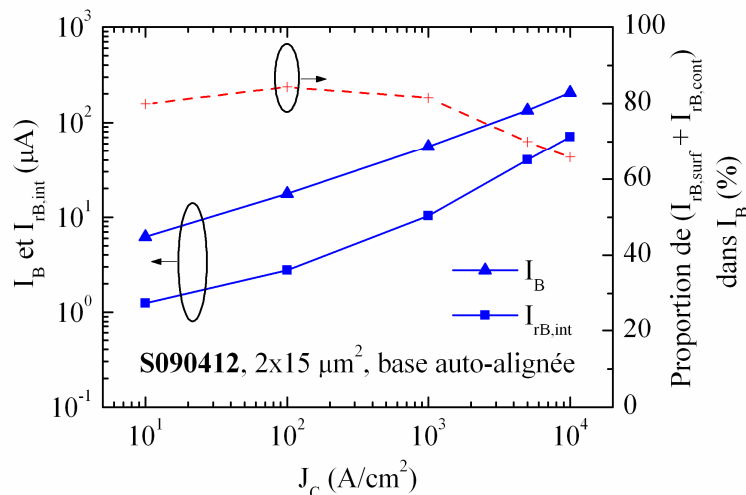


Figure 4.11 : Comparaison du courant de base total I_B , du courant de recombinaison en volume $I_{rB,int}$ et pourcentage des courants de périphérie ($I_{rB,surf} + I_{rB,cont}$) dans I_B à plusieurs densités de courant collecteur J_C pour un TBH $2 \times 15 \mu\text{m}^2$ avec base auto-alignée

La Figure 4.11 présente une comparaison du courant de base total I_B et du courant de recombinaison en volume $I_{rB,int}$ extrait ainsi que le ratio $(I_{rB,surf} + I_{rB,cont})/I_B$ en fonction de la densité de courant collecteur pour un TBH $2 \times 15 \mu\text{m}^2$ avec base auto-alignée. Il apparaît que $(I_{rB,surf} + I_{rB,cont})$ représente déjà plus de 80 % du courant de base total pour $10 < J_C < 1 \text{ kA/cm}^2$ et plus de 60 % à plus forte injection. Ceci démontre l'importance de la contribution des courants de périphérie au courant de base total I_B dans nos TBH à base $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$ et

laisse entrevoir le fort potentiel en termes de gain en courant de cette filière, si ces courants parasites de surface sont réduits.

4.1.3.C. Mécanismes de recombinaison en surface

Les effets de recombinaison en surface ont été étudiés pour les TBH AlGaAs/GaAs [Tiwari88, Hayama90], GaInP/GaAs [Liu93, Bourguiga99], InP/GaInAs [Rohner01, Jin04] et InP/GaAsSb [Tao05, Liu08, Zeng08]. Ainsi, bien que la vitesse de recombinaison en surface du GaInAs soit beaucoup plus faible que celle du GaAs (d'un facteur 10^3), les TBH InP/InGaAs sont également affectés par les recombinaisons en surface, si une passivation efficace n'est pas appliquée. Ceci provient du fait que les effets de recombinaison en surface peuvent intervenir via deux mécanismes distincts :

1. Les électrons directement injectés dans la région intrinsèque de base subissent une dispersion avec un grand angle et sont défléchis au voisinage de la surface de base extrinsèque et/ou du contact de base, où ils se recombinaison.

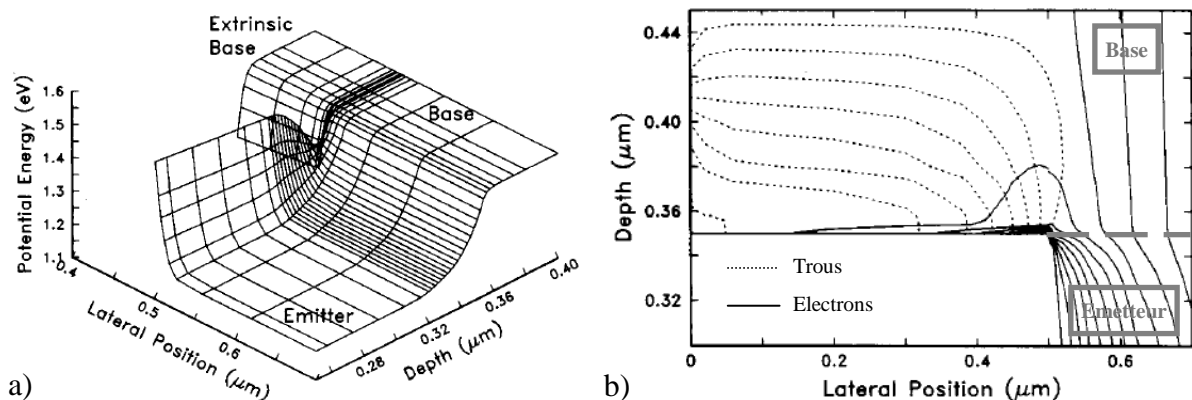


Figure 4.12 : a) Profil de potentiel de la jonction E/B graduelle d'un TBH AlGaAs/GaAs illustrant la formation du col qui favorise le passage des électrons de l'émetteur vers la surface de base extrinsèque. b) Lignes de courant correspondantes (d'après [Tiwari89])

2. Le deuxième mécanisme a été décrit en détail par Tiwari pour les TBH AlGaAs/GaAs et est illustré sur la Figure 4.12 [Tiwari89]. Signalons que le cas présenté par ce modèle est simple puisqu'il correspond à une hétérojonction E/B graduelle, il s'applique néanmoins bien à la structure S090412 pour laquelle les bandes de conduction à la jonction émetteur-base sont alignées. Ainsi, Tiwari montre que la courbure des bandes à la surface de l'hétérojonction E/B, résultante de l'ancrage du niveau de Fermi, crée un champ électrique qui attire les porteurs de l'émetteur vers la surface de base. En effet, le raccordement de la barrière de surface de l'émetteur avec celle de la base entraîne la formation, à l'intérieur de la zone de charge d'espace, d'un « col » au niveau de la bande de conduction qui facilite le passage des électrons depuis l'émetteur vers la surface de base extrinsèque (cf. Figure 4.12.a). Les

porteurs sont alors directement injectés de l'émetteur vers la base extrinsèque par l'intermédiaire d'un canal de conduction présent à l'intersection du bord du mesa d'émetteur et de la surface de base extrinsèque. Les caractéristiques de cette zone d'accumulation dépendent de l'ancrage des niveaux de Fermi à la surface du mesa d'émetteur et de la base extrinsèque, des paramètres de l'hétérojonction et des conditions de polarisation de la jonction E/B. Une fois que les porteurs atteignent la surface de base, ils se recombinent par un mécanisme SRH ou au niveau du contact de base.

Le deuxième mécanisme est clairement indépendant des phénomènes de transport dans la base (les électrons n'ayant pas pénétré la région intrinsèque de base), tandis que le premier mécanisme peut être en principe atténué en adoptant des stratégies qui réduisent la probabilité que les électrons atteignent la surface de base extrinsèque. C'est le cas des TBH à hétérojonction E/B abrupte et à bases fines, où les porteurs sont injectés orthogonalement à la jonction avec un surplus d'énergie cinétique et ont donc moins tendance à diffuser latéralement vers la surface de base extrinsèque [Hsin00]. C'est aussi ce qui se produit lorsque la base est graduelle, les électrons étant captés par le pseudo-champ électrique [Liu91].

Les résultats expérimentaux décrits au paragraphe précédent et l'état actuel de nos connaissances sur les matériaux qui composent notre structure ne permettent pas de conclure sur la prédominance de l'un ou l'autre des mécanismes cités ci-dessus dans les TBH à base $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$.

4.1.3.D. Conclusion

Les recombinaisons de périphérie, qu'elles interviennent au niveau de la surface de base extrinsèque ou au niveau du contact de base, apparaissent comme un paramètre très limitatif du gain en courant de nos transistors de petites dimensions. Des densités de courant de recombinaison en périphérie ($K_{rB,surf} + K_{rB,cont}$) importantes ont en effet été mises en évidence expérimentalement.

Afin de limiter ces effets de recombinaisons et permettre la réduction des dimensions des TBH, nécessaire à l'augmentation des performances dynamiques des composants, des études complémentaires seront indispensables et devront porter sur :

- l'optimisation du dessin des transistors et notamment de la distance émetteur-base afin d'éviter toute dégradation du gain en courant du fait des recombinaisons au niveau du contact de base,
- la recherche d'une méthode de passivation adaptée (auto-passivation par la couche d'émetteur (ledge), traitement à base de sulfures) afin de modifier la courbure des bandes à la surface et de supprimer la concentration d'électrons minoritaires qui atteignent la surface de base extrinsèque,

- et/ou l'adoption de stratégie « via le transport électronique » (base fine, introduction d'un pseudo-champ dans la base) afin de réduire la probabilité que les électrons rejoignent la surface de base extrinsèque.

4.2. Comportement dynamique des TBH à base $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$

Nous étudions dans cette partie le comportement dynamique des TBH à base $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$ à partir de la mesure des paramètres S effectuée, à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel, sur une gamme de fréquence de 250 MHz à 40 ou 50 GHz. Les dispositifs mesurés sont ceux qui présentent les meilleures caractéristiques statiques. Nous comparons rapidement les performances dynamiques des structures dont les principaux paramètres ont été rappelés au début de ce chapitre puis nous concentrons notre étude sur les TBH de la structure à double hétérojonction $\text{AlInAsSb}/\text{GaInSb}/\text{AlInAsSb}$ (S090412). L'extraction des divers éléments parasites (capacités et résistances) à partir du schéma équivalent, nous permet d'étudier leur influence sur les performances dynamiques des dispositifs. Les résultats permettent d'identifier les principales limitations et ainsi de cibler les axes d'amélioration pour la montée en fréquence.

4.2.1. Fréquences de coupure (f_T, f_{MAX})

Les meilleurs résultats hyperfréquences obtenus au cours de cette étude sont représentés sur la Figure 4.13 qui présente l'évolution des gains dynamiques en courant (H_{21}) et en puissance (U) en fonction de la fréquence. Ces résultats ont été mesurés sur la structure à double hétérojonction $\text{AlInAsSb}/\text{GaInSb}/\text{AlInAsSb}$ (S090412) sur un composant de surface d'émetteur de $1 \times 15 \mu\text{m}^2$.

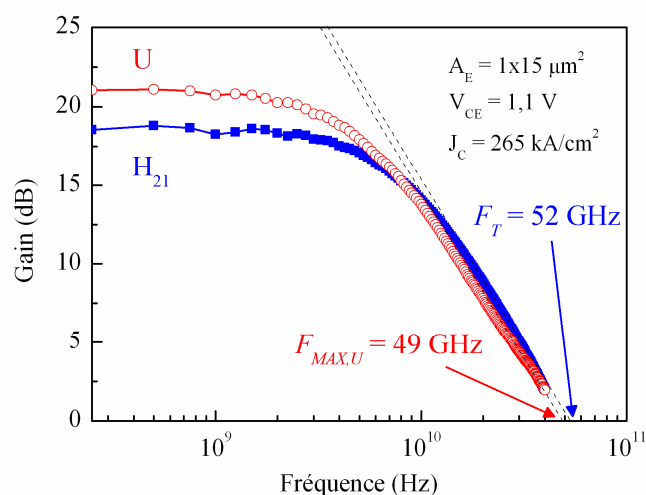


Figure 4.13 : Gains en courant et en puissance en fonction de la fréquence pour un TBDH $\text{AlInAsSb}/\text{GaInSb}/\text{AlInAsSb}$ de surface d'émetteur $1 \times 15 \mu\text{m}^2$ (structure S090412)

Une fréquence de transition et une fréquence maximale d'oscillation de 52 GHz et 48 GHz sont respectivement obtenues par extrapolation des gains en courant et de Mason selon une pente de -20 dB/décade. Ces résultats sont modestes mais constituent cependant la première démonstration du fonctionnement dynamique d'un TBH à base GaInSb.

Le Tableau 4.5 compare les performances hyperfréquences des structures TBDH AlInSb/GaInSb/AlInAsSb (S090413), TBSH AlInAsSb/GaInSb (S090411) et TBDH AlInAsSb/GaInSb/AlInAsSb (S090412), en précisant les conditions dans lesquelles les dispositifs ont été mesurés. Le comportement dynamique de la structure TBSH AlInSb/GaInSb (S090114) n'a pas été étudié, les dispositifs ayant démontré de faibles performances en statique.

Tableau 4.5 : Comparaison des performances hyperfréquences des TBH à base $Ga_{0,65}In_{0,35}Sb$ de surface d'émetteur $2 \times 15 \mu m^2$

Structure	V_{CE} (V)	J_C (kA/cm ²)	f_T (GHz)	f_{MAX} (GHz)
<u>S090413</u> TBDH AlInSb/GaInSb/AlInAsSb	1,5	77	33	24
<u>S090411</u> TBSH AlInAsSb/GaInSb	1,1	78	30	19
<u>S090412</u> TBDH AlInAsSb/GaInSb/AlInAsSb	1,1	98	45	37

Comme attendu (cf. chapitre 2), les meilleures performances sont obtenues pour le TBDH avec émetteur en AlInAsSb (S090412). C'est pourquoi, dans ce qui suit, nous nous attachons à mettre en évidence les principaux éléments qui limitent les performances dynamiques de ces transistors.

4.2.2. Influence des conditions de polarisation

Il s'agit ici d'analyser l'évolution des performances fréquentielles avec la densité de courant de collecteur pour plusieurs tensions de polarisation V_{CE} .

La Figure 4.14 présente ainsi la variation de la fréquence de transition f_T en fonction de la densité de courant à différentes tensions de polarisation V_{CE} pour un TBDH AlInAsSb/GaInSb/AlInAsSb de dimensions nominales d'émetteur de $1 \times 15 \mu m^2$. On observe sur chaque courbe la présence d'un maximum qui se décale vers les fortes densités de courant de collecteur lorsque la tension V_{CE} augmente. En raison de la caractéristique exponentielle de la diode émetteur-base, la tension V_{BE} requise pour injecter des densités de courant entre 100 kA/cm² et 300 kA/cm² varie peu autour de 0,55 V. L'augmentation de V_{CE} entraîne donc principalement une augmentation de la tension inverse appliquée à la jonction base-collecteur. Le décalage observé des maxima des courbes de f_T vers les fortes densités de courant est ainsi

attribué à l'augmentation de la tension base-collecteur. Ce comportement est typique d'une limitation des performances dynamiques du transistor par effet Kirk, phénomène introduit au paragraphe 1.3.5. En effet, le décalage de la densité de courant critique vers les densités de courant plus élevées quand V_{CB} augmente est en adéquation avec l'équation (1.27).

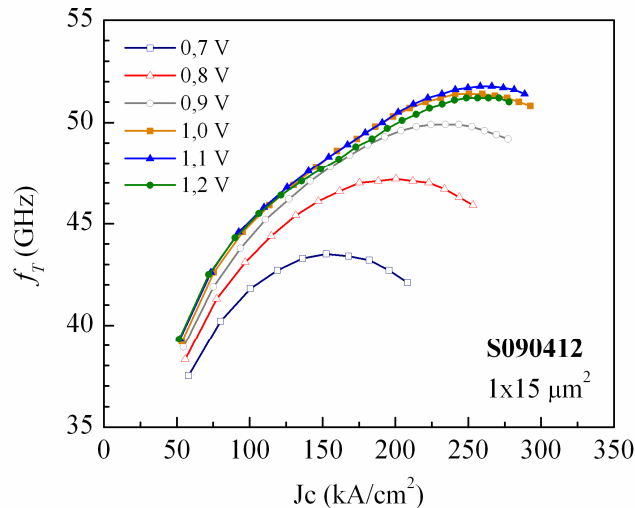


Figure 4.14 : Fréquence de coupure du gain en courant pour différentes tensions V_{CE} d'un TBH $AlInAsSb/GaInSb/AlInAsSb$ (S090412) de doigt d'émetteur $1 \times 15 \mu m^2$

Pour une valeur de polarisation élevée supérieure à 1,2 V, on constate par ailleurs une diminution de la fréquence de transition f_T maximale. Cette décroissance peut s'expliquer par le fait que pour des tensions base-collecteur inverses élevées, le champ électrique induit dans un collecteur fin (cas de cette étude où l'épaisseur de collecteur est de 1500 \AA) atteint des valeurs importantes [Kahn04]. L'importante énergie cinétique acquise par les électrons dans le collecteur augmente alors leur probabilité de transfert en vallée latérale, où leur masse effective est augmentée et leur vitesse diminuée. Ceci entraîne une augmentation du temps de transit de collecteur, qui explique la décroissance de f_T pour les polarisations au-delà de 1,2 V.

4.2.3. Extraction du modèle petit signal

Dans cette partie, nous évoquons brièvement la méthode d'extraction des éléments du schéma équivalent utilisée dans le cadre de ces travaux.

4.2.3.A. Extraction des éléments localisés

L'extraction des paramètres significatifs du transistor bipolaire (résistances d'accès, capacités de jonction, capacités parasites...) nécessite de s'appuyer sur un schéma équivalent, puis de définir une stratégie d'extraction dépendante du schéma retenu pour modéliser le TBH. L'approche retenue dans la suite de l'étude s'appuie sur l'expérience acquise à l'IEMN sur la modélisation petit signal de TBH SiGe et utilise un schéma en T présenté sur la Figure 4.15.

La méthode d'extraction des éléments du schéma équivalent petit signal de nos composants n'est pas détaillée ici mais est décrite en détail dans [Geynet08b, Waldhoff09].

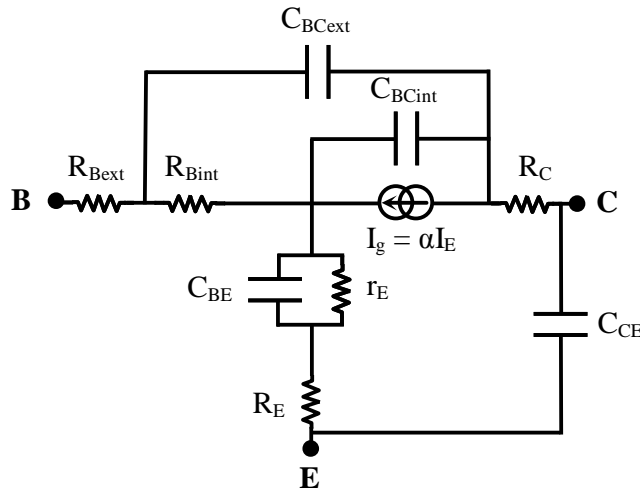


Figure 4.15 : Schéma équivalent du modèle petit signal en T

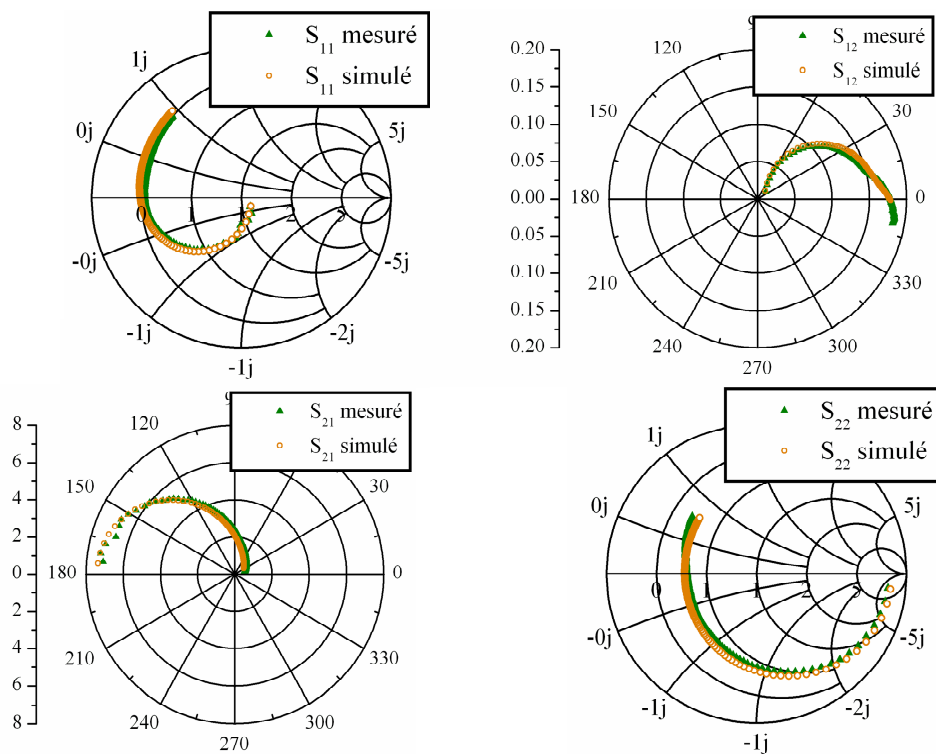


Figure 4.16 : Paramètres S mesurés et simulés jusqu'à 50 GHz pour un TBH $\text{AlInAsSb/GaInSb/AlInAsSb}$ (S090412) de dimensions d'émetteur $1 \times 15 \mu\text{m}^2$

Signalons néanmoins qu'afin de valider le modèle, les paramètres S mesurés ont systématiquement été comparés aux paramètres S simulés à partir des éléments extraits. Pour compléter la validation, les gains dynamiques en courant et en puissance sont également

calculés à partir des paramètres S simulés et confrontés à ceux extraits des paramètres S mesurés. Les figures 4.15 et 4.16 présentent les résultats d'une telle comparaison.

On observe une très bonne corrélation entre la mesure et la simulation sur toute la gamme de fréquences. Ce modèle a ainsi pu être utilisé pour extraire les paramètres extrinsèques et intrinsèques de nos TBH à base GaInSb et ce, afin de mettre en évidence les axes d'amélioration pour une montée en fréquence.

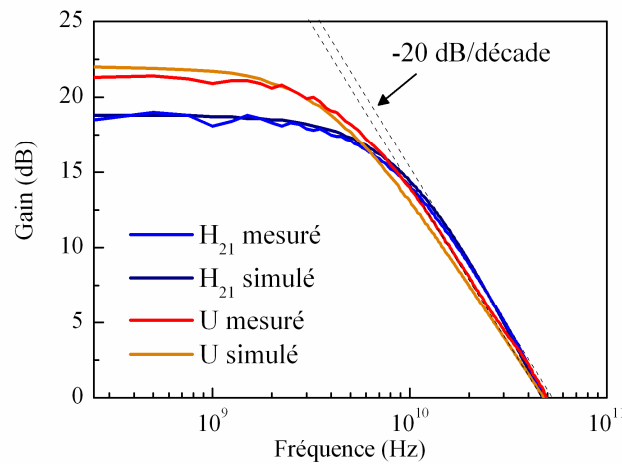


Figure 4.17 : Evolution du gain en courant H_{21} et du gain de Mason U mesurés et simulés pour un TBH AlInAsSb/GaInSb/AlInAsSb (S090412) de dimensions d'émetteur $1 \times 15 \mu\text{m}^2$

4.2.3.B. Extraction du temps de transit base-collecteur

L'extraction du temps de transit base-collecteur est réalisée à partir de l'étude de l'évolution du temps de transit total τ_{EC} des porteurs à travers la structure.

La reformulation de l'équation (1.36), qui définit la fréquence de transition f_T , nous permet d'écrire le temps de transit global sous la forme :

$$\tau_{EC} = \frac{1}{2\pi f_T} = \tau_F + (R_E + R_C)C_{BC} + r_E(C_{BE} + C_{BC}) \quad \text{avec} \quad r_E = \frac{n_{EB}kT}{qI_E} \quad (4.5)$$

où τ_F représente le temps de transit à travers la base et la zone déplétée du collecteur et n_{EB} est le coefficient d'idéalité de la jonction émetteur-base.

Ainsi, la Figure 4.18 présente l'évolution du temps de transit des porteurs τ_{EC} en fonction de l'inverse du courant d'émetteur $1/I_E$. Cette courbe présente deux régions distinctes. Pour les courants inférieurs à 33 mA ($1/I_E > 30 \text{ A}^{-1}$), elle a un comportement linéaire lié à la décroissance de la résistance dynamique d'émetteur r_E . La relation précédente montre que la partie linéaire de cette courbe peut être exploitée pour accéder à :

- la somme des capacités ($C_{BE}+C_{BC}$) à partir de la pente,

- la quantité $\tau_F + (R_E + R_C)C_{BC}$ à partir de l'ordonnée à l'origine. La connaissance des valeurs de R_E , R_C et C_{BC} extraits à partir des paramètres S permet alors d'évaluer le temps de transit base-collecteur τ_F .

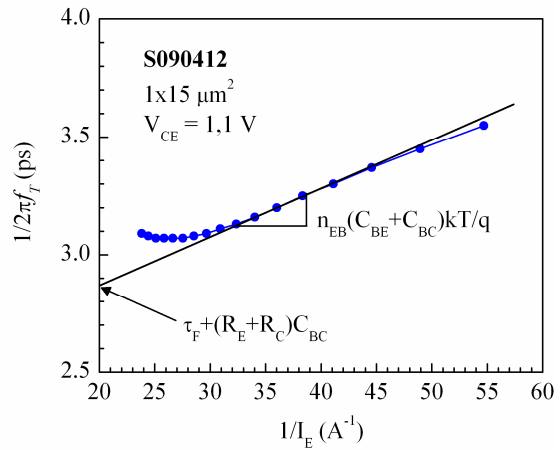


Figure 4.18 : Evolution de τ_{EC} en fonction de l'inverse du courant d'émetteur pour un TBH $AlInAsSb/GaInSb/AlInAsSb$ (S090412) de dimensions d'émetteur $1 \times 15 \mu m^2$

4.2.4. Influence des dimensions sur les performances dynamiques

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'influence de la longueur et de la largeur d'émetteur sur les performances dynamiques de nos TBH $AlInAsSb/GaInSb/AlInAsSb$ (S090412) ainsi que l'effet de la diminution de la distance émetteur-base par auto-alignement de la base.

Tableau 4.6 : Synthèse des performances des TBH $AlInAsSb/GaInSb/AlInAsSb$ (S090412) de différentes topologies

Dimension d'émetteur (μm^2)	Distance émetteur-base	r_E (Ω)	R_E (Ω)	R_B (Ω)	R_C (Ω)	C_{BC} (fF)	C_{BE} (fF)	τ_F (ps)	f_T (GHz)	f_{MAX} (GHz)
2x15	0,5 μm	1,2	4,8	21,9	10,4	185	121	0,51	44	23
2x15	auto-aligné	1,2	3,9	11,2	9,7	188	122	0,57	45	37
2x10	auto-aligné	1,3	4,5	15,2	14,3	148	83	0,53	44	36
2x5	auto-aligné	2,8	12	28,5	18,3	106	38	0,54	39	34
1x15	auto-aligné	1,37	5,9	8,4	10,2	141	59	0,58	52	49
1x10	auto-aligné	2,6	10,5	12,3	11,5	109	40	0,52	48	44

Pour servir de base à cette étude, le Tableau 4.6 donne les résultats de l'extraction réalisée à l'optimum des performances à partir de la méthode qui vient d'être introduite pour six topologies différentes. Notons que le fait que l'on obtienne des temps de transit base-collecteur τ_F proches (de l'ordre de 0,55 ps) quelle que soit la dimension du transistor met en évidence la bonne qualité de l'extraction.

4.2.4.A. Influence des dimensions d'émetteur

La Figure 4.19 présente l'évolution des fréquences de coupure et des temps de charge critiques en fonction de la longueur d'émetteur L_E pour des TBH avec base auto-alignée de largeurs W_E de 1 et 2 μm . Les données rassemblées ici sont extraites du Tableau 4.6.

On s'intéresse tout d'abord à l'évolution des fréquences de coupure avec la longueur d'émetteur. Quelque soit la largeur d'émetteur l_E , on constate sur la Figure 4.19.a, que f_T augmente avec la longueur d'émetteur. Cette augmentation est largement conditionnée, comme le montre la Figure 4.19.b par la diminution du produit $(R_E+R_C)C_{BC}$. L'évolution de ce temps de charge s'explique par le fait que la diminution des résistances d'émetteur et de collecteur est plus importante que l'augmentation de la capacité base-collecteur associée à l'allongement du doigt d'émetteur. La croissance de f_{MAX} avec L_E s'explique de la même manière, l'augmentation de C_{BC} étant surcompensée par la diminution simultanée des composantes intrinsèque et extrinsèque de la résistance de base (Figure 4.19.b).

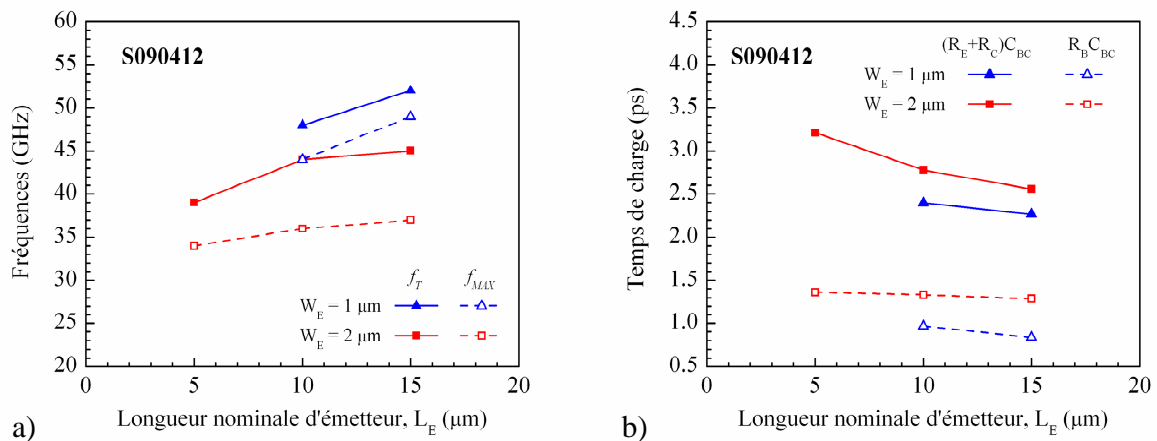


Figure 4.19 : Influence des dimensions d'émetteur sur a) les fréquences de coupure et b) les temps de charge critiques

La Figure 4.19.a met également en évidence une augmentation des fréquences de coupure lorsque la largeur d'émetteur est réduite de 2 à 1 μm . Comme le montre la Figure 4.19.b, l'augmentation de f_T est liée à la diminution de $(R_E+R_C)C_{BC}$ associée à la réduction de C_{BC} . Ainsi, f_T ne dépend pas essentiellement des dimensions verticales et est fortement dépendante des autres retards. Nous reviendrons sur ce point par la suite. On note enfin que l'augmentation de f_{MAX} est plus significative lorsque la largeur d'émetteur diminue. Ceci se

comprend aisément par la diminution de la capacité base-collecteur et de la résistance intrinsèque de base qui entraîne une décroissance du produit $R_B C_{BC}$ (Figure 4.19.b).

4.2.4.B. Influence de la distance émetteur-base

On étudie ici l'influence de la distance émetteur-base sur les performances fréquentielles de nos TBH à base GaInSb. L'effet de la variation de ce paramètre est illustré sur la Figure 4.20.a qui présente l'évolution des fréquences de coupure de deux composants de dimensions d'émetteur $2 \times 15 \mu\text{m}^2$ qui se différencient par leur technologie. Le premier utilise une technologie avec auto-alignement de la base pour laquelle la distance émetteur-base correspond à la profondeur de sous-gravure de l'émetteur (de l'ordre de $0,06 \mu\text{m}$) et pour le second, la couronne de base est déposée à $0,5 \mu\text{m}$ du contact d'émetteur (Figure 4.20.b).

Les valeurs des résistances et capacités parasites extraites des paramètres S au maximum de f_T sont rapportées dans le Tableau 4.6 pour ces deux dispositifs. On note que la plupart des paramètres sont similaires, à l'exception de la résistance de base.

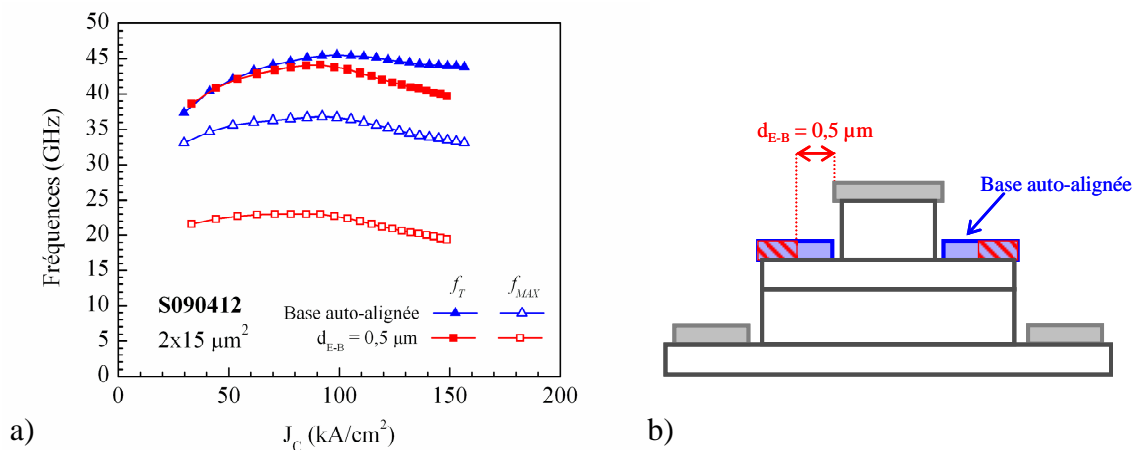


Figure 4.20 : a) Influence de la distance émetteur-base sur les fréquences de coupure pour des TBH AlInAsSb/GaInSb/AlInAsSb (S090412) de dimensions d'émetteur $2 \times 15 \mu\text{m}^2$
 b) Représentation schématique des deux configurations étudiées

On constate ainsi sur la Figure 4.20 que f_T n'évolue quasiment pas alors que f_{MAX} est largement amélioré quand la distance émetteur-base est réduite à la profondeur de sous-gravure. L'augmentation de plus de 60 % de ce facteur de mérite est essentiellement due à la réduction de la résistance extrinsèque de base.

La résistance de base est la somme de trois composantes : la résistance intrinsèque R_{Bint} , la résistance d'accès $R_{Baccès}$ et la résistance de contact R_{Bc} (cf. Figure 1.22). Elle peut être calculée à partir des données géométriques et technologiques par [Griffith05] :

$$R_B = R_{Bint} + R_{Baccès} + R_{Bc} \quad (4.6)$$

$$R_{Bint} = R_{\square Bint} \frac{W_E}{12L_E} \quad (4.7)$$

$$R_{Baccès} = R_{\square Bext} \frac{d_{E-B}}{2L_E} \quad (4.8)$$

$$R_{Bc} = \frac{\sqrt{R_{\square Bext} \rho_{CB}}}{2L_E} \coth \left(W_B \sqrt{\frac{R_{\square Bext}}{\rho_{CB}}} \right) \quad (4.9)$$

où W_E et L_E sont respectivement la largeur et la longueur de l'émetteur, d_{E-B} la distance entre l'émetteur et le contact de base, W_B la largeur du contact de base et ρ_{CB} la résistivité spécifique de contact de base. $R_{\square Bint}$ et $R_{\square Bext}$ correspondent à la résistance de la couche de base respectivement dans la partie intrinsèque et la zone extrinsèque du composant. $R_{\square Bext}$ est supérieure à $R_{\square Bint}$ du fait du manque de sélectivité de gravure entre l'AlInAsSb de l'émetteur et la couche de base (cf. paragraphe 3.2.4.B). Ainsi, $R_{\square Bint}$ ($\sim 550 \Omega$) est évaluée à partir des valeurs de mobilité des trous dans $Ga_{0,65}In_{0,35}Sb$ extraites des mesures par effet Hall et $R_{\square Bext}$ ($\sim 845 \Omega$) est extrait des mesures TLM (cf. Tableau 3.5).

Le Tableau 4.7 compare les valeurs des différentes composantes de la résistance de base extraites des paramètres S et calculées à l'aide des expressions précédentes pour les deux TBH $2 \times 15 \mu m^2$. La différence de R_{Bext} entre ces deux composants est le résultat de la réduction de $R_{Baccès}$ qui passe de 10,35 à 1,7 Ω lorsque la distance émetteur-base est diminuée de 0,5 μm .

Tableau 4.7 : Décomposition de la résistance de base pour des TBH AlInAsSb/GaInSb/AlInAsSb (S090412) de dimensions d'émetteur $2 \times 15 \mu m^2$

Composant	Distance émetteur-base	Paramètres extraits (Ω)		Paramètres calculés (Ω)		
		R_{Bint}	R_{Bext}	R_{Bint}	R_{Bext}	
					$R_{Baccès}$	R_{Bc}
2x15	0,5 μm	5,7	16,2	5,79	10,35	4,79
2x15	auto-aligné	5,9	5,3	5,79	1,7	4,79

4.2.5. Synthèse sur la répartition du temps de transit total

La répartition des temps de charge correspondant au maximum de f_T de chacun des dispositifs avec base auto-alignée étudiés au paragraphe précédent est présentée sur la Figure 4.21.

On constate que la constante de temps $\tau_E(C_{BE}+C_{BC})$ est comprise entre 0,25 et 0,4 ps et représente environ 10 % du temps de transit global. On retrouve par ailleurs le temps de transit base-collecteur τ_F de l'ordre de 0,55 ps dont la contribution s'élève à près de 15 %. On note enfin que c'est le temps de charge $(R_E+R_C)C_{BC}$ qui limite essentiellement la fréquence de transition. Il représente en effet plus de 70 % du temps de transit total quelque soit la dimension de l'émetteur. C'est pourquoi nous proposons, pour finir ce chapitre, de nous

intéresser de plus près à l'origine de ce temps de charge en excès dans nos composants à partir de l'étude de la capacité base-collecteur et des résistances d'émetteur et de collecteur.

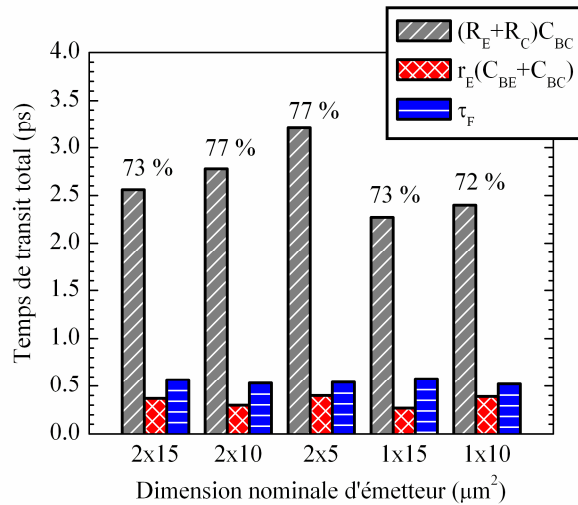


Figure 4.21 : Répartition des temps de charge pour différentes dimensions d'émetteur

4.2.6. Origine des éléments localisés en excès et voies d'amélioration

D'après tout ce qui précède, et en particulier les résultats donnés sur la Figure 4.21, il ressort que la fréquence de transition des transistors étudiés ici est principalement pénalisée par le temps de charge $(R_E+R_C)C_{BC}$. Nous nous concentrons donc sur l'analyse de ces éléments parasites et explorons les voies d'amélioration à mettre en place pour une montée en fréquence.

4.2.6.A. Capacité base-collecteur

On s'intéresse tout d'abord à la capacité base-collecteur C_{BC} . Les valeurs élevées de C_{BC} rassemblées dans le Tableau 4.6 sont en partie imputables aux dimensions du collecteur utilisées pour la réalisation de ce démonstrateur. Cependant, l'étude des variations de C_{BC} avec la surface de collecteur (Figure 4.22) nous permet d'affirmer qu'un autre effet est responsable de cette capacité en excès.

En effet, un fit linéaire des points de la Figure 4.22, nous donne une variation de capacité de l'ordre de $2 \text{ fF}/\mu\text{m}^2$ et une capacité constante négligeable ($\sim 1,5 \text{ fF}$). Cette capacité surfacique de $2 \text{ fF}/\mu\text{m}^2$ correspond à une profondeur de déplétion dans la couche de collecteur d'environ 650 \AA alors que l'épaisseur de la couche de collecteur est égale à 1500 \AA . Ceci indique que le collecteur n'est pas complètement déplété au maximum des performances dynamiques (i.e. en forte injection) alors qu'il devrait l'être, compte tenu des niveaux de dopage de base et de collecteur mis en jeu. Pour mieux comprendre ce phénomène, une analyse SIMS a été entreprise sur la structure S090412 afin d'accéder au profil de concentration du dopage Te au sein de la couche active.

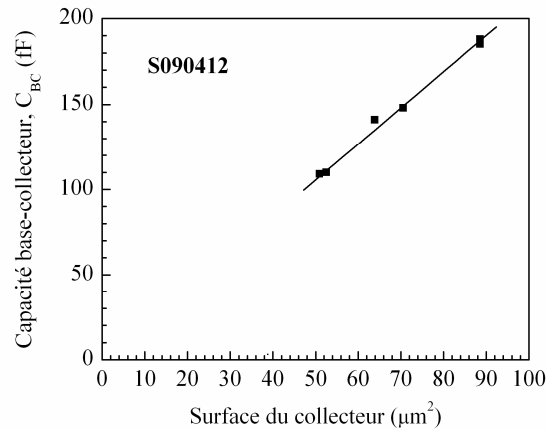


Figure 4.22 : Evolution de la capacité base-collecteur avec la surface de collecteur pour les TBDH AlInAsSb/GaInSb/AlInAsSb (S090412)

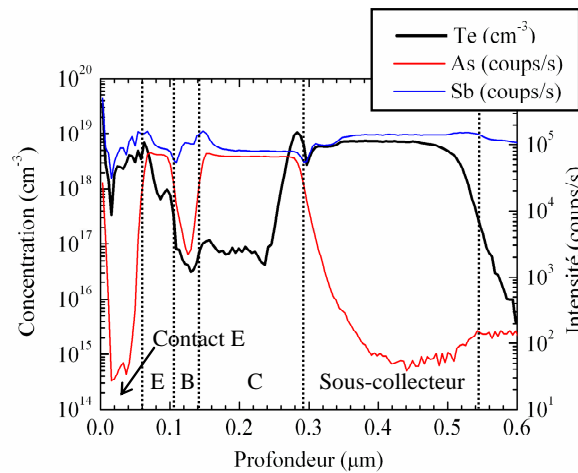


Figure 4.23 : Profil SIMS du dopage Te dans la structure AlInAsSb/GaInSb/AlInAsSb (S090412)

La Figure 4.23 présente ainsi le profil SIMS du dopage tellure dans l'hétérostructure AlInAsSb/GaInSb/AlInAsSb (S090412). Afin de situer les différentes régions de la zone active, l'arsenic et l'antimoine sont également détectés. On observe la présence d'un pic de concentration en tellure à l'interface entre le sous-collecteur en GaInSb et le collecteur en AlInAsSb alors que ce dernier doit être faiblement dopé sur toute son épaisseur. Ceci peut être le résultat de la présence d'une quantité importante de Te accumulée à la surface de l'épitaxie lors de la croissance du sous collecteur. En effet, lors du dopage du sous-collecteur le flux de Te est important en raison d'une mauvaise activation du dopant. Ce dernier, lors de la commutation entre sous-collecteur et collecteur, ségrège et s'incorpore progressivement dans le quaternaire tout en s'activant facilement. Ceci renforce le dopage n en début de croissance du collecteur et explique le pic observé sur le spectre. Ainsi, cette incorporation du Te au début de la couche de collecteur contribue à augmenter la valeur de C_{BC} en limitant l'extension de la zone de charge d'espace base-collecteur et pénalise les fréquences de

coupure. Une meilleure maîtrise du profil de dopage Te est donc nécessaire si l'on veut améliorer les performances atteintes par nos dispositifs.

Il apparaît donc que la diminution de C_{BC} passera par :

- une étude matériau avec pour objectif la maîtrise du dopage de collecteur et surtout l'obtention d'une transition de dopage abrupte entre les couches de sous-collecteur et de collecteur,
- la réduction de la surface de la jonction base-collecteur en minimisant la largeur du contact de base et en déportant la prise de contact de base hors de la zone active.

Pour évaluer l'impact de ces améliorations, nous avons calculé la capacité C_{BC} à partir de l'expression (1.43) en supposant un dopage de la couche collecteur réel de $5.10^{16} \text{ cm}^{-3}$, une largeur de contact de base de $0,5 \text{ }\mu\text{m}$ (au lieu de $1 \text{ }\mu\text{m}$) ainsi que l'introduction d'une technologie de connexion par pont de base. Les résultats donnés dans le Tableau 4.8 montrent que ces optimisations permettront une réduction de C_{BC} de plus de 80%.

Tableau 4.8 : Capacités C_{BC} avec et sans optimisation

Dimensions d'émetteur	2x15	2x10	2x5	1x15	1x10
C_{BC} extrait pour la structure S090412 (fF)	188	148	106	141	109
C_{BC} calculé avec optimisations (fF)	35	24	13	22	15

Signalons enfin que cette réduction de C_{BC} est primordiale pour l'amélioration des performances dynamiques. Elle permettra en effet d'augmenter très largement la fréquence de transition du fait de la diminution des produits $(R_E+R_C)C_{BC}$ et $r_E(C_{BE}+C_{BC})$. Elle sera également très bénéfique à la fréquence maximale d'oscillation f_{MAX} pour laquelle C_{BC} intervient deux fois : une première fois par l'intermédiaire de f_T et une seconde fois de manière explicite dans l'expression (1.45).

4.2.6.B. Résistances d'émetteur et de collecteur

La résistance de collecteur extraite des paramètres S est particulièrement élevée quelle que soit la dimension de l'émetteur (Tableau 4.6). Ceci s'explique par un mauvais dessin du TBH et plus particulièrement du contact de collecteur. En effet, pour une résistivité de contact et une résistance de couche données, la résistance minimale d'un contact à conduction latérale (cas du contact de collecteur) est obtenue lorsque la largeur du contact est grande devant la longueur de transfert L_T (cf. équation (3.15)). La largeur du contact de collecteur dans notre technologie de fabrication de transistors est inférieure à la valeur de longueur de transfert mesurée par TLM ($L_T \sim 2,4 \text{ }\mu\text{m}$) ce qui pénalise largement la résistance de collecteur par l'intermédiaire de R_{Cc} (cf. Figure 1.22). Néanmoins, sans ce dessin inadapté, la résistance de

collecteur R_C resterait importante du fait d'une résistivité spécifique de contact élevée ($> 1 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$).

De même, la contribution de la résistance de contact à la résistance totale d'émetteur est également prépondérante dans le cas des TBH étudiés ici (de l'ordre de 95%).

Le principal axe d'optimisation pour minimiser les résistances R_E et R_C concerne donc les résistivités spécifiques de contact d'émetteur et de collecteur. Pour cela, la solution envisagée est l'introduction de couches de contact n (contact d'émetteur et sous-collecteur) en $\text{InAs}_{0,6}\text{Sb}_{0,4}$ d'énergie de bande interdite plus faible (0,12 eV) que le $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$ actuellement utilisé (0,44 eV). Des résistivités spécifiques de contact inférieures à $5 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{cm}^2$ ont ainsi été rapportées par Champlain et al. pour des contacts Ti/Pt/Au non alliés déposés sur $\text{InAs}_{0,66}\text{Sb}_{0,34}$ moyennement dopé à $2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ [Champlain07b]. Il apparaît en effet que des contacts ohmiques de type n de faibles résistivités sont aisément obtenus sur InAsSb du fait de l'ancrage du niveau de Fermi proche ou dans la bande de conduction comme observé dans InAs [Bhargava97].

4.3. Conclusion

Nous avons démontré dans ce chapitre la faisabilité des TBH à base $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$. La technologie développée a rendu possible la fabrication de dispositifs présentant fréquences de coupure f_T de 52 GHz et f_{MAX} de 48 GHz. Ces résultats constituent, à notre connaissance, la première démonstration du fonctionnement hyperfréquence de TBH de paramètre de maille supérieur à 6,1 Å.

L'extraction du modèle petit signal sur les TBDH $\text{AlInAsSb}/\text{GaInSb}/\text{AlInAsSb}$ nous a permis de constater les potentialités offertes par la technologie de fabrication développée mais également les limitations auxquelles il faudrait remédier pour une montée en fréquence. Nous avons mis en évidence que le principal facteur limitant la fréquence de transition f_T provenait du produit $(R_E + R_C)C_{BC}$. Afin de réduire la contribution de ces différents éléments parasites, l'optimisation du dessin des TBH et des conditions de croissance ainsi que l'introduction de couches de contact n en InAsSb sont les premières améliorations à mettre en place pour une augmentation des deux fréquences de coupure f_T et f_{MAX} .

Conclusion et perspectives

Le travail de thèse présenté dans ce manuscrit a porté sur le développement et l'étude des potentialités de transistors bipolaires à hétérojonctions de paramètre de maille supérieur à 6,1 Å pour des applications ultra-rapides. Il constitue à notre connaissance la première étude en France et en Europe sur cette thématique. Les différentes étapes permettant l'assemblage d'une nouvelle filière technologique ont été détaillées. Ces étapes englobent la définition et l'optimisation de la structure de couches du transistor et la mise au point des procédés technologiques pour sa fabrication.

Nous avons dans un premier temps défini les structures de couches adaptées à un fonctionnement fréquentiel. Nous avons pour cela passé en revue les principales propriétés des matériaux du système 6,1 – 6,48 Å afin de guider notre choix. Le $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$ s'est révélé être un bon candidat pour la base de nos transistors rapides du fait de sa faible largeur de bande interdite et de sa mobilité de trous élevée autorisant un bon compromis gain/résistance de base. Ainsi, une base fine (400 Å) favorable à un temps de transit de base faible a pu être introduite sans pénaliser la résistance de couche et ce, bien que le dopage de base soit moyennement élevé ($1.10^{19} \text{ cm}^{-3}$). Plusieurs matériaux d'émetteur ont ensuite été sélectionnés : l' $\text{Al}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Sb}$ pour sa relative simplicité de mise en œuvre d'un point de vue de la croissance et de la technologie de fabrication et l'alliage quaternaire $\text{Al}_{0,33}\text{In}_{0,67}\text{As}_{0,31}\text{Sb}_{0,69}$ qui permet d'abaisser la barrière d'énergie vue par les électrons et un meilleur confinement des trous dans la base par rapport à un émetteur en $\text{Al}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Sb}$. Concernant la collection des électrons, nous avons également considéré deux types de jonctions base-collecteur, à savoir une homojonction et une hétérojonction $\text{GaInSb}/\text{Al}_{0,33}\text{In}_{0,67}\text{As}_{0,31}\text{Sb}_{0,69}$ afin d'augmenter la tenue en tension des composants tout en assurant une collection efficace du fait de l'alignement des bandes de conduction dans cette configuration. La définition des structures de couches a ainsi abouti à la sélection de quatre hétérostructures basées sur le système $\text{AlIn(As)Sb}/\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$ dont le paramètre de maille est de 6,23 Å. Quelques aspects

spécifiques liés à la croissance de ces hétérostructures antimoniées ont également été abordés comme la nécessité d'une croissance métamorphique sur InP pour pallier l'absence de substrat semi-isolant à ces paramètres de maille.

Le choix des structures effectuées, l'axe principal de ce travail a naturellement porté sur les développements technologiques nécessaires à la réalisation de transistors unitaires dans ce nouveau système. Nous avons décrit le procédé de fabrication développé. Ce dernier, basé sur une technologie triple mesa avec base auto-alignée, a permis la fabrication de composants de petites dimensions latérales (jusqu'à 0,4 μm de largeur d'émetteur).

Le premier volet spécifique de l'étude technologique a concerné la mise en place d'une procédure de gravure fiable et reproductible pour la formation du mesa d'émetteur. L'étude de diverses solutions chimiques et l'analyse des mécanismes qui régissent les processus d'attaque des différents matériaux qui composent nos structures ont permis de définir les procédés les mieux adaptés aux TBH à base $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$. Une étude approfondie a ainsi mené à l'identification de nouvelles solutions chimiques adaptées à la gravure sélective des ternaires $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$ et $\text{Al}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Sb}$. Dans le cas des hétérostructures $\text{AlInAsSb}/\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{Sb}$, le manque de sélectivité de gravure entre l'alliage quaternaire et le GaInSb a nécessité la mise en œuvre d'une stratégie « matériau » avec introduction de couches d'arrêt en $\text{Al}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Sb}$ pour permettre la définition du mesa d'émetteur de manière contrôlée et reproductible.

Nous avons, dans un deuxième temps, porté notre attention sur l'optimisation des contacts ohmiques sur les couches de contact en GaInSb des composants étudiés, dans le souci de réduire l'influence des résistances séries qui affectent les performances dynamiques des TBH. Les résistivités spécifiques de contact sur GaInSb de type p se sont révélées intrinsèquement faibles du fait de l'ancrage du niveau de Fermi dans ou proche de la bande de valence et des valeurs inférieures à $2,5 \times 10^{-7} \Omega\cdot\text{cm}^2$ ont été démontrées. Cette propriété favorable pour le contact de base est pénalisante dans le cas des contacts de type n (émetteur et collecteur) pour lesquels des résistivités spécifiques de contact inférieures à $1 \times 10^{-6} \Omega\cdot\text{cm}^2$ n'ont pu être atteintes. L'étude réalisée a par ailleurs mis en évidence l'influence significative de la préparation de la surface du GaInSb avant dépôt du contact. Enfin, une nouvelle structure métallique associant le molybdène au platine a été proposée pour améliorer la stabilité thermique des contacts.

Le dernier point d'optimisation technologique a concerné le développement d'un procédé de fabrication de ponts à air, entièrement réalisé en lithographie électronique, pour la connexion finale des composants. Ce procédé, bien qu'utilisant une connexion classique par via, s'est révélé adapté à la fabrication de TBH avec des largeurs d'émetteur de 0,4 μm .

L'assemblage de ces éléments technologiques a permis la réalisation de transistors fonctionnels sur les quatre hétérostructures considérées dans cette étude. Les meilleures

performances ont néanmoins été obtenues avec la structure à double hétérojonction AlInAsSb/GaInSb/AlInAsSb qui a fait l'objet d'une caractérisation approfondie. L'analyse du comportement statique de transistors de différentes dimensions a montré que le gain en courant statique de ces TBH est principalement limité par les recombinaisons en périphérie de la jonction émetteur-base et que des optimisations structurales (hétérojonction émetteur-base de type I, base fine, pseudo-champ dans la base,...) ainsi qu'une passivation adaptée devront être introduites afin de permettre la réduction des dimensions des composants, nécessaire à l'augmentation de leurs performances dynamiques.

Ces TBDH AlInAsSb/GaInSb/AlInAsSb ont par ailleurs montré un comportement dynamique caractérisé par un couple f_T/f_{MAX} égal à 52/48 GHz, ce qui constitue la première démonstration du fonctionnement hyperfréquence d'un TBH de paramètre de maille supérieur à 6,1 Å. Afin d'identifier les mécanismes prépondérants qui limitent ces dispositifs, l'extraction des éléments du schéma équivalent a été réalisée à partir des paramètres S. Il s'est avéré que nos transistors sont pour l'instant principalement limités par le temps de charge de la capacité base-collecteur qui représente plus de 70 % du délai total émetteur-collecteur.

Les premières améliorations à mettre en place pour augmenter les deux fréquences de coupure ont été proposées et concernent l'optimisation du dessin des TBH et des conditions de croissance ainsi que l'introduction de couches de contact n en InAsSb, favorable à la formation de contacts ohmiques de type n de faible résistivité.

Si les résultats présentés lors de ces travaux sont encourageants, de nombreuses voies d'investigations apparaissent comme indispensables pour tirer pleinement partie du potentiel offert par ce système AlInAsSb/GaInSb/AlInAsSb qui, d'après ce que l'on sait de ces matériaux, ne présente pas de limitation intrinsèque du point de vue du transport des électrons (forte mobilité dans GaInSb, distance en énergie inter-vallées importante dans $Al_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$, de l'ordre de 0,6 eV pour $x < 0,4$). Les fréquences de coupure pourront ainsi être augmentées :

- en réduisant le temps de transit base-collecteur

Une fois les premières optimisations mises en place, ce dernier va rapidement devenir le premier facteur limitant. L'ingénierie des bandes sera alors la principale solution à envisager ce qui nécessitera une bonne maîtrise de l'épitaxie. Ainsi en variant légèrement la composition des alliages AlInAsSb de l'émetteur et du collecteur, une configuration quasiment idéale pour le transport des électrons pourra être obtenue avec :

- une hétérojonction émetteur-base de type I, favorisant l'injection des électrons dans la base avec un excès d'énergie cinétique,
- un alignement de type II entre la base et le collecteur afin d'optimiser la collection des électrons en sortie de base.

Aussi, le temps de transit de base pourra être réduit par l'introduction d'un pseudo-champ électrique dans la base grâce à une gradualité en composition. Ces aménagements devront néanmoins être réalisés avec précaution afin d'éviter un transfert accru des porteurs en vallée latérale.

- en réduisant la résistance de base

Compte tenu du niveau de dopage et de l'épaisseur de la base, la résistance de base des TBDH AlInAsSb/GaInSb/AlInAsSb est relativement faible du fait de la mobilité des trous élevée dans GaInSb et de la faible valeur de résistivité spécifique de contact de base obtenues. Toutefois, une limitation de cette grandeur provient de la technologie développée. En effet, le manque de sélectivité de gravure entre l'émetteur en AlInAsSb et la base en GaInSb ne permet pas de préserver intégralement l'épaisseur de la fine couche de base extrinsèque lors de la gravure du mesa d'émetteur ce qui pénalise la résistance d'accès à la base via une augmentation de la résistance de couche. Le développement d'un procédé de gravure sélectif sera donc indispensable pour lever cette limitation. Par la suite, une augmentation du dopage de base pourra également être envisagée afin de diminuer la résistance de couche et ainsi minimiser la résistance de base.

Annexe 1 : Structures de couches des TBH étudiés dans ce travail

▪ **Structure S090114 : TBSH AlInSb/GaInSb**

Nature de la couche	Matériau	Dopage (cm ⁻³)	Epaisseur
Contact d'émetteur	Ga _{0,65} In _{0,35} Sb	Te : 2.10 ¹⁸	800 Å
Emetteur (contraint) $\Delta a/a = 1,23\%$	Al _{0,5} In _{0,5} Sb	Te : 1.10 ¹⁷	200 Å
Base	Ga _{0,65} In _{0,35} Sb	C : 1.10 ¹⁹	400 Å
Collecteur	Ga _{0,65} In _{0,35} Sb	Te : 5.10 ¹⁶	1500 Å
Sous-collecteur	Ga _{0,65} In _{0,35} Sb	Te : 2.10 ¹⁸	2500 Å
Buffer graduel (1,26 µm)	Al _{0,725} In _{0,275} Sb	non dopé	3000 Å
	Al _{1-x} In _x Sb (x : 0,325 → 0,275)		100 Å
	Al _{1-x} In _x Sb (x : 0,3 → 0,325)		500 Å
	Al _{1-x} In _x Sb (x : 0,2 → 0,3)		2000 Å
	Al _{1-x} In _x Sb (x : 0,1 → 0,2)		2000 Å
	Al _{0,8} Ga _{0,2} Sb		3000 Å
	AlSb		1000 Å
Al _{0,48} In _{0,52} As	1000 Å		
Substrat	InP	semi-isolant	350 µm

▪ **Structure S090413 : TBDH AlInSb/GaInSb/AlInAsSb**

Nature de la couche	Matériau	Dopage (cm ⁻³)	Epaisseur
Contact d'émetteur	Ga _{0,65} In _{0,35} Sb	Te : 2.10 ¹⁸	800 Å
Emetteur (contraint) $\Delta a/a = 1,23\%$	Al _{0,5} In _{0,5} Sb	Te : 1.10 ¹⁷	200 Å
Base	Ga _{0,65} In _{0,35} Sb	C : 1.10 ¹⁹	400 Å
Collecteur	Al _{0,33} In _{0,67} As _{0,31} Sb _{0,69}	Te : 5.10 ¹⁶	1500 Å
Sous-collecteur	Ga _{0,65} In _{0,35} Sb	Te : 2.10 ¹⁸	2500 Å
Buffer graduel (1,485 μm)	Al _{0,725} In _{0,275} Sb	non dopé	3000 Å
	Al _{1-x} In _x Sb (x : 0,325 → 0,275)		100 Å
	Al _{1-x} In _x Sb (x : 0,3 → 0,325)		750 Å
	Al _{1-x} In _x Sb (x : 0,2 → 0,3)		3000 Å
	Al _{1-x} In _x Sb (x : 0,1 → 0,2)		3000 Å
	Al _{0,8} Ga _{0,2} Sb		3000 Å
	AlSb		1000 Å
Al _{0,48} In _{0,52} As	1000 Å		
Substrat	InP	semi-isolant	350 μm

▪ **Structure S090411 : TBSH AlInAsSb/GaInSb**

Nature de la couche	Matériau	Dopage (cm ⁻³)	Epaisseur
Contact d'émetteur	Ga _{0,65} In _{0,35} Sb	Te : 2.10 ¹⁸	600 Å
Emetteur	Al _{0,5} In _{0,5} Sb	Te : 1.10 ¹⁷	20 Å
	Al _{0,33} In _{0,67} As _{0,31} Sb _{0,69}	Te : 5.10 ¹⁶	400 Å
	Al _{0,5} In _{0,5} Sb	Te : 1.10 ¹⁷	20 Å
Base	Ga _{0,65} In _{0,35} Sb	C : 1.10 ¹⁹	400 Å
Collecteur	Ga _{0,65} In _{0,35} Sb	Te : 5.10 ¹⁶	1500 Å
Sous-collecteur	Ga _{0,65} In _{0,35} Sb	Te : 2.10 ¹⁸	2500 Å
Buffer graduel (1,485 µm)	Al _{0,725} In _{0,275} Sb	non dopé	3000 Å
	Al _{1-x} In _x Sb (x : 0,325 → 0,275)		100 Å
	Al _{1-x} In _x Sb (x : 0,3 → 0,325)		750 Å
	Al _{1-x} In _x Sb (x : 0,2 → 0,3)		3000 Å
	Al _{1-x} In _x Sb (x : 0,1 → 0,2)		3000 Å
	Al _{0,8} Ga _{0,2} Sb		3000 Å
	AlSb		1000 Å
Al _{0,48} In _{0,52} As	1000 Å		
Substrat	InP	semi-isolant	350 µm

▪ **Structure S090412 : TBSH AlInAsSb/GaInSb/ AlInAsSb**

Nature de la couche	Matériau	Dopage (cm ⁻³)	Epaisseur
Contact d'émetteur	Ga _{0,65} In _{0,35} Sb	Te : 2.10 ¹⁸	600 Å
Emetteur	Al _{0,5} In _{0,5} Sb	Te : 1.10 ¹⁷	20 Å
	Al _{0,33} In _{0,67} As _{0,31} Sb _{0,69}	Te : 5.10 ¹⁶	400 Å
	Al _{0,5} In _{0,5} Sb	Te : 1.10 ¹⁷	20 Å
Base	Ga _{0,65} In _{0,35} Sb	C : 1.10 ¹⁹	400 Å
Collecteur	Al _{0,33} In _{0,67} As _{0,31} Sb _{0,69}	Te : 5.10 ¹⁶	1500 Å
Sous-collecteur	Ga _{0,65} In _{0,35} Sb	Te : 2.10 ¹⁸	2500 Å
Buffer graduel (1,485 µm)	Al _{0,725} In _{0,275} Sb	non dopé	3000 Å
	Al _{1-x} In _x Sb (x : 0,325 → 0,275)		100 Å
	Al _{1-x} In _x Sb (x : 0,3 → 0,325)		750 Å
	Al _{1-x} In _x Sb (x : 0,2 → 0,3)		3000 Å
	Al _{1-x} In _x Sb (x : 0,1 → 0,2)		3000 Å
	Al _{0,8} Ga _{0,2} Sb		3000 Å
	AlSb		1000 Å
Al _{0,48} In _{0,52} As	1000 Å		
Substrat	InP	semi-isolant	350 µm

Annexe 2 : Procédé de fabrication pour TBH de petites dimensions

Niveau 1	Contact émetteur	
<u>Traitement de surface</u>	Nettoyage	Acétone, IPA
	Uv-ozone	5 min
<u>Lithographie électronique</u>	Nettoyage	Acétone, IPA
	Déshydratation sur plaque	200°C, 10 min
	Refroidissement	N ₂
	Enduction Copo EL10%-17.5 (6300 Å)	capot fermé v = 2250 rpm a = 1000 rpm/s t = 12 s
	Recuit sur plaque	110°C, 10 s 170°C, 5 min
	Refroidissement	N ₂
	Enduction PMMA 5% 950K (3000 Å)	capot fermé v = 3000 rpm a = 1000 rpm/s t = 12 s
	Recuit sur plaque	110°C, 10 s 170°C, 5 min
	Ecriture EBPG 5000+ fichier : uHBT-metal-emet_01.gpf résolution : 20 nm	100kV, 250 µC/cm ² , 18 nA fichier de correction : momo_z648_100.pec
	Révélation	MIBK : IPA (1:1), 1 min
	Rinçage	IPA
	Séchage	N ₂
	<u>Métallisation</u>	Evaporation Plassys
Lift-off		Remover 1165 à 80°C, 15 min agitation : 700 tr/min
Rinçage		Acétone, IPA
Séchage		N ₂
<u>Contrôle</u>	Mesure épaisseur	profilomètre
	Observation MEB	

Niveau 2		Mésa émetteur
<u>Traitement de surface</u>	Désoxydation	HCl : H ₂ O (1:10) 20 s + rinçage EDI
<u>Lithographie électronique</u> (pour échelles TLM)	Nettoyage	Acétone, IPA
	Déshydratation sur plaque	200°C, 10 min
	Refroidissement	N ₂
	Enduction HMDS	capot fermé v = 3000 rpm a = 1000 rpm/s t = 20 s
	Enduction nLof 2020 diluée (1 µm)	capot fermé v = 1500 rpm a = 1000 rpm/s t = 12 s
	Recuit sur plaque	110°C, 1 min 30 s
	Ecriture EBPG 5000+ fichier : uHBT-mesa-emet_02.gpf résolution : 20 nm	100kV, 45 µC/cm ² , 8 nA fichier de correction : pn-500-gaas-50-z100.pec
	Recuit sur plaque	110°C, 1 min 30 s
	Révélation	MIF 726, 2 min 30 s
	Rinçage	EDI, 30 s
	Séchage	N ₂
<u>Gravure</u>	Désoxydation	NH ₄ OH : H ₂ O (1:9), 1 min
	Rinçage	EDI, 5 s
	Gravure contact émetteur	C ₄ H ₆ O ₆ : H ₂ O : H ₂ O ₂ à 40°C (10.5 g : 280 ml : 14 ml) - Emetteur en AlInSb : 1 min 10 s – 1 min 15 s - Emetteur en AlInAsSb : 1 min 10 s
	Rinçage	EDI, 5 s
	Gravure émetteur	HCl : H ₂ O : H ₂ O ₂ (20:80:0.1) - Emetteur en AlInSb : 30 s – 40 s - Emetteur en AlInAsSb : 10 s
	Rinçage	EDI, 20 s
	Séchage	N ₂
<u>Contrôle</u>	Observation MEB	
<u>Dérésinage</u>	Nettoyage	Remover 1165 à 80°C, 15 min agitation : 700 tr/min
	Observation microscope	dans coupelle IPA
	Rinçage + séchage	Acétone, IPA, N ₂
<u>Contrôle</u>	Mesure TLM	
Niveau 3		Contact base
<u>Lithographie électronique</u>	Nettoyage	Acétone, IPA
	Déshydratation sur plaque	200°C, 10 min
	Refroidissement	N ₂
	Enduction Copo EL 10% 17.5 (6300 Å)	capot fermé v = 2250 rpm a = 1000 rpm/s t = 12 s
	Recuit sur plaque	110°C, 10 s 170°C, 5 min
	Refroidissement	N ₂

	Enduction PMMA 5% 950K (3000 Å)	capot fermé v = 3000 rpm a = 1000 rpm/s t = 12 s
	Recuit sur plaque	110°C, 10 s 170°C, 5 min
	Ecriture EBPG 5000+ fichier : uHBT-metal-base_03.gpf resolution : 20 nm	100kV, 250 µC/cm ² , 18 nA fichier de correction : momo_z648_100.pec
	Révélation	MIBK : IPA (1:1), 1 min
	Rinçage	IPA
	Séchage	N ₂
<u>Métallisation</u>	Evaporation Plassys	etching Ar, 150 eV, 1 min Pd /Pt / Au (20/100/550 Å)
	Lift-off	Remover 1165 à 80°C, 15 min agitation : 700 tr/min
	Rinçage	Acétone, IPA
	Séchage	N ₂
<u>Contrôle</u>	Mesure épaisseur	profilomètre
	Observation MEB	
Niveau 4 Mésa base		
<u>Lithographie électronique</u>	Nettoyage	Acétone, IPA
	Déshydratation sur plaque	200°C, 10 min
	Refroidissement	N ₂
	Enduction HMDS	capot fermé v = 3000 rpm a = 1000 rpm/s t = 20 s
	Enduction nLof 2020 diluée (1 µm)	capot fermé v = 1500 rpm a = 1000 rpm/s t = 12 s
	Recuit sur plaque	110°C, 1 min 30 s
	Ecriture EBPG 5000+ fichier : uHBT-mesa-base_04.gpf résolution : 20 nm	100kV, 45 µC/cm ² , 8 nA fichier de correction : pn-500-gaas-50-z100.pec
	Recuit sur plaque	110°C, 1 min 30 s
	Révélation	MIF 726 2 min 30 s
	Rinçage	EDI, 30 s
	Séchage	N ₂
<u>Gravure</u>	Désoxydation	NH ₄ OH : H ₂ O (1:9), 1 min
	Rinçage	EDI, 2 s
	Gravure base et collecteur	C ₄ H ₆ O ₆ : H ₂ O : H ₂ O ₂ à 40°C (10.5 g : 280 ml : 14 ml) - Collecteur GaInSb : 2 min 35 s – 3min - Collecteur AlInAsSb : 1 min 15 s – 2 min 30 s
	Rinçage	EDI, 15 s
	Séchage	N ₂
<u>Contrôle</u>	Observation MEB	

<u>Dérésinage</u>	Nettoyage	Remover 1165 à 80°C, 15 min agitation : 700 tr/min
	Observation microscope optique	dans coupelle IPA
	Rinçage	Acétone, IPA
	Séchage	N ₂
<u>Contrôle</u>	Mesures TLM	
Niveau 5	Contact collecteur	
<u>Lithographie électronique</u>	Nettoyage	Acétone, IPA
	Déshydratation sur plaque	200°C, 10 min
	Refroidissement	N ₂
	Enduction Copo EL10%-17.5 (6300 Å)	capot fermé v = 2250 rpm a = 1000 rpm/s t = 12 s
	Recuit sur plaque	110°C, 1 min 170°C, 5 min
	Refroidissement	N ₂
	Enduction PMMA 5% 950K (3000 Å)	capot fermé v = 3000 rpm a = 1000 rpm/s t = 12 s
	Recuit sur plaque	110°C, 10 s 170°C, 5 min
	Ecriture EBPG 5000+ fichier : uHBT-metal-coll_05.gpf resolution : 20	100kV, 250 µC/cm ² , 18 nA fichier de correction : momo_z648_100.pec
	Révélation	MIBK : IPA (1:1), 1 min
	Rinçage	IPA
Séchage	N ₂	
<u>Métallisation</u>	Evaporation Plassys	etching Ar, 150 eV, 1 min Ti / Pt / Au (200/400/3000 Å)
	Lift-off	Remover 1165 à 80°C, 15 min agitation : 700 tr/min
	Rinçage	Acétone, IPA
	Séchage	N ₂
<u>Contrôle</u>	Mesure épaisseur	profilomètre
	Observation MEB	
Niveau 6	Mésa sous-collecteur	
<u>Lithographie électronique</u>	Nettoyage	Acétone, IPA
	Déshydratation sur plaque	200°C, 10 min
	Refroidissement	N ₂
	Enduction HMDS	capot fermé v = 3000 rpm a = 1000 rpm/s t = 20 s
	Enduction nLof 2020 diluée (1 µm)	capot fermé v = 1500 rpm a = 1000 rpm/s t = 12 s
	Recuit sur plaque	110°C, 1 min 30 s

	Ecriture EBPG 5000+ fichier : uHBT-mesa-coll_06.gpf resolution : 20 nm	100kV, 45 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$, 8 nA fichier de correction : pn-500-gaas-50-z100.pec
	Recuit sur plaque	110°C, 1 min 30 s
	Révélation	MIF 726, 2 min 30 s
	Rinçage	EDI, 30 s
	Séchage	N ₂
<u>Gravure</u>	Désoxydation	NH ₄ OH : H ₂ O (1:9), 1 min
	Rinçage	EDI, 2 s
	Gravure sous-collecteur	C ₄ H ₆ O ₆ : H ₂ O : H ₂ O ₂ à 40°C (10.5 g : 280 ml : 14 ml) 2 min 30 s – 3 min 30 s
	Rinçage	EDI, 15 s
	Séchage	N ₂
<u>Contrôle</u>	Observation MEB	
<u>Dérésinage</u>	Nettoyage	Remover 1165 à 80°C, 15 min agitation : 700 tr/min
	Observation microscope optique	dans coupelle IPA
	Rinçage	Acétone, IPA
	Séchage	N ₂
<u>Contrôle</u>	Mesures TLM	
Niveau 7	Ouverture vias / définition support de pont	
<u>Lithographie électronique</u>	Nettoyage	Acétone, IPA
	Déshydratation sur plaque	200°C, 10 min
	Refroidissement	N ₂
	Enduction PMMA 5% 950K (4600 Å)	capot fermé v = 1800 rpm a = 1000 rpm/s t = 12 s
	Recuit sur plaque	110°C, 1 min
	Enduction PMMA 5% 950K (4600 Å)	capot fermé v = 1800 rpm a = 1000 rpm/s t = 12 s
	Recuit sur plaque	110°C, 10 s 180°C, 10 min
	Ecriture EBPG 5000+ fichier : uHBT-ouv-via_07.gpf resolution : 20 nm	100kV, 260 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$, 1 nA fichier de correction : momo_z648_100.pec
	Ecriture EBPG 5000+ fichier : uHBT-ouv-acces_08.gpf résolution : 90 nm	100kV, 260 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$, 100 nA fichier de correction : momo_z648_100.pec
	Révélation	MIBK : IPA (1:1), 2 min 30 s
	Rinçage	IPA, 30 s
	Séchage	N ₂
	Recuit de fluage	Sur plaque, 150°C, 2 min
<u>Contrôle</u>	Observation MEB	

Niveau 8	Définition structure de pont / métallisation accès	
<u>Lithographie électronique</u>	Enduction Copo ARP 33% 14. (2,25 µm)	capot fermé v = 2000 rpm a = 1000 rpm/s t = 12 s
	Recuit sur plaque	120°C, 2 min
	Ecriture EBPG 5000+ fichier : uHBT-metal-acces_09.gpf resolution : 90 nm	100kV, 120 µC/cm ² , 24 nA fichier de correction : momo_z648_100.pec
	Révélation ARP 33 % 14.	Méthanol : IPA (1:3), 1 min 15 s
	Rinçage	IPA, 30 s
	Séchage	N ₂
<u>Contrôle</u>	Observation MEB	
<u>Métallisation</u>	Evaporation Plassys	etching Ar, 150 eV, 1 min Ti / Au (2500/7500 Å) au centre du holder
	Lift off	Acétone, 2 h
	Rinçage	Acétone, IPA
	Séchage	N ₂
<u>Contrôle</u>	Mesure épaisseur profilomètre	

Annexe 3 : Liste des publications et des communications scientifiques

Publications dans des journaux scientifiques

E. Mairiaux, L. Desplanque, X. Wallart, and M. Zaknourne, "Improvement of Ohmic contacts to $\text{In}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{Sb}$ using Mo refractory metal and surface preparation for 6.3 Å heterojunction bipolar transistors", *Journal of Vacuum Science and Technology B* 28, pp. 17-20 (2010)

E. Mairiaux, L. Desplanque, X. Wallart, and M. Zaknourne, "Microwave performance of $\text{InAlAsSb}/\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{Sb}/\text{InAlAsSb}$ double heterojunction bipolar transistors", *IEEE Electron Device Letters* 31, pp. 299-301 (2010)

Communications internationale et nationale

E. Mairiaux, L. Desplanque, X. Wallart, G. Dambrine et M. Zaknourne, "Selective wet chemical etching of GaInSb and AlInSb for 6.25 Å HBT fabrication", 20th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, IPRM (2008)

E. Mairiaux, L. Desplanque, X. Wallart, G. Dambrine, M. Zaknourne, "Gravure sélective par voie humide de $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{Sb}$ et d' $\text{Al}_{0.55}\text{In}_{0.45}\text{Sb}$ en vue de la réalisation de transistor bipolaire à hétérojonction", 12^{èmes} Journées Nano, Micro et Optoélectronique, JNMO (2008)

Communication invitée internationale

X. Wallart, L. Desplanque, D. Vignaud, S. Bollaert, Y. Roelens, A. Noudeviwa, F. Danneville, A. Olivier, N. Wichmann, M. Zaknourne, E. Mairiaux, G. Dambrine, J. Grahn, G. Moschetti, P.-Å. Nilsson, M. Malmkvist, E. Lefebvre, "MBE Growth of Antimony-based heterostructures for microelectronic applications", 10th Expert Evaluation & Control of Compound Semiconductor Materials & Technologies, EXMATEC (2010)

Références bibliographiques

Abréviations utilisées dans la table des références

BCTM	Bipolar/BiCMOS circuits and Technology Meeting
CSICS	Compound Semiconductor IC Symposium
CSManTech	International Conference on Compound Semiconductor Manufacturing Technology
DRC	Device Research Conference
EMBS	International Conference of Engineering in Medicine and Biology Society
IEDM	International Electron Devices Meeting
IPRM	International Conference on Indium Phosphide and Related Materials
IRE	Institute of Radio Engineers
IRMMW-THz	International Conference on Infrared and Millimeter Waves - Terahertz Electronics
ISCS	International Symposium on Compound Semiconductors
ISDRS	International Semiconductor Device Research Symposium
RFIC	Radio Frequency Integrated Circuit Symposium

Table des références

- Abernathy89 C.R. Abernathy, S.J. Pearton, R. Caruso, F. Ren, et J. Kovalchik, "Ultrahigh doping of GaAs by carbon during metalorganic molecular beam epitaxy", *Applied Physics Letters* 55, pp. 1750-1752 (1989)
- Adachi85 S. Adachi, "GaAs, AlAs, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ material parameters for use in research and device applications", *Journal of Applied Physics* 58, R1-29 (1985)
- Adachi09 S. Adachi, "Properties of semiconductor alloys : group IV, III-V and II-VI semiconductors", Wiley, Chichester, United Kingdom (2009)
- Alavi80 K. Alavi, R.L. Aggarwal et S.H. Groves, "Interband magnetoabsorption of $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ ", *Physical Review B* 21, pp. 1311-1315 (1980)
- Alcatel09 Communiqué de presse (Paris, 28 septembre 2009), « Les Bell Labs d'Alcatel-Lucent annoncent un nouveau record de transmission optique et dépassent les 100 pétabits par seconde.kilomètre », consulté le 23/10/2009 sur le site <http://www.alcatel-lucent.com/wps/portal/NewsReleases/>
- Anderson62 R.L. Anderson, "Experiments on Ge-GaAs heterojunctions", *Solid-State Electronics* 5, pp. 341-344 (1962)
- Ankri82 D. Ankri et L.F. Eastman, "GaAlAs-GaAs ballistic heterojunction bipolar transistor", *Electronics Letters* 18, pp. 750-751 (1982)
- Arayashiki08 Y. Arayashiki, Y. Ohkubo, Y. Amano, A. Takagi, M. Ejima et Y. Matsuoka, "Low-power 100 Gbit/s selector IC using InP/InGaAs DHBTs", *Electronics Letters* 44, pp. 1252-1253 (2008)
- Auvergne74 D. Auvergne, J. Camassel, H. Mathieu et A. Joullie, "Piezoreflectance measurements on $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$ alloys", *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 35, pp. 133-140 (1974)
- Averett02 K.L. Averett, S. Maimon, X. Wu, M.W. Koch et G.W. Wicks, "InAs-based bipolar transistors grown by molecular beam epitaxy", *Journal of Vacuum Science and Technology B* 20, pp. 1213-1216 (2002)
- Averett03 K.L. Averett, X. Wu, M.W. Koch et G.W. Wicks, "Low-voltage InAsP/InAs HBT and metamorphic InAs BJT devices grown by molecular beam epitaxy", *Journal of Crystal Growth* 251, pp. 852-857 (2003)

- Baca05 Fabrication of GaAs Devices, A.G. Baca et C.I.H. Ashby, The Institution of Engineering and Technology (2005)
- Baquedano93 J.A. Baquedano, A.F.J. Levi, B. Jalali et A.Y. Cho, “Forward delay in scaled $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ heterojunction bipolar transistors”, *Applied Physics Letter* 63, pp. 2231-2233 (1993)
- Barbalat06 Benoît Barbalat, Thèse en Sciences de l’Université Paris-Sud XI, décembre 2006, « Technologie et physique de transistors bipolaires à hétérojonction Si/SiGe:C auto-alignés très hautes Fréquences »
- Bardeen47 J. Bardeen, “Surface states rectification at a metal semi-conductor contact”, *Physical Review* 71, p. 717-727 (1947)
- Bardeen48 J. Bardeen et W.H. Bratain, “The transistor, a semiconductor triode”, *Physical Review* 74, p. 230 (1948)
- Beaudin08 G. Beaudin, « Techniques et applications des récepteurs hétérodynes submillimétriques et THz pour l’astrophysique et la télédétection planétaire », *Revue de l’Electricité et de l’Electronique* 1, pp. 80-87 (2008)
- Bennett03 B.R. Bennett, R. Magno et N. Papanicolaou, “Controlled n-type doping of antimonides and arsenides using GaTe”, *Journal of Crystal Growth* 251, pp. 532–537 (2003)
- Bennett05 B.R. Bennett, R. Magno, J.B. Boos, W. Kruppa et M.G. Ancona, “Antimonide-based compound semiconductors for electronic devices : a review”, *Solid-State Electronics* 49, pp. 1875-1895 (2005)
- Berger72 H.H. Berger, “Models for contacts to planar devices”, *Solid-State Electronics* 15, pp. 145-158 (1972)
- Berishev95 I. E. Berishev, F. De Anda, V. A. Mishournyi, J. Olvera N. D. Ilyinskaya et V. I. Vasilyev, “ $\text{H}_2\text{O}_2:\text{HF}:\text{C}_4\text{O}_6\text{H}_6$ (Tartaric Acid): H_2O etching system for chemical polishing of GaSb”, *Journal of the Electrochemical Society* 142, pp. L189-L191 (1995)
- Bhargava97 S. Bhargava, H.R. Blank, V. Narayanamurti et H. Kroemer, “Fermi-level pinning position at the Au–InAs interface determined using ballistic electron emission microscopy”, *Applied Physics Letters* 70, pp. 759-761 (1997)

- Bhat96 R. Bhat, W.P. Hong, C. Caneau, M.A. Koza, C.K. Nguyen et S. Goswami, "InP/GaAsSb/InP and InP/GaAsSb/InGaAsP double heterojunction bipolar transistors with a carbon-doped base grown by organometallic chemical vapor deposition", *Applied Physics Letters* 68, pp. 985-987 (1996)
- Blakemore82 J.S. Blakemore, "Semiconducting and other major properties of gallium arsenide", *Journal of Applied Physics* 53, pp. R123-181 (1982)
- Blank07 T.V. Blank et Y.A Gol'dberg, "Mechanisms of current flow in metal-semiconductor ohmic contacts", *Semiconductors* 41, pp. 1263-1292 (2007)
- Böck04 J. Bock, H. Schafer, H. Knapp, K. Aufinger, M. Wurzer, S. Boguth, T. Bottner, R. Stengl, W. Perndl et T.F Meister, "3.3 ps SiGe bipolar technology", *IEEE Proceedings of IEDM*, pp. 255 – 258 (2004)
- Bollaert02 S. Bollaert, Y. Cordier, M. Zaknour, T. Parenty, H. Happy, S. Lepilliet et A. Cappy, " f_{max} of 490GHz metamorphic $In_{0.52}Al_{0.48}As/In_{0.53}Ga_{0.47}As$ HEMTs on GaAs substrate", *Electronics Letters* 38, pp. 389-391 (2002)
- Bourguiga99 R. Bourguiga, H. Sik et A. Scavennec, "Surface passivation of composition graded base in GaAlAs/GaInP/GaAs heterojunction bipolar transistor", *The European Physical Journal, Applied Physics* 6, pp. 299-301 (1999)
- Brennan84 K. Brennan et K. Hess, "High field transport in GaAs, InP and InAs", *Solid-State Electronics* 27, pp. 347-357 (1984)
- Bruggen05 M.J. van Bruggen, B. van Someren et P. Kruit, "Development of a multi-electron-beam source for sub-10 nm electron beam induced deposition", *Journal of Vacuum Science and technology B* 23, pp. 2833-2839 (2005)
- Buglass86 J.G. Buglass, T.D. McLean et D.G. Parker, "A controllable etchant for fabrication of GaSb devices", *Journal of the Electrochemical Society* 133, pp. 2565-2567 (1986)
- Caffin97 D. Caffin, A.M. Duchenois, F. Heliot, C. Besombes, J.L. Benchimol, P. Launay, "Base-collector leakage currents in InP/InGaAs double heterojunction bipolar transistors", *IEEE Transactions on Electron Devices* 44, pp. 930-936 (1997)
- Casey77 H.C. Casey et E. Buehler, "Evidence for low surface recombination velocity on n-type InP", *Applied Physics Letters* 30, p. 247-249 (1977)

- Casey78 H.C. Casey et M.B. Panish, "Heterostructure lasers", Academic Press, New York (1978)
- Champlain06 J.G. Champlain, R. Magno et J.B. Boos, "Low resistance, unannealed, Ohmic contacts to p-type $\text{In}_{0.27}\text{Ga}_{0.73}\text{Sb}$ ", Journal of Vacuum Science and Technology B 24, pp. 2388-2390 (2006)
- Champlain07a J.G. Champlain, R. Magno, D. Park, H.S. Newman et J.B. Boos, "6,2 Å Sb-based pN diodes for high frequency applications", IEEE Proceedings of IRMMW-THz, pp. 855-856 (2007)
- Champlain07b J.G. Champlain, R. Magno et J.B. Boos, "Low resistance, unannealed ohmic contacts to n-type $\text{InAs}_{0.66}\text{Sb}_{0.34}$ ", Electronics Letters 43, pp. 1315-1317 (2007)
- Chand85 N. Chand, R. Fischer et H. Morkoç, "Collector-emitter offset voltage in AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistors", Applied Physics Letters 47, pp.313-315 (1985)
- Chang67 T.H.P. Chang et W.C. Nixon, "Electron beam formation of 800 angströms wide aluminium lines", Journal of Scientific Instruments 44, pp. 231-234 (1967)
- Chor96a E.F. Chor et C.J. Peng, "Composite step-graded collector of InP/InGaAs/InP DHBT for minimised carrier blocking", Electronics letters 32, pp. 1409-1410 (1996)
- Chor96b E.F. Chor, R.J. Malik, R.A. Hamm, R. Ryan, "Metallurgical stability of ohmic contacts on thin base InP/InGaAs/InP HBT's", IEEE Electron Device Letters 17, pp. 62-64 (1996)
- Cohen08 D. Cohen Elias, A. Gavrillov, S. Cohen, S. Kraus, A. Sayag et D. Ritter, "Abrupt delta-doped InP/GaInAs/InP DHBTs with 0.45- μm -wide T-shaped emitter contacts", IEEE Electron Device Letters 29, pp. 971-973 (2008)
- Cordier99 Y. Cordier et D. Ferré, "InAlAs buffer layers grown lattice mismatched on GaAs with inverse steps", Journal of Crystal Growth 201, pp. 263-266 (1999)
- Crook07 A.M. Crook, E. Lind, Z. Griffith et M.J.W Rodwell, "Low resistance, nonalloyed ohmic contacts to InGaAs", Applied Physics Letters 91, 192114 (2007)

- Cunningham89 B.T. Cunningham, L.J. Guido, J.E. Baker, J.S. Major, N. Holonyak et G.E. Stillman, "Carbon diffusion in undoped, n-type, and p-type GaAs", *Applied Physics Letters* 55, pp. 687-689 (1989)
- Dahlström03 Matthias Dahlström, Thèse en Sciences du Royal Institute of Technology of Stockholm, mai 2003, "Ultra high speed InP heterojunction bipolar transistor"
- Dahlström04 M. Dahlström, Z. Griffith, Y.M. Kim et M.J.W. Rodwell, "High current density and high power density operation of ultra high speed InP DHBTs", support powerpoint utilisé lors de la conférence IPRM 2004, Kagoshima, Japon. Document récupéré le 16/02/2010 de http://www.ece.ucsb.edu/Faculty/rodwell/publications_and_presentations/publications/Pub_listwithlinks.htm
- Delhaye08 G. Delhaye, L. Desplanque et X. Wallart, "Metamorphic high electron mobility Te-doped AlInSb/GaInSb heterostructures on InP (001)", *Journal of Applied Physics* 104, 066105 (2008)
- DeSalvo94 G.C. DeSalvo, R. Kaspi et C.A. Bozada, "Citric acid etching of GaAs_{1-x}Sb_x, Al_{0.5}Ga_{0.5}Sb and InAs for heterostructure device fabrication", *Journal of the Electrochemical Society* 141, pp. 3526-3531 (1994)
- Dier04 O. Dier, C. Lin, M. Grau et M.C. Amann, "Selective and non-selective wet-chemical etchants for GaSb-based materials", *Semiconductor Science and Technology* 19, pp. 1250-1253 (2004)
- Dodd93 P.E. Dodd, M.R. Melloch, M.S. Lundstrom, J.M. Woodwall et D. Pettit, "InAs bipolar transistors : a path to high-performance cryogenic electronics", *IEEE Proceedings of DRC*, pp. 152-153 (1993)
- Dodd96 P.E. Dodd, M.L. Lovejoy, M.S. Lundstrom, M.R. Melloch, J.M. Woodall et D. Pettit, "Demonstration of npn InAs bipolar transistors with inverted base doping", *IEEE Electron Device Letters* 17, pp. 166-168 (1996)
- Driad98 R. Driad, Z.H. Lu, S. Laframboise, D. Scansen, W.R. McKinnon et S.P. McAlister, "Surface passivation of InGaAs/InP heterostructures using UV-irradiation and ozone", *IEEE Proceedings of IPRM*, pp. 459-462 (1998)
- Driad09 R. Driad, R.E. Makon, V. Hurm, F. Benkhelifa, R. Lösch, J. Rosenzweig et M. Schlechtweg, "InP-based DHBT technology for high-speed mixed signal and digital applications", *IEEE Proceedings of IPRM*, pp. 10-15 (2009)

- Dumke72 W.P. Dumke, J.M. Wodal et V.L. Rideout, "GaAs-GaAlAs heterojunction transistor for high frequency operations", *Solid-State Electronics* 15, pp. 1339-1343 (1972)
- Dutta97 P.S. Dutta, H.L. Bhat et V. Kumar, "The physics and technology of gallium antimonide : an emerging optoelectronic material", *Journal of Applied Physics* 81, pp. 5821-5870 (1997)
- Enquist93 P.M. Enquist, D.B. Slater, J.A. Hutchby, A.S. Morris et R.J. Trew, "Self-aligned AlGaAs/GaAs HBT with selectively regrown OMVPE emitter", *IEEE Electron Device Letters* 14, pp. 295-297 (1993)
- Ferry75 D.K. Ferry, "High-field transport in wide-band-gap semiconductors", *Physical Review B* 12, pp. 2361-2369 (1975)
- Fox08 A. Fox, B. Heinemann, R. Barth, D. Bolze, J. Drews, U. Haak, D. Knoll, B. Kuck, R. Kurps, S. Marschmeyer, H.H. Richter, H. Rucker, P. Schley, D. Schmidt, B. Tillack, G. Weidner, C. Wipf, D. Wolansky et Y. Yamamoto, "SiGe HBT module with 2.5 ps gate delay", *IEEE Proceedings of IEDM*, pp. 1-4 (2008)
- Fujihara01 A. Fujihara, Y. Ikenaga, H. Takahashi, M. Kawanaka et S. Tanaka, "High speed InP/InGaAs DHBTs with ballistic collector launcher structure", *IEEE Proceedings of IEDM*, pp. 35.3.1-35.3.4 (2001)
- Furukawa88 A. Furukawa et M. Mizuta, "Heterojunction bipolar transistor utilising AlGaSb/GaSb alloy system", *Electronics Letters* 24, pp. 1378-1380 (1988)
- Gatzke97 C. Gatzke, S.J. Webb, K. Fobelets et A. Stradling, "In-situ monitoring of the selective etching of antimonides in GaSb/AlSb/InAs heterostructures using Raman spectroscopy", *IEEE Proceedings of ISCS*, pp. 337-340 (1997)
- Geynet08a B. Geynet, P. Chevalier, B. Vandelle, F. Brossard, N. Zerounian, M. Buczko, D. Gloria, F. Aniel, G. Dambrine, F. Danneville, D. Dutartre, A. Chantre, "SiGe HBTs featuring $f_T > 400\text{GHz}$ at room temperature", *IEEE Proceedings of BCTM*, pp. 121 – 124 (2008)
- Geynet08b Boris Geynet, Thèse en Sciences de l'Université des Sciences et Technologies de Lille I, décembre 2008, « Développement et étude de transistors bipolaires à hétérojonctions Si/SiGe:C pour les technologies BiCMOS millimétriques »

- Gladkov95 P.S. Gladkov, Ts. Marinova, V. Krastev et Sh. Dinkov, "Study of a new chemical etchant for GaSb (100) and (111) substrate preparation for epitaxial growth", *Journal of the Electrochemical Society* 142, pp. 2413-2417 (1995)
- Glisson78 T.H. Glisson, J.R. Hauser, M.A. Littlejohn et C.K. Williams, "Energy bandgap and lattice constant contours of iii-v quaternary alloys", *Journal of Electronic Material* 7, pp. 1-16 (1978)
- Godey05 S. Godey, S. Dhellemmes, A. Wilk, M. Zaknour et F. Mollet, "CBr₄ and Be heavily doped InGaAs grown in a production MBE system", *Journal of Crystal Growth* 278, pp. 600-603 (2005)
- Gomez89 L.J. Gomez Zazo, M.T. Montojo, J.L. Castaño et J. Piqueras, "Chemical cleaning of GaSb (1,0,0) surfaces", *Journal of the Electrochemical Society* 136, pp. 1480-1484 (1989)
- Griffith05 Zachary M. Griffith, Thèse en Sciences de l'University of California Santa Barbara, septembre 2005, "Ultra High Speed InGaAs / InP DHBT Devices and Circuits"
- Griffith07 Z. Griffith, E. Lind et M.J.K. Rodwell, "Sub-300 nm InGaAs/InP Type-I DHBTs with 150 nm collector, 30 nm base demonstrating 755 GHz f_{max} and 416 GHz f_T ", *IEEE Proceedings of IPRM*, pp. 403-406 (2007)
- Gutierrez99 A. Gutierrez-Aitken, E. Kaneshiro, B. Tang, J. Notthoff, P. Chin, D. Streit et A. Oki, "69 GHz frequency divider with a cantilevered base InP DHBT", *IEEE Proceedings of IEDM*, pp. 779-782 (1999)
- Gutierrez08 A. Gutierrez-Aitken, C. Monier, P. Chang, D. Scott, K. Sato, E. Kaneshiro, B. Oyama, B. Chan, E. Kunkee, K. Loi, D. Sawdai, A. Cavus and A. Oki, "Advanced HBT Microelectronics at Northrop Grumman Space Technology", *IEEE Proceedings of IPRM*, pp. 1-5 (2008)
- Harris75 J. M. Harris, E. Lugujo, S.U. Campisano, M.A. Nicolet et R. Shima, "Studies on the Al₂O₃-Ti-Mo-Au metallization system", *Journal of Vacuum Science and Technology* 12, pp. 524-527 (1975)
- Hatzakis80 M. Hatzakis, "PMMA copolymers as high sensitivity electron resists", *Journal of Vacuum Science and Technology B* 16, pp. 1984-1988 (1980)
- Hayama88 N. Hayama, M. Madihan, A. Okamoto, H. Toyoshima et K. Honjo, "Fully self-aligned AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistors for high-speed integrated-circuits application", *IEEE Transactions on Electron Devices* 35, pp. 1771-1777 (1998)

- Hayama90 N. Hayama et K. Honjo, "Emitter size effect on current gain in fully self-aligned AlGaAs/GaAs HBT's with AlGaAs surface passivation layer", *IEEE Electron Device Letters* 11, pp. 388-390 (1990)
- He06 G. He, M. Le, P. Partyka, R. Hess, G. Kim, R. Lee, R. Bryie, E. Sovero, M. Helix et R. Milano, "Recent Advances in InP DHBT Manufacturing Technology", *IEEE Proceedings of IEDM*, pp. 1-4 (2006)
- Heinz83 Ch. Heinz, "Ohmic contacts to p- and n-type GaSb", *International Journal of Electronics* 54, pp. 247-254 (1983)
- Hill05 P. Hill, N. Weisse-Bernstein, L.R. Dawson, P. Dowd et S. Krishna, "Activation energies for Te and Be in metamorphically grown AlSb and In_xAl_{1-x}Sb layers", *Applied Physics Letters* 87, 092105 (2005)
- Hinkle09 C.L. Hinkle, M. Milojevic, B. Brennan, A.M. Sonnet, F.S. Aguirre-Tostado, G.J. Hughes, E.M. Vogel et R.M. Wallace, "Detection of Ga suboxides and their impact on III-V passivation and Fermi-level pinning", *Applied Physics Letters* 94, 162101 (2009)
- C.L. Hinkle, M. Milojevic, E.M. Vogel et R.M. Wallace, "Surface passivation and implications on high mobility channel performance", *Microelectronic Engineering* 86, pp. 1544-1549 (2009)
- Hove94 J.M. Van Hove, P.P. Chow, M.F. Rosamond, G.L. Carpenter et L.A. Chow, "Carbon doping by a compact electron beam source", *Journal of Vacuum Science and Technology B* 12, pp. 1200-1202 (1994)
- Hsin00 Y.M. Hsin et P.M. Asbeck, "Experimental I-V characteristics of AlGaAs/GaAs and GaInP/GaAs (D)HBTs with thin bases", *Solid-State Electronics* 44, pp. 587-592 (2000)
- Hu95 B.B. Hu et M.C. Nuss, "Imaging with terahertz waves", *Optics Letters* 20, pp. 1716-1718 (1995)
- Hu98 J. Hu, X.G. Xu, J.A.H. Stotz, S.P. Watkins, A.E. Curzon, M.L.W. Thewalt, N. Matine et C.R. Bolognesi, "Type II photoluminescence and conduction band offsets of GaAsSb/InGaAs and GaAsSb/InP heterostructures grown by metalorganic vapour phase epitaxy", *Applied Physics Letters* 73, pp. 2799-2801 (1998)
- Humphreys04 K. Humphreys, J.P. Loughran, M. Gradziel, W. Lanigan, T. Ward, J.A. Murphy et C. O'Sullivan, "Medical applications of terahertz imaging: a review of current technology and potential applications in biomedical engineering", *IEEE Proceedings of EMBS* 1, pp. 1302-1305 (2004)

- Hussain04 T. Hussain, Y. Royter, D. Hitko, M. Montes, M. Madhav, I. Milosavljevic, R. Rajavel, S. Thomas, M. Antcliffe, A. Arthur, Y. Boegeman et M. Sokolich, "First demonstration of sub-0.25 μ m-width emitter InP-DHBTs with > 400 GHz f_T and > 400 GHz f_{max} ", IEEE Proceedings of IEDM, pp. 553-556 (2004)
- Huylenbroeck09 S. Van Huylenbroeck, A. Sibaja-Hernandez, R. Venegas, S. You, G. Winderickx, D. Radisic, W. Lee, P. Ong, T. Vandeweyer, N.D. Nguyen, K. De Meyer et S. Decoutere, "A 400GHz f_{max} fully self-aligned SiGe:C HBT architecture", IEEE Proceedings of BCTM, pp. 5-8 (2009)
- Ida02 M. Ida, K. Kurishima et N. Watanabe, "Over 300 GHz f_T and f_{max} InP/InGaAs double heterojunction bipolar transistors with a thin pseudomorphic base", IEEE Electron Device Letters 23, pp. 694-696 (2002)
- Ikoma77 T. Ikoma, K. Sakai, Y. Adachi et H Yanai, "Electron transport properties of $Ga_xIn_{1-x}Sb$ calculated by the Monte Carlo method", Japanese Journal of Applied Physics 16, pp. 1379-1387 (1977)
- Ikossi02 K. Ikossi, M. Goldenberg et J. Mittereder, "Metallization options and annealing temperatures for low contact resistance ohmic contacts to n-type GaSb", Solid-State Electronics 46, pp. 1627-1631 (2002)
- Isomura74 S. Isomura, F.G.D. Prat, J.C. Woolley, "Electroreflectance spectra of $Al_xIn_{1-x}Sb$ alloys", Physica Status Solidi B 65, pp. 213-219 (1974)
- Ito92 H. Ito, O. Nakajima, T. Furuta et J.S. Harris, "Influence of dislocations on the DC characteristics of AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistors", IEEE Electron Device Letters 13, pp. 232-234 (1992)
- Ito93 H. Ito, O. Nakajima, K. Nagata, T. Makimura et T. Ishibashi, "Extrinsic base recombination current in surface-passivated InGaP/GaAs heterojunction bipolar transistors", Japanese Journal of Applied Physics 32, pp. L1500-L1502 (1993)
- Iyer87 S.S. Iyer, G.L. Patton, S.S. Delage, S. Tiwari et J.M.C. Stork, "Silicon-germanium base heterojunction bipolar transistor by molecular beam epitaxy", IEEE Proceedings of IEDM, pp. 874-876 (1987)
- Jin04 Z. Jin, S. Neumann, W. Prost and F.J. Tegude, "Surface recombination mechanism in graded-base InGaAs-InP HBTs", IEEE Transactions on Electron Devices 51, pp.1044-1045 (2004)

- John07 J.P. John, J. Kirchgessner, D. Morgan, J. Hildreth, M. Dawdy, R. Reuter et Hao Li, “Novel collector structure enabling low-cost millimeter-wave SiGe:C BiCMOS technology”, Proceedings of RFIC, pp. 559-562 (2007)
- Kahn04 Mathias Kahn, Thèse en Sciences de l’Université de Paris XI Orsay, juin 2004, « Transistor Bipolaire à Hétérojonction GaInAs/InP pour circuits ultra-rapides : structure, fabrication et caractérisation »
- Katz92 Indium Posphide and Related Materials : Processing, Technology and Devices, A. Katz, Ed. Artech House (1992)
- Kim02 Y. M. Kim, M. J. W. Rodwell, et A. C. Gossard, “Thermal characteristics of InP, InAlAs and AlGaAsSb metamorphic buffer layers used in InAlAs/InGaAs HBTs grown on GaAs substrates,” Journal of Electronic Materials 31, pp. 196–199 (2002)
- Kirk62 C.T. Kirk, “A theory of transistor cutoff frequency (f_T) falloff at high current densities”, IRE Transactions on Electron Devices 9, pp. 164 – 174 (1962)
- Kitamura96 N. Kitamura, “Characterization of GaSb anodic oxide grown in a solution of 3% tartaric acid and ethylene glycol using XPS and ellipsometry”, Materials Letters 29, pp. 77-79 (1996)
- Kroemer57 H. Kroemer, “Theory of a wide-gap emitter for transistors”, Proceedings of the IRE 45, pp. 1535-1537 (1957)
- Kroemer82 H. Kroemer, “Heterostructure bipolar transistors and integrated circuits”, Proceedings of the IEEE 70, pp.13-25 (1982)
- Kurishima93 K. Kurishima, H. Nakajima, T. Kobayashi, Y. Matsuoka et T. Ishibashi, "High speed InP/InGaAs double-heterostructure bipolar transistors with suppressed collector current blocking", Applied Physics Letters 62, pp. 2372-2374 (1993)
- Kurishima95 K. Kurishima, H. Nakajima, S. Yamahata, T. Kobayashi et Y. Matsuoka, “Effects of a compositionally graded $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ base in abrupt-emitter InP/InGaAs HBT”, Japanese Journal of Applied Physics 34, pp. 1221-1227 (1995)
- Kurokawa65 K. Kurokawa, “Power waves and the scattering matrix”, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 13, pp. 194-202 (1965)

- Lefebvre05 Eric Lefebvre, Thèse en Sciences de l'Université des Sciences et technologies de Lille I, juin 2005, « Croissance métamorphique par Epitaxie par Jets Moléculaires et caractérisations physiques pour Transistor Bipolaire à Hétérojonction InP/InGaAs sur GaAs »
- Li08 J.C. Li, K.R. Elliott, D.S. Matthews, D.A. Hitko, D.M. Zehnder, Y. Royter, P.R. Patterson, T. Hussain et J.F. Jensen, "100GHz+ gain-bandwidth differential amplifiers in a wafer scale heterogeneously integrated technology using 250nm InP DHBTs and 130 nm CMOS," IEEE Proceedings of CSICS, pp. 227–230 (2008)
- Lijadi05 Melania Lijadi, Thèse en Sciences de l'Université Paris VI, septembre 2005, « Transistors bipolaires à hétérojonction : développement d'une filière InP/GaAsSb pour applications ultra-rapides »
- Lin98 C.L. Lin, Y.K. Su, T.S. Se et W.L. Li, "Variety transformation of compound at GaSb surface under sulfur passivation", Japanese Journal of Applied Physics 37, pp. L1543-L1545 (1998)
- Liu91 W. Liu, D. Costa et J. Harris, "Comparison of the effects of surface passivation and base quasi-electric fields on the current gain of AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistors grown on GaAs and Si substrates", Applied Physics Letters 59, pp. 691-693 (1991)
- Liu92a W. Liu et J.S. Harris, "Effects of emitter-base contact spacing on the current gain in heterojunction bipolar transistors", Japanese Journal of Applied Physics 31, pp. 2349-2351 (1992)
- Liu92b W. Liu et J.S. Harris, "Diode ideality factor for surface recombination current in AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistors", IEEE Transactions on Electron Devices 39, pp. 2726-2732 (1992)
- Liu93 W. Liu, E. Beam, T. Henderson et S.K. Fan, "Extrinsic base surface passivation in GaInP/GaAs heterojunction bipolar transistors", IEEE Electron Device Letters 14, pp. 301-303 (1993)
- Liu95 W. Liu, D. Hill, H.-F. Chau, J. Sweder, T. Nagle et J. Delaney, "Laterally Etched Undercut (LEU) technique to reduce base-collector capacitances in HBTs", IEEE Proceedings of GaAs IC Symposium, pp. 167-170 (1995)

- Liu03 Z.Y. Liu, B. Hawkins et T.F. Kuech, "Chemical and structural characterization of GaSb (100) surfaces treated by HCl-based solutions and annealed in vacuum", *Journal of Vacuum Science and Technology B* 21, pp. 71-77 (2003)
- Z.Y. Liu, T.F. Kuech et D.A. Saulys, "A comparative study of GaSb (100) surface passivation by aqueous and non aqueous solutions", *Applied Physics Letters* 83, pp. 2587-2589 (2003)
- Liu04 H.G. Liu, N.G. Tao, S.P. Watkins et C.R. Bolognesi, "Extraction of the average collector velocity in high-speed "Type-II" InP-GaAsSb-InP DHBTs," *IEEE Electron Device Letters*, pp. 769-771 (2004)
- Liu07 H.G. Liu, O. Ostinelli, Y. Zeng, et C.R. Bolognesi, "600 GHz InP/GaAsSb/InP DHBTs grown by MOCVD with a Ga(As,Sb) gradedbase and $f_T \times BV_{CEO} > 2.5$ THz-V at room temperature," *IEEE Proceedings of IEDM*, pp. 667-670 (2007)
- Liu08 H.G. Liu, O. Ostinelli, Y. Zeng, et C.R. Bolognesi, "Emitter-size effects and ultimate scalability of InP:GaInP/GaAsSb/InP DHBTs", *IEEE Electron Device Letters* 29, pp.546-548 (2008)
- Lobisser09 E. Lobisser, Z. Griffith, V. Jain, B.J. Thibeault et M.J.W. Rodwell, "200-nm InGaAs/InP type I DHBT employing a dual-sidewall emitter process demonstrating $f_{max} \gg 800$ GHz and $f_t = 360$ GHz", *IEEE Proceedings of IPRM*, pp. 16-19 (2009)
- Lothian92 J.R. Lothian, J.M. Kuo, W.S. Hobson, E.Lane, F.Ren et S.J. Pearton, "Wet and dry etching characteristics of $Al_{0.5}In_{0.5}P$ ", *Journal of Vacuum Science and Technology B* 10, pp. 1061-1065 (1992)
- Low05 T.S. Low, M.W. Dvorak, M. Farhoud, R.E. Yeats, M. Iwamoto, G.K. Essilfie, T. Engel, B. Keppeler, J.S.C. Chang, J. Hadley, G. Patterson, F. Kellert, N. Moll, S.R. Bahl, C.P. Hutchinson, E. Ehlers, M.E. Adamski, M.K. Culver, D.C. D'Avanzo et T. Shirley, "GaAsSb DHBT IC Technology for RF and Microwave Instrumentation", *IEEE proceedings of CSICS* (2005)
- Magno02 R. Magno, B.R. Bennett, K. Ikossi, M.G. Ancona, E.R. Glaser, N. Papanicolaou, J.B. Boos, B.V. Shanabrook et A. Gutierrez, "Antimony-based quaternary alloys for high-speed low-power electronic devices", *IEEE Proceedings of Lester Eastman Conference on High Performance Devices*, pp. 288-296 (2002)

- Magno05 R. Magno, J.B. Boos, P.M. Campbell, B.R. Bennett, E.R. Glaser, B.P. Tinkham, M.G. Ancona, K.D. Hobart, D. Park et N.A. Papanicolaou, "InAlAsSb/InGaSb double heterojunction bipolar transistor", *Electronics Letters* 41, pp. 370-371 (2005)
- Magno06a R. Magno, E.R. Glaser, B.P. Tinkham, J.G. Champlain, J.B. Boos, M.G. Ancona et P.M. Campbell, "Narrow band gap InGaSb, InAlAsSb alloys for electronic devices," *Journal of Vacuum Science and Technology B* 24, pp. 1622-1625 (2006)
- Magno06b E.R. Glaser, R. Magno, B.V. Shanabrook et J.G. Tischler, "Optical characterization of $\text{In}_{0.27}\text{Ga}_{0.73}\text{Sb}$ and $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ epitaxial layers for development of 6.2-Å-based heterojunction bipolar transistors," *Journal of Vacuum Science and Technology B* 24, pp. 1604-1606 (2006)
- Maimon02 S. Maimon, K.L. Averett, X. Wu, M.W. Koch et G.W. Wicks, "InAs-based heterojunction bipolar transistors", *Electronics Letters* 38, pp. 344-346 (2002)
- Makimoto91 T. Makimoto, K. Kurishima, T. Kobayashi et T. Ishibashi, "InP/InGaAs double heterojunction bipolar transistors grown on Si", *Japanese Journal of Applied Physics* 30, pp. 3815-3817 (1991)
- Makon09 R.E. Makon, R. Driad, R. Loesch, J. Rosenzweig, M. Schlechtweg et O. Ambacher, "InP DHBT-based 1:2 DEMUX IC operating at up to 120 Gbit/s", *Electronics Letters* 45, pp. 1340-1342 (2009)
- Malik83 R.J. Malik, J.R. Hayes, F. Capasso, K. Alavi et A.Y. Cho, "High-gain $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}/\text{Ga}_{0.53}\text{As}$ vertical n-p-n heterojunction bipolar transistors grown by molecular-beam epitaxy", *IEEE Electron Device Letters* 4, pp. 383-385 (1983)
- Martinez05 Amanda Martinez-Gil, Thèse en Sciences de l'Université Paris-Sud XI, Orsay, décembre 2005, « Nanostructuration de surfaces de silicium pour guider la croissance auto-organisée de nanostructures métalliques »
- Mathieu04 Physique des semiconducteurs et des composants électroniques, 5^{ème} édition, H. Mathieu, Dunod (2004)
- Matine96 Nouredine Matine, Thèse en Sciences de l'Université de Paris XI, juillet 1996, « Réalisation et caractérisation de transistors bipolaires à hétérojonction InP/InGaAs/Métal »

- Matine98 N. Matine, M.W. Dvorak, C.R. Bolognesi, X. Xu, J. Hu, S.P. Watkins et M.L.W Thewalt MLW, “Nearly ideal InP/GaAsSb/InP double heterojunction bipolar transistors with ballistically launched collector electrons”, *Electronics Letters* 34, pp.1700-1702 (1998).
- McAlister97 S.P. McAlister, W.R. McKinnon, R. Driad et A.P. Renaud, “Use of dipole doping to suppress switching in indium phosphide double heterojunction bipolar transistors”, *Journal of Applied Physics* 82, pp. 5231-5234 (1997)
- Metzger92 R.A. Metzger, M. Hafizi, R.G. Wilson, W.E. Stanchina, J.F. Jensen et L.G. McCray, “Be diffusion at the emitter-base junction of graded AlInAs/GaInAs heterojunction bipolar transistors”, *Journal of Vacuum Science and Technology B* 10, pp. 2347-2350 (1992)
- Miller85 D.L. Miller et P.M. Asbeck, “Be redistribution during growth of GaAs and AlGaAs by molecular beam epitaxy”, *Journal of Applied Physics* 57, pp. 1816-1822 (1985)
- Milnes94 A.G. Milnes, M. Ye et M.Stam, “Ohmic contacts of Au and Ag to p-GaSb”, *Solid-State Electronics* 37, pp. 37-44 (1994)
- Miura06 M. Miura, H. Shimamoto, R. Hayami, A. Kodama, T. Tominari, T. Hashimoto et K. Washio, “Promoting emitter diffusion process and optimization of vertical profiles for high-speed SiGe HBT/BiCMOS”, *IEEE Transactions on Electron Devices* 53, pp. 857-865 (2006)
- Miyamoto96 Y. Miyamoto, J.M.M. Rios, A.G. Dentai et S. Chandrasekhar, “Reduction of base-collector capacitance by undercutting the collector and subcollector in GaInAs/InP DHBT’s”, *IEEE Electron Device Letters* 17, pp. 97-99 (1996)
- Monier03 C. Monier, D. Sawdai, A. Cavus, R. Sandhu, M. Lange, J. Wang, J. Yamamoto, R. Hsing, S. Hayashi, A. Noori, T. Block, M.S. Goorsky et A. Gutierrez-Aitken, “High indium content metamorphic (In,Al)As/(In,Ga)As heterojunction bipolar transistors”, *IEEE Proceedings of IPRM*, pp. 32-35 (2003)
- Monier04 C. Monier, A. Cavus, R.S. Sandhu, M.D. Lange, P. Cheng, B. Chan, D.J. Sawdai, P.C. Chang, V.F. Gambin, B. Oyama, T.R. Block et A.L. Gutierrez-Aitken, “Narrow-band-gap-HBT technology for low-power, high-speed applications”, *Proceedings of CSMaTech* (2004)

- Monier05 C. Monier, A. Cavus, R. Sandhu, D. Li, P. Nam, B. Chan, A. Oshiro, D. Matheson et A. Gutierrez-Aitken, "High performance low power 6.0 A HBT devices and circuits", IEEE Proceedings of DRC, pp. 267-268 (2005)
- Monier09 C. Monier, M. D'Amore, D. Scott, A. Cavus, E. Kaneshiro, S. Lin, P.C. Chang, L. Dang, K. Sato, V. Radisic, M. Truong, P. Nam, D. Pascua, D. Li, B. Chan, R. Sandhu, J. Wang, B. Oyama, A. Gutierrez et A. Oki, "172 GHz divide-by-two circuit using a 0.25 μm InP HBT technology", IEEE Proceedings of IPRM, pp. 24-27 (2009)
- Morpugo97 A.F. Morpugo, B.J. Van Wees, T.M. Klapwijk et G. Borghs, "Submicron processing of InAs based quantum wells : a new, highly selective wet etchant for AlSb", Applied Physics Letters 70, pp.1435-1437 (1997)
- Mukherjee79 S.D. Mukherjee, DV. Morgan, M.J. Howes, J.G. Smith et P. Brook, "Reactions of vacuum-deposited thin Schottky barrier metallizations on gallium arsenide", Journal of Vacuum Science and Technology 16, pp. 138-140 (1979)
- Nakagawa89 A. Nakagawa, H. Kroemer et J.H. English, "Electrical properties and band offsets of InAs/AlSb n - N isotype heterojunctions grown on GaAs", Applied Physics Letter 54, p. 1893 (1989)
- Nodjiadjim09 Virginie Nodjiadjim, Thèse en Sciences de l'Université des Sciences et technologies de Lille I, avril 2009, « Transistor bipolaire à double hétérojonction submicronique InP/InGaAs pour circuits numériques ou mixtes ultra-rapides »
- Notten84 P.H.L. Notten, "The etching of InP in HCl solutions : A chemical mechanism", Journal of the Electrochemical Society 131, pp. 2641- 2644, (1984)
- Nottenburg86 R.N. Nottenburg, H. Temkin, M.B. Panish et R.Hamm, "High gain InGaAs/InP heterostructure bipolar transistors grown by gas source molecular beam epitaxy", Applied Physics Letter 49, pp. 1112-1114 (1986)

- Noori04 A.M. Noori, R.S. Sandhu, S.L. Hayashi, E.D. Meserole, V. Hardev, A. Cavus, M. Lange, C. Monier, R. Hsing, D. Sawdai, M. Wojtowicz, T.R. Block, A. Gutierrez-Aitken et M.S. Goorsky, "Strain relaxation and surface roughness of InAlAs graded buffer layers grown on InP for 6.05 angstrom applications", *Journal of Vacuum Science and Technology B* 22, pp. 2303-2308 (2004)
- Nowicki78 R.S. Nowicki et I. Wang, "Improvement of the diffusion barrier properties of rf-sputtered molybdenum", *Journal of Vacuum Science and Technology* 15, pp. 235-237 (1978)
- Ohkubo08 Y. Ohkubo, T. Matsumoto, T. Koji, Y. Amano, A. Takagi et Y. Matsuoka, "High performance self-aligned InP/InGaAs DHBTs with a passivation ledge utilizing a thin etch stop layer", *IEEE Proceedings of IPRM*, pp. 1-4 (2008)
- Oigawa91 H. Oigawa, J.F. Fan, Y. Nannichi, H. Sugahara et M. Oshima "Universal passivation effect of (NH₄)₂S_x treatment on the surface of III-V compound semiconductors", *Japanese Journal of Applied Physics* 30, pp. L322-L325 (1991)
- Pekarik92 J.J. Pekarik, H. Kroemer et J.H. English, "An AlSb-InAs-AlSb double heterojunction P-N-P bipolar-transistor", *Journal of Vacuum Science and Technology B* 10, pp.1032-1034 (1992)
- Peter99 M. Peter, N. Herres, F. Fuchs, K. Winkler, K.H Bachem et J. Wagner, "Band gaps and band offsets in strained GaAs_{1-y}Sb_y on InP grown by metalorganic chemical vapour deposition", *Applied Physics Letters* 74, pp. 410-412 (1999)
- Petrovykh05 D.Y. Petrovykh, J.M. Sullivan et L.J. Whitman, "Quantification of discrete oxide and sulfur layers on sulfur-passivated InAs by XPS", *Surface and Interface Analysis* 37, pp. 989-997 (2005)
- Piotrowska95 A. Piotrowska, E. Kaminska, T. Piotrowski, S. Kasjaniuk, M. Gierlotka, X.W. Lin, Z. Liliental-Weber, J. Washburn et S. Kwiatkowski, "Interaction of Au with GaSb and its impact on the formation of ohmic contacts," *Acta Physica Polonica A* 87, pp. 419-422 (1995)
- Podevin01 Florence Podevin, Thèse en Sciences de l'Université des Sciences et technologies de Lille I, octobre 2001, « Composants Schottky à hétérostructures de semiconducteurs en technologie InP pour le mélange de fréquences à 560 GHz »

- Qinetiq Qinetiq, “Delivering customer focused solutions”, site Internet, consulté le 09/12/2009, http://www.qinetiq.com/home/newsroom/news_releases_homepage/2004/4th_quarter/mmw.html
- Reeves82 G.K. Reeves et H.B. Harrison, “Obtaining the specific contact resistance from Transmission Line Model Measurements”, *IEEE Electron Device Letters* 3, pp. 111-113 (1982)
- Renard05 Charles Renard, Thèse en Sciences de l’Université Paris VII, septembre 2005, « Hétérostructures antimoniures/arséniures pour les applications optoélectroniques dans le moyen infrarouge »
- Robinson04 J.A. Robinson et S.E. Mohny, “An improved In-based ohmic contact to n-GaSb”, *Solid-State Electronics* 48, pp. 1667-1672 (2004)
- Rodwell01 M.J.W. Rodwell, M. Urteaga, T. Mathew, D. Scott, D. Mensa, Q. Lee, J. Guthrie, Y. Betsler, S.C. Martin, R.P. Smith, S. Jaganathan, S. Krishnan, S.I. Long, R. Pallela, B. Agarwal, U. Bhattacharya, L. Samoska et M. Dahlstrom, “Submicron Scaling of HBTs”, *IEEE Transactions on Electron Devices* 48, pp. 2606-2622 (2001)
- Rohner01 M. Rohner, I. Schnyder, D. Huber, H. Jäckel et C. Bergamaschi, “Gain limitations of scaled InP-InGaAs heterojunction bipolar transistors”, *Journal of Applied Physics* 89, pp. 6444-6448 (2001)
- Rosker03 M. Rosker et J. Shah, “DARPA's program on Antimonide Based Compound Semiconductors (ABCS)”, *IEEE Proceedings of GaAs IC Symposium*, p. 293 (2003)
- Rosker08 M.J. Rosker, V. Greanya et T.H. Chang, “The DARPA COMpound Semiconductor Materials On Silicon (COSMOS) Program”, *IEEE Proceedings of CSICS*, pp. 1-4 (2008)
- Roth78 A.P. Roth, E. Fortin, “Interband magneto-optical study of the $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Sb}$ alloy system”, *Canadian Journal of Physics* 56, pp. 1468-1475 (1978)
- Sakaki77 H. Sakaki, L.L. Chang, R. Ludeke, Chin-An Chang, G.A. Sai-Halasz et L. Esaki, “ $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As-GaSb}_{1-y}\text{As}_y$ heterojunctions by molecular beam epitaxy”, *Applied Physics Letter* 31, p. 211 (1977)
- Sands88 T. Sands, “Compound semiconductor contact metallurgy”, *Materials Science and Engineering B* 1, pp. 289-312 (1988)

- Sauer92 N.J. Sauer et K.B. Chough, "A selective etch for InAlAs over InGaAs and for different InGaAlAs quaternaries", *Journal of Electrochemical Society* 139, pp. L10-L11 (1992)
- Schoenfeld98 W.V. Schoenfeld, M.J. Antonell et C.R. Abernathy, "Carbon doping of InSb using CBr₄ during growth by gas-source molecular beam epitaxy", *Applied Physics Letter* 72, pp. 1235-1237 (1998)
- Schwierz07 F. Schwierz et J.J. Liou, "RF transistors : recent developments and roadmap toward terahertz applications", *Solid-State Electronics* 51, pp. 1079-1091 (2007)
- Scott04 D. Scott, Y. Wei, Y. Dong, A.C. Gossard et M.J. Rodwell, "A 183 GHz f_T and 165 GHz f_{MAX} regrown-emitter DHBT with abrupt InP emitter", *IEEE Electron Device Letters* 25, pp. 360-362 (2004)
- Scott06 D.W. Scott, P.C. Chang, D. Sawdai, L. Dang, J. Wang, M. Barsky, W. Phan, B. Chan, B. Oyama, A. Gutierrez-Aitken, and A. Oki, "Sub-micrometer InP/InGaAs heterojunction bipolar transistors with $f_T = 400$ GHz and $f_{max} > 500$ GHz", *IEEE Proceedings of IPRM*, pp. 100-103 (2006)
- Shen92 T.C. Shen, G.B. Gao et H. Morkoç, "Recent developments in ohmic contacts for III-V compound semiconductors", *Journal of Vacuum Science and Technology B* 10, pp. 2113-2132 (1992)
- Shockley51 W. Shockley, Brevet US n° 2 569 347, 25 septembre 1951
- Sicault01 Delphine Sicault, Thèse en Sciences de l'Université Paris VI, juillet 2001, « Physique du transport balistique dans le transistor bipolaire à hétérojonction sur substrat InP : étude et application à des structures innovantes ultra-rapides »
- Sigmund01 J. Sigmund, M. Saglam, A. Vogt, H.L. Hartnagel, V. Buschmann, T. Wieder et H. Fuess, "Microstructure analysis of ohmic contacts on MBE grown n-GaSb and investigation of sub-micron contacts", *Journal of Crystal Growth* 227-228, pp. 625-629 (2001)
- Snider G. Snider, "1D Poisson Band Diagramm Calculator", programme téléchargé en octobre 2008 à parti du site Internet, <http://www.nd.edu/~gsnider/>

- Snodgrass06 W. Snodgrass, W. Hafez, N. Harff et M. Feng, “Pseudomorphic InP/InGaAs heterojunction bipolar transistors (PHBTs) experimentally demonstrating $f_T = 765$ GHz at 25°C increasing to $f_T = 845$ GHz at -55°C ”, IEEE Proceedings of IEDM, pp. 1-4 (2006)
- Snodgrass07 W. Snodgrass, B.R. Wu, K.Y. Cheng et M. Feng, “Type-II GaAsSb/InP DHBTs with Record $f_T = 670$ GHz and Simultaneous $f_T, f_{\text{max}} > 400$ GHz”, IEEE Proceedings of IEDM, pp. 663-666 (2007)
- Srnánek96 R. Srnánek, Š. Németh, J. Kováč, S. Kičín, B. Grietens, G. Borghs, J. Novák, V. Šestáková et L. Pekárek, “Classification of morphological defects on GaAs/AlAsSb/GaSb structures prepared by MBE”, Journal of Crystal Growth 165, pp.156-158 (1996)
- Stareev93 G. Stareev, H. Künzel et G. Dortmann, “ A controllable mechanism of forming extremely low-resistance non-alloyed ohmic contacts to group III-V compound semiconductors”, Journal of Applied Physics 74, pp. 7344-7356 (1993)
- Su85 L.M. Su, N. Grote, R. Kaumanns et H. Schroeter, “NpnN double heterojunction bipolar transistor on InGaAs”, Applied Physics Letter 47, pp. 28-30 (1985)
- Sugiura88 O. Sugiura, A. G. Dentai, C. H. Joyner, S. Chandrasekhar et J. C. Campbell, "High current gain InGaAs-InP double heterojunction bipolar transistors grown by metal organic vapour phase epitaxy" IEEE Electron Device Letters 9, pp. 253-255 (1988)
- Sze06 Physics of Semiconductor Devices, 3rd Edition, S.M. Sze, K.K. Ng, John Wiley & Sons, Inc. (2006)
- Tadayon93 S. Tadayon, G. Metze, A. Cornfeld, K. Pande, H. Huang et B. Tadayon, “Application of micro-airbridge isolation in high speed HBT fabrication”, Electronics Letters 29, pp. 26-27 (1993)
- Tadayon95 B. Tadayon, C.S. Kyono, M. Fatemi, S. Tadayon et J.A. Mittereder, “Extremely low specific contact resistivities for p-type GaSb, grown by molecular beam epitaxy”, Journal of Vacuum Science and Technology B 13, pp. 1-3 (1995)

- Tao05 N.G.M. Tao, H. Liu et C.R. Bolognesi, "Surface recombination currents in "type-II" NpN InP–GaAsSb–InP self-aligned DHBTs", IEEE Transactions on Electron Devices 52, pp. 1061-1066 (2005)
- Nick G. Tao, Thèse en Sciences de Simon Fraser University, 2006, "Characterization, simulation and optimization of type-II GaAsSb-based double heterojunction bipolar transistors"
- Teraview Teraview, "Terahertz technology for 3D imaging and spectroscopy", site Internet, consulté le 09/12/2009, <http://teraview.com/terahertz/id/14>
- Thibado96 P. M. Thibado, B. R. Bennett, M. E. Twigg, B. V. Shanabrook et L. J. Whitman, "Evolution of GaSb epitaxy on GaAs(001)-c(4 × 4)", Journal of Vacuum Science and Technology A 14, pp. 885-889 (1996)
- Thobel90 J.L. Thobel, L. Baudry, A. Cappy, P. Bourel et R. Fauquembergue, "Electron transport properties of strained In_xGa_{1-x}As", Applied Physics Letters 56, pp.346-348 (1990)
- Thomas03 S. Thomas, K. Elliott, D.H. Chow, B. Shi, P. Deelman, P. Brewer, A. Arthur, R. Rajavel, C.H. Fields et M. Madhav, "Fabrication and performance of InAs-based heterojunction bipolar transistors", IEEE Proceedings of IPRM, pp.26-31 (2003)
- S. Thomas, K. Elliott, D.H. Chow, R. Rajavel, P. Deelman, D. McLaughlin, Y. Boegeman et C.H. Fields, "High-speed 6.1 Angström InAs HBT devices and circuits", IEEE Proceedings of ISDRS, pp. 344-345 (2003)
- Tiwari88 S. Tiwari, D.J. Frank et S.L. Wright, "Surface recombination in GaAlAs/GaAs heterostructure bipolar transistors", Journal of Applied Physics 64, pp. 5009-12 (1988)
- Tiwari89 S. Tiwari et D.J. Frank, "Analysis of the Operation of GaAlAs/GaAs HBT's", IEEE Transactions on Electron Devices 36, pp. 2105-2121 (1989)
- Tuck75 B. Tuck, "The chemical polishing of semiconductors", Journal of Materials Science 10, pp. 321-339 (1975)
- Turner93 G. W. Turner, S.J. Eglash et A.J. Strauss, "Molecular-beam epitaxial growth of high-mobility n-GaSb", Journal of Vacuum Science and Technology B 11, pp. 864-867 (1993)

- Urteaga04 M. Urteaga, R. Pierson, P. Rowell, B. Brar, Z. Griffith, M. Dahlström, M.J. Rodwell, S. Lee, N. Nguyen et C. Nguyen, "Wide bandwidth InP DHBT technology utilizing dielectric sidewall spacers", IEEE Proceedings of IPRM, pp. 667-670 (2004)
- Vaidyanathan99 M. Vaidyanathan et D.L. Pulfrey, "Extrapolated f_{max} of heterojunction bipolar transistors", IEEE Transactions on Electron Devices 46, pp. 301-309 (1999)
- VanDerToorn07 R. Van Der Toorn, "Threshold current for the onset of Kirk effect in bipolar transistors with a fully depleted nonuniformly doped collector", IEEE Electron Device Letters 28, pp. 54-57 (2007)
- Varblianska97 K. Varblianska, K. Tzenev et T. Kotsinov, "Pd-based ohmic contacts to n-GaSb", Physica Status Solidi a 163, pp. 387-393 (1997)
- Varshni67 Y.P. Varshni, "Temperature dependence of the energy gap in semiconductors", Physica 34, p.149 (1967)
- Vechten70 J.A. Van Vechten et T.K. Bergstresser, "Electronic Structures of Semiconductor Alloys", Physical Review B 1, pp. 3351-3358 (1970)
- Vengurlekar90 A.S Vengurlekar, F. Capasso, T.H. Chiu, "Impact ionization in the base of a hot-electron AlSb/InAs bipolar-transistor", Applied Physics Letters 57, pp. 1772-1774 (1990)
- Venkatasubra.97 R. Venkatasubramanian, D. L. Dorsey et K. Mahalingam, "Heuristic rules for group IV dopant site selection in III-V compounds", Journal of Crystal Growth 175-176, pp. 224-228 (1997)
- Vig85 J.R. Vig, "Uv/ozone cleaning of surfaces", Journal of Vacuum Science and Technology A 3, pp. 1027-1034 (1985)
- Vignaud02 D. Vignaud, J.F. Lampin, E. Lefebvre, M. Zaknour et F. Mollot, "Electron lifetime of heavily Be-doped $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ as a function of growth temperature and doping density", Applied Physics Letters 80, pp. 4151-4153 (2002)
- Villemain93 E. Villemain, S. Gaillard, M. Rolland et A. Joullie, "Characterization of ohmic contacts on n- and p-type GaSb", Materials Science and Engineering B 20, pp. 162-164 (1993)

- Vogt96 A. Vogt, H.L. Hartnagel, G. Mieke, H. Fuess et J. Smith, “Electrical and microstructure analysis of ohmic contacts to p- and n-type GaSb, grown by molecular beam epitaxy”, *Journal of Vacuum Science and Technology B* 14, pp. 3514-3519 (1996)
- Vogt98 A. Vogt, A. Simon, H.L. Hartnagel, J. Schikora, V. Buschmann, M. Rodewald, H. Fuess, S. Fascko, C. Koerdt, et H. Kurz, “Ohmic contact formation mechanism of the PdGeAu system on n-type GaSb grown by molecular beam epitaxy”, *Journal of Applied Physics* 83, pp. 7715-7719 (1998)
- Vogt99 A. Vogt, A. Simon, J. Weber, H.L. Hartnagel, J. Schikora, V. Buschmann et H. Fuess, “Non-annealed ohmic contacts to p-GaSb grown by molecular beam epitaxy”, *Materials Science and Engineering B* 66, pp. 199-202 (1999)
- Vurgaftman01 I. Vurgaftman, J.R. Meyer et L.R. Ram-Mohan, “Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys”, *Journal of applied physics* 89, pp. 5815-5875 (2001)
- Wagner93 J. Wagner, A.L. Alvarez, J. Schmitz, J.D. Ralston et P. Koidl, “Surface Fermi level pinning in epitaxial InSb studied by electric-field-induced Raman scattering”, *Applied Physics Letters* 63, pp. 349-351 (1993)
- Waldhoff09 Nicolas Waldhoff, Thèse en Sciences de l’Université des Sciences et Technologies de Lille I, décembre 2009, « Caractérisations et modélisations des technologies CMOS et BiCMOS de dernières générations jusque 220 GHz »
- Wang03 S.H. Wang, J.A. Robinson, S.E. Mohny et B.R. Bennett, “Shallow and thermally stable Pt/W/Au ohmic contacts to p-type InGaSb”, *Journal of Vacuum Science and Technology B* 21, pp. 633-640 (2003)
- Wang04a S.H. Wang, S.E. Mohny, J.A. Robinson et B.R. Bennett, “Sulfur passivation for shallow Pd/W/Au ohmic contacts to p-InGaSb”, *Applied Physics Letters* 85, pp. 3471-3473 (2004)
- Wang04b Hsiao-an Wang, Thèse en Sciences de la Pennsylvania State University, décembre 2004, “Design of shallow and thermally stable contacts on antimonide-based semiconductors”
- Wang05 S.H. Wang, J.E. Mohny, B.A. Hull et B.R. Bennett, “Design of a shallow thermally stable ohmic contact to p-type InGaSb”, *Journal of Vacuum Science and Technology A* 23, pp. 293-297 (2005)

- Wei04 Y. Wei, D.W. Scott, Y. Dong, A.C. Gossard et M.J. Rodwell, "A 160-GHz f_T and 140-GHz f_{MAX} submicrometer InP DHBT in MBE regrown-emitter technology", *IEEE Electron Device Letters* 25, pp. 232-234 (2004)
- Y. Wei, D. W. Scott, Y. Dong, A. C. Gossard and M. J. Rodwell, "280 GHz f_T InP DHBT with $1.2 \mu\text{m}^2$ base-emitter junction area in MBE regrown-emitter technology", 62nd DRC. Conference Digest, vol. 1, pp. 237-238, 21-23 June 2004
- Weimann06 N.G. Weimann, V. Houtsma, Y. Yang, J. Frackoviak, A. Tate, J. Chen, J. Weiner, J. Lee, Y. Baeyens et Y.K. Chen, "InP double-hetero bipolar transistor technology for 130 GHz clock speed", *Physica Status Solidi (c)* 3, pp. 452-455 (2006)
- Weimann08 N.G. Weimann, V. Houtsma, Y. Baeyens, J. Weiner, A. Tate, J. Frackoviak et Y.K. Chen, "InP DHBT Circuits for 100 Gb/s Ethernet Applications", *IEEE Proceedings of IPRM*, pp. 1-4 (2008)
- Welser99 R.E. Welser, N. Pan, D.P. Vu, P.J. Zampardi et B.T. McDermott, "Role of neutral base recombination in high gain AlGaAs/GaAs HBT's", *IEEE Transactions on Electron Devices* 46, pp. 1599-1607 (1999)
- Win92 P. Win, Y. Druelle, A. Cappy, Y. Cordier, J.Favre et C. Bouillet, "Metamorphic In_{0.30}Ga_{0.70}As/In_{0.29}Al_{0.71}As layer on GaAs : a new structure for high performance HEMT realization", *Applied Physics Letters* 61, pp. 922-924 (1992)
- Yang96 Z. C. Yang, P.H. Hao et L.C. Wang, "Au/In/Pd/Te/Pd ohmic contact to n-GaSb", *Electronics Letters* 32, pp. 2348-2349 (1996)
- Yang02 K. Yang, J.C. Cowles, J.R. East et G.I. Haddad, "Theoretical and experimental dc characterization of InGaAs-based abrupt emitter HBT's", *IEEE Transactions on Electron Devices* 42, pp. 1047-1058 (1995)
- Yarekha07 D.A. Yarekha, S. Godey, X. Wallart, H. Colder, M. Zaknour et F. Mollot, "MBE growth of heavily carbon doped GaAsSb on InP for heterojunction bipolar transistor applications", *Journal of Crystal Growth* 301-302, pp. 217-220 (2007)
- Yu04 D. Yu, K. Choi, K. Lee, B. Kim, H. Zhu, K. Vargason, J.M. Kuo, P. Pinsukanjana et Y.C. Kao, "Ultra high-speed 0.25-ps emitter InP-InGaAs SHBTs with f_{max} of 687 GHz", *IEEE Proceedings of IEDM*, pp. 557-560 (2004)

- Yuan07 J. Yuan, R. Krithivasan, J.D. Cressler, M.H. Khater, D.C. Ahlgren et A.J. Joseph, "On the frequency limits of SiGe HBTs for terahertz applications", pp. 22-25 (2007)
- Zaknoune98 M. Zaknoune, B. Bonte, C. Gaquiere, Y. Cordier, Y. Druelle, D. Théron et Y. Crosnier, "InAlAs/InGaAs metamorphic HEMT with high current density and high breakdown voltage", IEEE Electron Device Letters 19, pp. 345-347 (1998)
- Zaknoune03 M. Zaknoune, M. Ardouin, Y. Cordier, S. Bollaert, B. Bonte et D. Théron, "60-GHz high power performance $\text{In}_{0.35}\text{Al}_{0.65}\text{As}$ - $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ metamorphic HEMTs on GaAs", IEEE Electron Device Letters 24, pp. 724-726 (2003)
- Zaknoune99 Mohammed Zaknoune, Thèse en Sciences de l'Université des Sciences et Technologies de Lille I, février 1999, « Etude de la technologie et des potentialités pour l'amplification de puissance hyperfréquence des transistors à effet de champ des filières phosphure AlGaInP/GaInAs et métamorphique AlInAs/GaInAs sur GaAs »
- Zaknoune08 M. Zaknoune, H. Colder, D.A. Yarekha, G. Dambrine et F. Mollot, "Current gain enhancement in GaAsSb/InP - DHBT type grown by MBE with a graded composition AlInP emitter", IEEE Proceedings of IPRM (2008)
- Zeng08 Y. Zeng, O. Ostinelli, H.G. Liu et C.R. Bolognesi, "Effects of arsenic mole fraction x on the gain characteristics of type-II InP/GaAs $_x$ Sb $_{1-x}$ DHBTs", Solid-state electronics 52, pp. 1202-1206 (2008)
- Zerounian07 N. Zerounian, F. Aniel, B. Barbalat, P. Chevalier et A. Chantre, "500 GHz cutoff frequency SiGe HBTs", Electronics Letters 43, pp. 774-775 (2007)