

N° d'ordre :

# **THESE**

Présentée à

**l'Université des Sciences et Technologies de Lille**

pour obtenir le titre de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITE**  
**Spécialité: ELECTRONIQUE**

par

Florence PODEVIN

**Composants Schottky à hétérostructures de semiconducteurs en  
technologie InP pour le mélange de fréquences à 560GHz**

soutenue le 12 octobre 2001 devant la commission d'examen

Membres du jury :	M. E. CONSTANT	Président
	M. D. LIPPENS	Directeur de thèse
	M. P. MOUNAIX	Co-directeur de thèse
	Mme. M. MOUIS	Rapporteur
	M. A. DE LUSTRAC	Rapporteur
	M. G. BEAUDIN	Examineur
	M. M. CHAUBET	Examineur
	M. S. DELAGE	Examineur
	M. R. FAUQUEMBERGUE	Examineur
	M. J.M. GOUTOULE	Examineur

## **Titre**

**Composants Schottky à hétérostructures de semiconducteurs en technologie InP pour le mélange de fréquences à 560GHz.**

## **Résumé**

Ce mémoire concerne la conception et la réalisation de composants électroniques adaptés à la fonction de mélange subharmonique en bande millimétrique et submillimétrique. Nos orientations ont porté sur l'optimisation, dans la filière InP, de diodes Schottky en configuration antiparallèle. Le GaInAs, de par sa forte mobilité électronique, s'avère particulièrement propice à la conduction électronique et à la montée en fréquence. Deux structures ont été étudiées par résolution numérique des équations de Poisson et de Schrödinger. L'hétérostructure métal/GaInAs présente des propriétés de non-linéarité ( $\eta=1.35$ ) intéressantes pour le mélange de fréquence avec néanmoins un seuil de conduction faible ( $V_d < 0.2V$ ). L'insertion d'une barrière de potentiel grand gap permet d'augmenter ce paramètre ( $V_d = 0.5V$ ) tout en conservant la forte mobilité du GaInAs. La non-linéarité de l'hétérostructure métal/AlInAs/GaInAs est fortement dégradée. Mais nous avons montré et justifié l'existence d'une épaisseur optimale de  $110\text{\AA}$  pour laquelle  $\eta=1.5$ .

Du point de vue de l'architecture technologique, l'accent a été mis sur la réalisation de diodes planaires de  $1\mu\text{m}^2$ , digitées, de type grille en T de transistor largement submicronique. Des techniques de moulage dans de la résine électronique et de gravure humide ont été optimisées et adaptées aux différentes étapes. Trois structures épitaxiales, diode sans barrière, avec une barrière épaisse de  $200\text{\AA}$  et avec une barrière moyenne de  $150\text{\AA}$  ont été réalisées et ont accrédité les tendances obtenues numériquement, à savoir la dépendance du seuil de conduction et de la non-linéarité en fonction de la présence et de l'épaisseur de la barrière. Les composants sans et avec barrière ont montré une fréquence de coupure de 0.8 et 2THz respectivement. Pour les diodes sans barrière, des pertes optimales de 6.6dB sous 4mW de puissance de pompe sont attendues dans un cas d'adaptation idéale de la cellule de mélange.

## **Mots clef**

Détection hétérodyne – Mélange fréquence – Structure non-linéaire – Diodes Schottky – Hétérostructure – InP – Grille transistor – Technologie submicronique

# Sommaire

<b>Introduction générale .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1 : Le mélange de fréquences RF .....</b>	<b>3</b>
<b>1.1. Contexte .....</b>	<b>3</b>
1.1.1. Les applications .....	3
1.1.1.a) <i>En astrophysique</i> .....	3
1.1.1.b) <i>Pour les télécommunications à haut-débit</i> .....	4
1.1.2. Les fonctions de base de la détection en radioastronomie .....	4
1.1.2.a) <i>Détection hétérodyne</i> .....	5
1.1.2.b) <i>Oscillateurs</i> .....	5
1.1.2.c) <i>Filtrage et bandes passantes</i> .....	6
<b>1.2. Principe du mélange harmonique .....</b>	<b>7</b>
1.2.1. Exploitation de la non-linéarité .....	7
1.2.2. Intermodulation .....	8
1.2.3. Paramètres essentiels .....	8
1.2.3.a) <i>Isolation OL et RF</i> .....	9
1.2.3.b) <i>Taux d'ondes stationnaires aux entrées RF et OL</i> .....	9
1.2.3.c) <i>Pertes de conversion</i> .....	9
1.2.3.d) <i>Bruit</i> .....	9
<i>Sources de bruit</i> .....	10
1.2.4. Composants potentiels.....	11
1.2.4.a) <i>La diode supra-conducteur/isolant/ supra-conducteur (SIS)</i> .....	11
1.2.4.b) <i>Le bolomètre à électrons chauds (HEB)</i> .....	12
1.2.3.c) <i>La diode Schottky</i> .....	14
<b>1.3. Principe du mélange sous harmonique.....</b>	<b>15</b>
1.3.1. Obtention des harmoniques supérieures .....	15
1.3.2. Réjection du fondamental dans les composantes d'intermodulation .....	15
1.3.3. Un composant générique en mélange sous harmonique.....	15
1.3.4. Pertes de conversion et température de bruit.....	16
<b>1.4. Etat de l'art pour des diodes Schottky .....</b>	<b>18</b>
<b>1.5. Influence des caractéristiques du composant sur les performances.....</b>	<b>20</b>
1.5.1. Formalisme sur MDS .....	20
1.5.1.a) <i>Intérêt de l'équilibrage harmonique</i> .....	20
1.5.1.b) <i>Principe de l'équilibrage harmonique (modèle temporel et modèle fréquentiel)</i> .....	20
1.5.1.c) <i>Formules de bruit : justification du bruit apporté par le mélangeur</i> .....	21
1.5.2. La modélisation numérique des composants .....	22
1.5.2.a) <i>Modélisation de diodes Schottky antiparallèles</i> .....	22
1.5.2.b) <i>Modélisation du mélangeur</i> .....	24
1.5.3. Performances attendues pour des diodes Schottky.....	25
1.5.3.a) <i>Influence du paramètre électrique <math>\eta</math></i> .....	25
1.5.3.b) <i>Influence du paramètre électrique <math>V_{bi}</math></i> .....	26
1.5.3.c) <i>Influence de la résistance série</i> .....	27
1.5.3.d) <i>Influence de la fréquence intermédiaire</i> .....	28
<b>1.6. Conclusions sur le choix de la filière III-V .....</b>	<b>29</b>
<b>1.7. Bibliographie .....</b>	<b>30</b>

<b>Chapitre 2 : Composants Schottky à hétérostructures.....</b>	<b>35</b>
<b>2.1. La barrière métal/SC.....</b>	<b>35</b>
2.1.1. Processus de conduction en polarisation directe .....	37
2.1.1.a) <i>Courant thermoïonique et courant de saturation</i> .....	37
2.1.1.b) <i>Influence de la densité d'états surfaciques</i> .....	38
2.1.1.c) <i>Courant tunnel</i> .....	39
2.1.2. Processus d'avalanche et effet tunnel en polarisation inverse.....	40
2.1.2.a) <i>Formalisme analytique</i> .....	40
2.1.2.b) <i>Application</i> .....	43
2.1.3. Caractéristique théorique d'une diode Schottky sur AsGa. Comparaison avec une diode expérimentale.....	43
2.1.4. Comportements capacitifs .....	44
2.1.4.a) <i>Capacité de désertion</i> .....	44
2.1.4.b) <i>Capacité de diffusion</i> .....	45
2.1.5. Corrections apportées .....	45
2.1.5.a) <i>Effet de force image ou effet Schottky</i> .....	45
2.1.4.b) <i>Effets bidimensionnels</i> .....	46
<b>2.2. Mécanismes de conduction pour le cas de structures complexes.....</b>	<b>48</b>
2.2.1. Exemples de structures .....	48
2.2.1.a) <i>Hétérojonctions M/LG</i> .....	48
2.2.1.b) <i>Hétérojonctions M/WG/LG</i> .....	49
2.2.2. Effets physiques.....	51
2.2.2.a) <i>Effet tunnel</i> .....	51
2.2.2.b) <i>Effet de localisation</i> .....	52
2.2.2.c) <i>Conclusion sur les effets physiques</i> .....	52
<b>2.3. Le modèle numérique .....</b>	<b>53</b>
2.3.1 Hypothèses de simulation.....	53
2.3.2 Discrétisation de l'équation de Poisson.....	54
2.3.3 Résolution de l'équation de Schrödinger par la méthode de Runge-Kutta [Pelletier71] .....	55
2.3.4 Calcul du courant : prise en compte du courant de fuite dans les deux cas de polarisation positive ou négative. ....	55
2.3.4.a) <i>Calcul du courant direct (indice f pour forward)</i> . ....	55
2.3.4.b) <i>Calcul du courant inverse (indice b pour backward)</i> . ....	56
2.3.5 Les grandeurs de sortie.....	57
<b>2.4. Résultats attendus pour les hétérostructures Schottky.....</b>	<b>58</b>
2.4.1. Diode à hétérojonctions M/LG.....	58
2.4.2. Diode à hétérojonction M/WG/LG.....	62
2.4.2.a) <i>Influence de l'épaisseur de la couche n, n' et d' fixes</i> . ....	64
2.4.2.b) <i>Influence de l'épaisseur et du dopage de la barrière. (<math>d+d'=1000\text{\AA}</math>)</i> ....	64
2.4.2.c) <i>Etude des chemins de conduction</i> .....	66
2.4.2.d) <i>Obtention d'un optimum pour l'épaisseur de barrière</i> .....	68
2.4.2.e) <i>Construction du courant</i> .....	70
2.4.2.f) <i>Caractéristiques I-V pour une surface de <math>1\mu\text{m}^2</math></i> .....	70
<b>2.5. Conclusion sur le choix d'une structure à partir des considérations physiques .....</b>	<b>72</b>
<b>2.6. Bibliographie.....</b>	<b>73</b>

<b>Chapitre 3 : Réalisation technologique des composants .....</b>	<b>77</b>
<b>3.1. Eléments fondamentaux de la technologie sur InP .....</b>	<b>78</b>
3.1.1. Considérations d'épitaxie.....	78
3.1.2. Technologie de base des gravures.....	79
3.1.2.a) Utilisation de la gravure sèche ? .....	79
3.1.2.b) Utilisation de la gravure humide .....	80
3.1.2.c) Attaque chimique limitée par la réaction : cas de l'acide orthophosphorique et de l'eau oxygénée dilués dans l'eau désionisée .....	82
3.1.2.d) Attaque chimique limitée par la diffusion : cas des acides chlorhydrique et iodique dilués dans l'eau désionisée.....	83
3.1.3. Techniques de lithographie .....	85
3.1.3.a) Le profil casquette propre à la technologie sur III-V .....	85
3.1.3.b) La lithographie optique.....	86
3.1.3.c) Le masquage électronique .....	88
3.1.3.d) Fonctionnement d'une écriture électronique.....	88
3.1.3.e) Défauts et contrôle des effets de proximité.....	90
3.1.3.f) Les résines copolymères.....	91
3.1.4. Technologie des contacts métalliques .....	93
3.1.4.a) Le contact ohmique .....	94
3.1.4.b) Le contact Schottky .....	95
3.1.5. Amincissement des substrats .....	97
3.1.5.a) L'aminçissement chimique .....	97
3.1.5.b) L'aminçissement « physique » abrasif.....	97
<b>3.2. Dessin du masque .....</b>	<b>99</b>
3.2.1. Masques d'écriture électronique SHOOKY.gds et SHOOKYT15.gds, (layers 1 et 2, 3, 6, 7, 8 sur WAVEMAKER).....	100
3.2.2. Masques de lithographie optique SHOOKY (layers 4, 5, 10 sur WAVEMAKER).....	102
3.2.3. Motifs pour la caractérisation des contacts ohmiques. ....	103
3.2.3.a) TLM standard. ....	104
3.2.3.b) TLM hyperbolique [Sawdai99].....	104
<b>3.3. Procédé de réalisation .....</b>	<b>106</b>
3.3.1. Dépôt du contact ohmique. ....	106
3.3.1.a) Ouverture des motifs (séquence (1) à (3) du Schéma 3.1) .....	106
3.3.1.b) Recess (séquence (4) et (5) du schéma 3.2).....	107
3.3.1.c) Métallisation (séquence (6) à (8) du schéma 3.3).....	108
3.3.2. Réalisation de la grille en T .....	109
3.3.2.a) Ouverture des motifs (séquence (9) et (10) du schéma 3.4).....	109
3.3.2.b) Métallisation (séquence (11) à (13) du schéma 3.5).....	112
3.3.3. Dépôt des plots d'épaississement.....	113
3.3.4. Réalisation du mesa d'isolation.....	114
3.3.5. Prédécoupe des composants pour montage en cellule de mélange .....	115
3.3.6. Amincissement du substrat .....	116
<b>3.4. Conclusion .....</b>	<b>118</b>
<b>3.5. Bibliographie .....</b>	<b>119</b>
<b>Annexe : Système automatisé PM5 Autolap. Vue légendée.....</b>	<b>123</b>

<b>Chapitre 4 : Tests radio-fréquence .....</b>	<b>125</b>
<b>4.1. Mesures statiques.....</b>	<b>125</b>
4.1.1. Caractéristiques DC des diodes Schottky .....	125
4.1.1.a) Cas de la diode métal/GaInAs. (S980903) .....	125
4.1.1.b) Cas de la diode métal/AlInAs/GaInAs, avec $d'$ initial=200Å. (G990123) .....	127
4.1.1.c) Cas de la diode métal/AlInAs/GaInAs, avec $d'$ initial=150Å. (G000314) .....	130
4.1.1.d) « Formation » des diodes .....	131
4.1.2. Antisymétrie des composants RF : G000314 .....	132
4.1.3. Comparaisons avec les résultats obtenus dans la littérature sur des surfaces de grande dimension.....	133
4.1.3.a) Cas du dépôt in-situ sur des couches semi conductrices sans barrière .	133
4.1.3.b) Cas de l'ingénierie de barrière.....	133
4.1.4. Mesures des résistances de contact ohmique.....	134
<b>4.2. Mesures dynamiques petit signal .....</b>	<b>135</b>
4.2.1. Mesure du $S_{11}$ à l'analyseur de réseaux vectoriels .....	135
4.2.2. Conditions de calibrage LRM .....	135
4.2.3. Test des structures sur InP sans barrière (S980903).....	136
4.2.3.a) Modèle du schéma équivalent.....	136
4.2.3.b) Extraction des paramètres parasites .....	136
4.2.3.c) Amélioration apportée aux basses fréquences.....	137
4.2.3.d) Performances fréquentielles .....	139
4.2.4. Test des structures sur InP avec barrière (G000314).....	139
4.2.4.a) Extraction des paramètres parasites à partir des coplanaires de 20µm	139
4.2.4.b) Performances fréquentielles .....	140
4.2.4.c) Modèle du schéma équivalent pour les composants RF .....	140
4.2.4.d) Extraction des paramètres parasites à partir des composants RF.....	141
4.2.5. Conclusions sur les tests de caractérisation en régime petit signal .....	142
<b>4.3. Performances grand signal attendues par équilibrage harmonique ...</b>	<b>143</b>
4.3.1. Sans barrière .....	143
4.3.1.a) Capacité parasite seule.....	143
4.3.1.b) Inductances de pont seules .....	144
4.3.1.a) Prise en compte de l'ensemble des éléments parasites .....	145
4.3.2. Avec barrière .....	147
<b>4.4. Conclusion .....</b>	<b>149</b>
<b>4.5. Bibliographie.....</b>	<b>150</b>

<b>Chapitre 5 : Alternatives au composant envisagé .....</b>	<b>153</b>
<b>5.1. Discussion sur le choix d'une structure de type mesa pour la diode Schottky .....</b>	<b>153</b>
5.1.1. Structure de type recess pour HEMT.....	154
5.1.1.a) <i>Facilités technologiques</i> .....	154
5.1.1.b) <i>Mais des inconvénients</i> .....	154
5.1.2. Structure verticale.....	155
5.1.2.a) <i>Limitation du terme de résistance série</i> .....	155
5.1.2.b) <i>Possibilité d'envisager une technologie du type BML</i> .....	155
5.1.2.c) <i>Procédé de réalisation</i> .....	156
5.1.2.d) <i>Difficultés technologiques du report épitaxial</i> .....	156
<b>5.2. La diode varactor à hétérostructure à plan de dopage : <math>\delta</math>-HBV .....</b>	<b>157</b>
5.2.1. Présentation des structures.....	157
5.2.1.a) <i>La barrière à plans de dopage : PDB</i> .....	157
5.2.1.b) <i>La <math>\delta</math>-HBV ou hétérostructure LG / <math>\delta</math> / WG / <math>\delta</math> / LG</i> .....	158
5.2.2. Simulations numériques préliminaires des caractéristiques électriques.....	159
5.2.2.a) <i>Similarité de comportement entre la <math>\delta</math>-HBV et la diode Schottky M / WG / LG</i> .....	159
5.2.2.b) <i>Intérêt et inconvénient par rapport à la diode Schottky</i> .....	160
5.2.3. Performances attendues par équilibrage harmonique.....	161
5.2.3.a) <i>Modélisation numérique</i> .....	161
5.2.3.b) <i>Fiabilité de la méthode</i> .....	162
5.2.3.c) <i>Pertes attendues pour la <math>\delta</math>-HBV</i> .....	163
<b>5.3. Application aux transistors bipolaires à hétérostructures : HBT .....</b>	<b>165</b>
5.3.1. Choix de la structure verticale.....	165
5.3.2. Réalisation technologique.....	165
5.3.2.a) <i>1<sup>ère</sup> étape : contacts émetteur + base</i> .....	166
5.3.2.b) <i>2<sup>ème</sup> étape : transfert épitaxial</i> .....	166
5.3.2.c) <i>3<sup>ème</sup> étape : contact collecteur</i> .....	166
5.3.3. Perspectives pour le HBT.....	167
<b>5.4. Conclusion .....</b>	<b>167</b>
<b>5.5. Bibliographie .....</b>	<b>168</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>171</b>

## Introduction générale

La compréhension de notre Univers est indubitablement un des thèmes les plus ambitieux parmi les axes de recherches explorés par l'Homme. Cette recherche a déjà suscité bon nombre de projets d'envergure internationale. Comprendre l'Univers, c'est analyser les signaux nous parvenant par le biais de systèmes de télédétection. Entre autres, les signaux aux longueurs d'ondes millimétriques et submillimétriques font actuellement l'objet d'un engouement majeur et supposent le développement d'applications analogiques adaptées à de telles longueurs d'onde.

Un système de télédétection comporte souvent une tête de réception hétérodyne intégrant les fonctions de mélange et d'oscillateur local. Il nécessite pour les applications spatiales le recours à des sources à l'état solide ainsi que des composants mélangeurs capables de fonctionner dans des conditions très spécifiques. On distingue deux types de télédétection. Les systèmes utilisés dans les radiotélescopes terrestres nécessitent des moyens de cryogénie importants. Pour les systèmes dits embarqués sur satellite, on préférera des composants fonctionnant aux températures ambiantes. Les diodes Schottky s'avèrent particulièrement aptes à ce type de télédétection. Ce sont des composants dont la non-linéarité est propice aux applications de mélange harmonique et subharmonique. En outre, les avancées actuelles en terme de réalisations technologiques permettent la fabrication de composants aux surfaces actives de plus en plus petites, de l'ordre, voire inférieures au micromètre carré. Ceci laisse présager de grandes capacités de montée en fréquence, tout en conservant des conditions de fonctionnement non critiques.

Ce travail constitue une étude prospective d'un composant mélangeur pour une tête de réception hétérodyne, basé sur les potentialités de diodes Schottky appairées en configuration antiparallèle. Il s'inscrit dans le cadre d'un contrat avec le Centre National d'Etudes Spatiales concernant l'étude et la réalisation d'un mélangeur subharmonique à 560GHz <sup>(1)</sup>. Ce projet a fait l'objet d'ouvertures originales. Du point de vue de la simulation, l'effort a essentiellement porté sur l'étude d'hétérostructures semiconductrices. Le contact redresseur Schottky doit présenter en effet les qualités requises pour un mélange subharmonique aux fréquences proches de 500GHz (faibles pertes, faible bruit, consommation optimale). Concernant la réalisation technologique, il s'agissait d'adapter à la filière InP une architecture technologique du composant déjà largement éprouvée dans la filière AsGa, en tenant compte des problèmes inhérents à la réduction des dimensions. Ce manuscrit reprend les différentes étapes de notre démarche.

Le premier chapitre explicite le mélange de fréquences. A partir de la description des différentes applications possibles, qui dépassent le seul cadre de la radioastronomie, les fonctions de base en télédétection seront détaillées. Le principe du mélange harmonique sera décrit par une approche théorique, ce qui nous permettra, ensuite, d'insister sur l'intérêt du mélange subharmonique à la fréquence de 560GHz. L'état de l'art actuel concernant les performances en mélange de diodes Schottky sur AsGa constituera une base de référence. Les performances espérées pour nos propres composants pourront ainsi être comparées à l'aide d'une analyse prédictive par équilibrage harmonique, paramétrée par les caractéristiques électriques des diodes Schottky. Ceci orientera notre choix vers une filière matériau.

(1) Contrat CNES : # 714/98/CNES/7280/00

Le second chapitre synthétise l'étude des composants Schottky à hétérostructures dans la filière InP. Afin de mieux appréhender les divers mécanismes de conduction observée, dans un premier temps, le cas de la barrière métal/semiconducteur fera l'objet d'une approche analytique pour une structure simple. Nous insisterons sur les comportements électriques d'un contact redresseur en terme de conduction électronique, directe ou inverse, et en terme de modulation de capacité. Nous envisagerons ensuite le cas de structures plus complexes telles que les hétérostructures du type métal/semiconducteur grand gap/semiconducteur faible gap. L'étude de telles structures passe par une résolution numérique de l'équation de Poisson puis de l'équation de Schrödinger. Nous présenterons succinctement le modèle numérique utilisé. Et nous focaliserons notre attention plus particulièrement sur les résultats attendus pour des hétérostructures Schottky sur InP.

Les résultats des simulations vont orienter notre choix quant aux structures épitaxiales sur lesquelles seront fabriqués les composants. Le chapitre 3 détaille les étapes successives de la fabrication effectuée dans la centrale de technologie de l'Institut d'Electronique et de Microélectronique du Nord (IEMN). En premier lieu, les éléments fondamentaux de la technologie sur matériaux III-V et plus précisément sur InP seront exposés. Les essais ou mises au point préliminaires à toute réalisation technologique viendront conforter le propos. Parmi les différentes solutions envisageables, nous choisirons les plus adaptées à la réalisation de diodes Schottky submicroniques. Ceci nous permettra de concevoir le dessin des masques de lithographie optique et électronique. Enfin, le procédé détaillé de la réalisation pourra être abordé en toute connaissance de cause.

Les caractéristiques électriques des divers composants fabriqués sont analysées au cours du chapitre 4. Les paramètres intrinsèques et extrinsèques propres à toute fabrication technologique sont extraits des mesures petit signal effectuées au sein de la centrale de caractérisation de l'IEMN. Sur la base de ces résultats, une analyse grand signal par équilibrage harmonique nous permettra de discuter des performances attendues pour les composants réalisés.

Finalement, le chapitre 5 envisage diverses alternatives au composant, tant du point de vue architectural que structurel. D'autres topologies technologique seront ainsi présentées. Une structure épitaxiale, naturellement plus adaptée au fonctionnement en mélange subharmonique, sera également abordée. Enfin, dans le cadre des transitions à haut débit, le cas du transistor bipolaire à hétérostructures fera l'objet d'une attention particulière. En technologie InP, il est l'aboutissement direct des efforts menés au sein de l'équipe Composants Quantiques et Dispositifs Terahertz pour développer des dispositifs haute fréquence.

## Conclusion générale

Ce travail de thèse a concerné essentiellement la réalisation d'un mélangeur subharmonique à 560GHz à base de diodes Schottky. La démarche habituelle de conception, réalisation et caractérisation de composants nous a permis de mettre l'accent sur deux axes de développement originaux. Tant pour la simulation des comportements intrinsèques des diodes que pour leur fabrication technologique, des avancées nouvelles ont été soulignées pour la filière InP.

Pour des raisons de montée en fréquence de fonctionnement, nous nous sommes intéressés au matériau GaInAs en accord de maille sur InP qui présente une forte mobilité électronique. Deux types d'hétérostructures ont été étudiées. La structure M/LG est constituée de la juxtaposition d'un métal avec le GaInAs, matériau à faible gap (0.73eV). L'analyse théorique d'un contact redresseur déposé sur une telle structure montre une caractéristique de conduction fortement non linéaire et un seuil de conduction assez faible. Ces prévisions se vérifient expérimentalement, avec une légère dégradation de la non linéarité.

La structure M/WG/LG présente une discontinuité dans la bande de conduction du semiconducteur par l'insertion d'une barrière d'AlInAs, matériau à grand gap (1.52eV). Une étude paramétrique a été menée concernant l'influence de l'épaisseur de cette barrière sur les propriétés électriques du contact. La présence d'un optimum d'une centaine d'Angströms pour l'épaisseur de barrière a pu être justifiée grâce à l'étude des phénomènes de conduction. Il résulte d'un compromis entre un courant tunnel pur, majoritaire pour les barrières fines, et un courant de type Fowler-Nordheim à plusieurs chemins préférentiels, identifié dans le cas des barrières épaisses. Cette étude théorique, menée à partir de la résolution de l'équation de Schrödinger, a orienté les réalisations technologiques vers des couches adaptées à l'obtention de l'épaisseur de barrière optimale. Les caractérisations des composants réalisés sur de telles structures épitaxiales ont montré une vérification des tendances avec toutefois quelques désaccords quantitatifs. La principale difficulté provient du contrôle de l'épaisseur de barrière au cours des étapes technologiques successives. Néanmoins, malgré un coefficient d'idéalité plus pessimiste que celui de 1.5 prévu numériquement, les résultats en terme de caractérisations présagent de bonnes performances pour les applications visées. La valeur du seuil de conduction a été effectivement augmentée, et nous laisse espérer un fonctionnement en mélange optimal pour une puissance d'oscillateur local de l'ordre de 4mW à 280GHz.

Les écarts entre la théorie et l'expérience ont pu être justifiés par des considérations technologiques, impliquant notamment la qualité du contact métal/SC, et par l'extrême sensibilité des résultats aux paramètres géométriques. Concernant la fabrication, un investissement important a été mené sur trois couches épitaxiales différentes. L'architecture globale du composant est assez générique en technologie III-V. La difficulté principale consiste à écrire en une seule étape la grille, de type grille en T digitée de transistor, et la connexion par pont à air. La mise au point de techniques de moulage dans de la résine électronique a été déterminante dans la réussite de ce procédé. L'inconvénient de l'architecture choisie repose surtout sur l'ouverture d'un pied de grille largement submicronique sur un mesa, contrairement aux configurations de type recess habituelles pour la fabrication des transistors HEMT's. De plus, des considérations sur l'environnement électromagnétique local de la diode ont motivé un travail de fond sur la réduction des

éléments parasites. Pour ce faire, des techniques d'isolation profonde ont été développées. Elles ont de nouveau été mises à profit au cours du procédé d'individualisation des composants, destinés à être montés en configuration flip-chip dans une cellule de mélange.

Une intégration entièrement monolithique pourrait être envisagée, incorporant sur un même substrat les antennes de couplage, les filtres FI et OL, et le composant. De telles techniques sont actuellement en cours de réalisation dans l'équipe pour la cellule de multiplication d'une tête de réception hétérodyne dans le cadre d'un contrat avec l'Agence Spatiale Européenne et le Centre National d'Etudes Spatiales. Nous considérons dans ce cas une des grandes tendances, non seulement de la microélectronique mais également de l'optoélectronique visant à l'intégration en un seul bloc de technologies hybrides. Cette démarche qui résulte de la maîtrise des techniques de report sur substrat hôte devrait supplanter dans les années à venir l'approche purement monolithique sur semiconducteur. Dans le cadre des contrats précités, nous utilisons du quartz dont l'une des propriétés essentielles est de présenter une permittivité relative faible (~3.8). Les premières études indiquent une réduction significative du terme de capacité parasite, comparable par ailleurs à celle que nous avons obtenue par gravure profonde dans le cadre de ce travail. Dans la perspective d'adapter ces techniques de transfert aux composants de mélange, des difficultés liées aux dimensions très faibles des contacts pourraient se poser en pratique. Cependant, dans la mesure où le report peut-être réalisé préalablement à la fabrication, il nous semble que les étapes optimisées pour une réalisation directe sur le substrat semiconducteur pourront également être menées à bien sur du quartz.

Dans le même ordre d'idées, les procédés de réalisation sur membrane de l'ensemble des circuits et des composants actifs sont aussi envisageables. La technologie sur membrane tire parti des propriétés de sélectivité de gravure des divers matériaux de la filière InP. La sélectivité quasi infinie des solutions d'attaque entre l'InP et les composés ternaires AlInAs et GaInAs permet de s'affranchir du substrat et des défauts parasites qu'il induit. Le Jet Propulsion Laboratory élabore ses technologies très hautes fréquences sur des membranes de quelques micromètres. Ses programmes de recherche sont financés par la NASA. A notre connaissance, aucun laboratoire européen n'est encore parvenu à l'état de l'art fixé par ce centre de recherche. Ceci illustre fortement le niveau de concurrence et les enjeux à l'avenir.

Concernant la filière elle-même, nous avons montré la faisabilité de diodes Schottky en technologie InP pour le mélange harmonique et subharmonique, avec un certain nombre d'avantages liés à la puissance de pompe. Cependant, les excellents résultats publiés récemment sur AsGa pour des fréquences inférieures au Terahertz ne nous semblent pas justifier un changement de filière tant que l'on reste dans ce domaine de fréquences. Par contre, à notre avis, cette filière pourrait s'imposer dans la gamme 1THz-10THz. Les fréquences de coupure sont en effet bien supérieures au THz, ce qui est excellent pour des composants fonctionnant à des températures non cryogéniques. En outre, les faibles niveaux de puissance requis pourraient être déterminants pour les applications au-delà du Terahertz.

Enfin, il est important de situer ce travail dans la perspective des applications haut-débit. Ceux-ci sont actuellement proches de 40Gbits/s et les chercheurs considèrent dès à présent 80 voire 160 Gbits/s. Sous peine de déformer les signaux numériques, des bandes passantes de l'ordre du Terahertz seront nécessaires à plus ou moins long terme pour les composants actifs et passifs. Dans ce contexte, des axes de recherches de plus en plus nombreux sont menés autour du transistor bipolaire vertical.

La part du « tout optique » est à présent indéniable, surtout avec le recouvrement des bandes de télécommunication aux grandes longueurs d'ondes et les avancées récentes sur les amplificateurs optiques et les circuits de régénération. Les conversions signaux optiques-signaux électriques demeurent inévitables. La filière InP apparaît alors comme incontournable. Nous avons discuté dans le dernier chapitre de l'adaptation au transistor bipolaire vertical des technologies mises au point. Ce n'est pas la seule extension possible, avec en particulier des contacts de type collecteur Schottky ou de commande par effet de champ en structure verticale. Le « All Around Gate » est représentatif de cette évolution.

## **1.7. Bibliographie**

**[Akalin02]** T. Akalin.

Thèse de doctorat de l'Université des Sciences et technologies de Lille.  
A paraître.

**[Ali-Ahmad93]** W. Ali-Ahmad, W. Bishop, T. Crowe et G. Rebeiz.

An 86-106GHz quasi integrated low noise Schottky receiver.  
IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.  
Vol. 41, N°4, pages 558-564, avril 1993.

**[Baryshev00]** A. Baryshev, B. Jackson, G. de Lange, S. Shitov, N. Iosad, J. Gao et T. Klapwijk.

Quasi-optical TeraHertz SIS mixer.  
Proceedings, 11<sup>th</sup> International Symposium on Space THz Technology. 2000.

**[Bertram99]** P. Bertram.

Développement de l'instrument hétérodyne MIRO pour la sonde cométaire ROSETTA de l'ESA.  
Thèse de doctorat de l'Université Paris VI.  
02 décembre 1999.

**[Cohn75]** M. Cohn, J. Degenford et B. Newman.

Harmonic mixing with an antiparallel diode pair.  
IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.  
Vol. MTT-23, N° 8, pages 667-673, août 1975.

**[Febvre95]** P. Febvre, M. Salez, W. Mc Grath, B. Bumble et H. LeDuc.

Performance limitations of niobium-based submillimeter wave quasiparticle mixers operating near the gap frequency.  
Applied Physics Letters.  
Vol.67, N°3, pages 424-426, 17 juillet 1995.

**[Frerking83]** M. Frerking, J. Hardy et W. Wilson.

A broad-band low-noise 205 GHz radiometer for a satellite receiver.  
IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, pages 110-112. 1983.

**[Hesler00]** J. Hesler.

Broadband fixed-tuned subharmonic receiver to 640GHz.  
Proceedings, 11<sup>th</sup> International Symposium on Space THz Technology. 2000.

**[Kavanaugh01]** J. Kavanaugh, G. Tuttle, K. Ho, R. Biswas, M. Sigalas, E. Ozbay, B. Temelkuran.

W-band photonic crystal Fabry-Pérot detectors.  
A paraître.

**[Kawamura00]** J. Kawamura, R. Blundell, C. Y. E. Tong, D. Papa, T. Hunter, S. Paine, F. Patt, G. Goltsman, S. Cherednichenko, B. Voronov et E. Gershenzon.  
Superconductive hot-electron-bolometer mixer receiver for 800-GHz operation.  
IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.  
Vol.48, N°4, pages 683-689, avril 2000.

**[Kooi00]** J.W. Kooi, J. Kawamura, J. Chen, G. Chattopadhyay, J.R. Pardo, J. Zmuidzinas, T. Phillips, B. Bumble, J. Stern et H. LeDuc.  
A low noise NbTiN-based 850 GHz SIS receiver for the Caltech Submillimeter Observatory.  
International Journal of Infrared and Millimeter Waves.  
Vol.21, N°9, pages 1357-73, sept. 2000.

**[Eisele00]** H. Eisele, A. Rydberg et G. I. Haddad.  
Recent advances in the performances of InP Gunn devices and GaAs TUNNET diodes for the 100-300GHz frequency range and above.  
IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.  
Vol. 48, pages 626-631, avril 2000.

**[Erickson85]** N. Erickson.  
A very low-noise single-sideband receiver for 200-260 GHz.  
IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.  
Vol.MTT-33, N° 11, pages 1179-1188, nov. 1985.

**[Hubers94]** H. Hubers, G. Schwaab et H. Roser.  
Video detection and mixing performance of GaAs Schottky-barrier diodes at 30 THz and comparison with metal-insulator-metal diodes.  
Journal of Applied Physics.  
Vol.75, N°8, pages 4243-4248, 15 avril 1994.

**[Leclerc01]** J-L Leclerc, P. Régrény, P. Viktorovitch, I. Sagnes, G. Saint-Girons, C. Mériadec, A. Mereuta, A. Plais et J. Jacquet.  
Laser 1.55 $\mu$ m à émission par la surface accordable en longueur d'onde.  
8<sup>ème</sup> Journées Nationales de la Microélectronique et de l'Optoélectronique.  
15-17 janvier 2001.

**[LRM98]** Rapport prospectif 1998-2001 du Laboratoire de Radioastronomie Millimétrique.  
(Observatoire de Paris – DEMIRM - Ecole Normale Supérieure de Paris - Radioastronomie).

**[Maas93-1]** Stephen A. Maas.  
Microwave Mixers. Page 137.  
Artech House, second edition. 1993.

**[MDS]** Compoant Catalog. Vol.2. Control Elements & Sources.

**[Mehdi96]** I. Mehdi, S. Martin, R. Dengler, R. Smith et P. Siegel.  
Fabrication and performance of planar Schottky diodes with T-gate-like anodes in 200-GHz subharmonically pumped waveguide mixers.  
IEEE Microwave and Guided Wave Letters.  
Vol.6, N° 1, pages 49-51, janvier 1996.

**[Mehdi98-1]** I. Mehdi, S. Marazita, D. Humphrey, Trong-Huang-Lee, R. Dengler, J. Oswald, A. Pease, S. Martin, W. Bishop, T. Crowe et P. Siegel.

Improved 240-GHz subharmonically pumped planar Schottky diode mixers for space-borne applications.

IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.

Vol.46, N° 12, pages 2036-2042, déc. 1998.

**[Mehdi98-2]** I. Mehdi, P. Siegel, D. Humphrey, T. Lee, R. Dengler, J. Oswald, A. Pease, R. Lin, H. Eisele, R. Zimmermann, N. Erickson.

An all solid-state 640 GHz subharmonic mixer.

IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. 1998.

**[Mélique99-1]** X. Mélique, A. Maestrini, P. Mounaix, M. Favreau, O. Vanbésien, J.M. Goutoule, G. Beaudin, T. Närhi and D. Lippens.

Record performance of a 250GHz InP based heterostructure barrier varactor tripler.

Electronic Letters.

Vol. 35, N°11, 27 mai 1999.

**[Merrimac]** Notice constructeur de la série SMM-01-G.

Single Balanced Microwave Stripline Mixers (1.7-18GHz).

**[Oswald98]** J. Oswald, T. Koch, I. Mehdi, A. Pease, R. Dengler, TH. Lee, D. Humphrey, M. Kim, P. Siegel, M. Frerking, N. Erickson.

Planar diode solid-state receiver for 557 GHz with state-of-the-art performance.

IEEE Microwave and-Guided Wave Letters.

Vol.8, N° 6, pages 232-234, juin 1998.

**[Podevin99-1]** F. Podevin, P. Mounaix, M. Chaubet et D. Lippens.

Mélangeur subharmonique à diodes Schottky en technologie InP à 500GHz.

11<sup>ème</sup> Journées Nationales Microondes.

5-7 mai 1999.

**[Schneider75]** M. Schneider et W. Snell.

Harmonically pumped stripline down-converter.

IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.

Vol. MTT-23, N° 3, pages 271-275, mars 1975.

**[Semenov00]** A. Semenov, H. Hubers, J. Schubert, G. Gol'tsman, A. Elantiev, B. Voronov and E. Gershenzon.

Design and performance of the lattice-cooled hot-electron terahertz mixer.

Journal of Applied Physics.

Vol.88, N°.11, pages 6758-6767, 1 déc. 2000.

**[Siegel93]** P. Siegel, R. Dengler, I. Mehdi, J. Oswald, W. Bishop, T. Crowe and R. Mattauch.  
Measurements on a 215GHz subharmonically pumped waveguide mixer using planar back-to-back air-bridge Schottky diodes.

IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.

Vol 41, N° 11, nov. 1993.

**[Siegel99]** P. Siegel, R. Smith, M. Gaidis, S. Martin.  
2.5THz GaAs monolithic membrane diode mixer.  
IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.  
Vol 47, N° 5, mai 1999.

**[Sun01]** K. Sun, M. Garrigues, J-L Leclerc, P. Régrény et P. Viktorovitch.  
Nouveaux concepts de photodétecteurs accordables pour le proche infrarouge.  
8<sup>ème</sup> journées Nationales de la Microélectronique et de l'Optoélectronique.  
15-17 janvier 2001.

**[Tamen00]** B. Tamen  
Modélisation du bruit dans les composants en régime de fonctionnement grand signal :  
application à la conception de circuits intégrés non-linéaires faible bruit pour les  
télécommunications.  
Thèse de Doctorat de l'Université des Sciences et Technologies de Lille.  
27 septembre 2000.

**[Yagoubov99]** P. Yagoubov, M. Kroug, H. Merkel, E. Kollberg, J. Schubert, H.W. Hubers,  
G. Schwaab, G. Gol'tsman and E. Gershenson.  
Heterodyne measurements of a NbN superconducting hot electron mixer at terahertz  
frequencies.  
IEEE Transactions on Applied Superconductivity.  
Vol.9, N°.2, pages 3757-60, juin 1999.

## **2.6. Bibliographie**

**[Ando87]** Y. Ando et T. Itoh.

Calculation of transmission tunneling current across arbitrary potential barriers

Journal of Applied Physics.

Vol. 61, N°4; pages 1497-1502, 15 février 1987.

**[Burgnies94]** L. Burgnies, O. Vanbesien, V. Sadaune, D. Lippens, J. Nagle et B. Vinter.

Resonant tunneling structures with local potential perturbations.

Journal of Applied Physics.

Vol. 75, N° 9, pages 4527-4532, 1 mai 1994.

**[Datta00]** S. Datta.

Nanoscale device modeling: the Green's function method.

Superlattices and Microstructures.

Vol.28, N°4pages 253-278, 2000

**[Fernandez01]** M. Fernandez.

Non-linear transmission lines for harmonic generation.

Thèse de doctorat de l'Université des Sciences et technologies de Lille.

Le 06 juillet 2001.

**[Fiig91]** T. Fiig et A. Jauho.

Self-consistent model for two-dimensional accumulation layer states in resonant tunneling devices.

Applied Physics Letters.

Vol. 59, N° 18, pages 2245-2247, 28 oct. 1991.

**[Hui-Shi95]** Hui-Shi, W. Zhang, C. Domier, N. Jr Luhmann, L. Sjogren et H. Liu.

Novel concepts for improved nonlinear transmission line performance.

IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.

Vol. 43, N°4, pages 780-789, avril 1995.

**[Jogai91]** B. Jogai, C. Huang, E. Koenig et C. Bozada.

Tunneling between localized states in GaAs/AlGaAs resonant tunneling diodes with spacer layers.

Journal of Vacuum Science & Technology-B.

Vol. 9, N°1, pages143-148, jan.-fév. 1991.

**[Kajiyama73]** K. Kajiyama, Y. Mizushima et S. Sakata.

Schottky barrier height of n-In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As diodes.

Applied Physics Letters.

Vol. 23, N°8, pages 458-459, 15 oct. 1973.

**[Kollberg92]** E. Kollberg, T. Tolmunen, M. Frerking et J. East.

Current saturation in submillimeter wave varactors.

IEEE Transactions on Microwave theory and techniques.

Vol 40, N° 5, pages 831-838, mai 1992.

**[Kramer92]** B. Kramer et R. Weber.

Base-emitter diffusion capacitance in GaAlAs/GaAs HBTs.

Electronics Letters.

Vol. 28, N°12, pages 1106-1107, 4 juin 1992.

**[Lake92]** R. Lake et S. Datta.

Nonequilibrium Green's-function method applied to double barrier resonant tunneling diodes.

Physical Review-B.

Vol 45, N° 12, pages 6670-6685, 15 mars 1992.

**[Leavens01]** C. Leavens et R. Sala-Mayato.

On constructing the wave function of a quantum particle from its Wigner phase-space distribution function.

Physics Letters-A.

Vol. 280, N°4, pages 163-172, 26 février 2001.

**[Louhi95]** J. Louhi et A. Raisanen.

On the modeling and optimization of Schottky varactor frequency multipliers at submillimeter wavelengths.

IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.

Vol. 43, N°4, pages 922-926, avril 1995.

**[Mathieu87]** H. Mathieu.

Physique des semiconducteurs et des composants électroniques.

Editions Masson, 1<sup>ère</sup> édition, page 105, 1987.

**[Mathieu96]** H. Mathieu.

Physique des semiconducteurs et des composants électroniques.

Editions Masson, 2<sup>ème</sup> édition, page 132, 1996.

**[Mehdi91]** I. Mehdi, P. Siegel et J. East

Improved millimeter-wave mixer performance analysis using a drift diffusion capacitance model.

1991 IEEE MTT-S International Microwave Symposium.

Vol. 2, pages 887-890.

**[Miyazaki99]** T. Miyazaki, T. Sugino, K. Matsuda et J. Shirafuji.

Characterization of InGaAs phosphidized by a plasma process.

Japanese Journal of Applied Physics.

Vol. 38, N°2B, pages 1139-1142, février 1999.

**[Mönch99]** W. Mönch.

Barrier heights of real Schottky contacts explained by metal-induced gap states and lateral inhomogeneities.

Journal of Vacuum Science & Technology-B.

Vol. 17, N°4, pages 1867-1876, juillet 1999.

**[Morgan78]** D. Morgan et J. Frey.

Increasing the effective barrier height of Schottky contacts to n-  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ .  
Electronics Letters.

Vol. 14, N°23, pages 737-739, 9 nov. 1978.

**[Mounaix90]** P. Mounaix, O. Vanbésien et D. Lippens.

Effect of cathode spacer layer on the current-voltage characteristics of resonant tunneling diodes.

Applied Physics Letters.

Vol. 57, N° 15, pages 1517-1519, 8 octobre 1990.

**[Pelletier71]** J. Pelletier.

Techniques numériques appliquées au calcul scientifique.

Editions Masson et Cie, page 180, 1971.

**[Podevin98]** F. Podevin.

Diodes Schottky pour un mélangeur subharmonique à 560 GHz.

Rapport de DEA en électronique de l'Université des Sciences et technologies de Lille.

Juillet 1995.

**[Podevin00]** F. Podevin, P. Mounaix, O. Vanbésien, M. Chaubet et D. Lippens.

Heterostructure barrier mixers for terahertz applications.

Proceedings, 11<sup>th</sup> International Symposium on Space THz Technology. 2000.

**[Podevin01]** F. Podevin, O. Vanbésien et D. Lippens.

Quantum calculations of conduction properties of metal/InAlAs/InGaAs heterostructures.

Journal of Applied Physics.

Vol. 89, 2001.

**[Oriols98]** X. Oriols, J. Garcia-Garcia, F. Martin, J. Sune, T. Gonzalez, J. Mateos et D. Pardo.

Bohm trajectories for the Monte Carlo simulation of quantum-based devices.

Applied Physics Letters.

Vol. 72, N° 7; pages 806-808, 16 février 1998.

**[Sadaune93]** V. Sadaune.

Effet tunnel résonnant dans des hétérostructures de matériaux semiconducteurs pour différentes situations de confinement.

Thèse de doctorat de l'Université des Sciences et technologies de Lille.

1993.

**[Schottky38]** W. Schottky.

Naturwissenschaften.

Vol. 15, page 843, 1938.

**[Tersoff84]** J. Tersoff.

Schottky barrier heights and the continuum of gap states.

Physical Review Letters.

Vol. 52, N°6, pages 465-468, 6 février 1984.

### **3.5. Bibliographie**

[**Acrylique01**] documentation internet.

[http://fr.encyclopedia.yahoo.com/articles/na/na\\_1064\\_p0.html](http://fr.encyclopedia.yahoo.com/articles/na/na_1064_p0.html)

[**Adesida78**] I. Adesida, R. Shimizu et T. Everhart.

Monte Carlo simulation of electron penetration through thin films of PMMA.

Applied Physics Letters.

Vol. 33, N°10, pages 849-850, 15 nov. 1978.

[**Arcscott01**] S. Arcscott, T. David, F. Podevin, P. Mounaix et D. Lippens.

Microtechnologies hyperfréquences pour les applications spatiales.

12<sup>ème</sup> Journées Nationales Microondes.

16-18 mai 2001.

[**Bishop90**] W. Bishop, E. Meiburg, R. Mattauch, T. Crowe et L. Poli.

A micron-thickness, planar Schottky diode chip for terahertz applications with theoretical minimum parasitic capacitance.

IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest.

Vol. 3, pages 1305-1308, 1990.

[**Chen92**] W. Chen, J. Cowles, G. Haddad, G. Munns, K. Eisenbeiser et J. East.

Ohmic contact study for quantum effect transistors and heterojunction bipolar transistors with InGaAs contact layers.

Journal of Vacuum Science & Technology-B.

Vol. 10, N°6, pages 2354-2360, nov.-déc. 1992.

[**Chevalier98**] P. Chevalier.

Conception et réalisation de transistors à effet sze champ de la filière AlInAs/GaInAs sur substrat InP. Application à l'amplification faible bruit en ondes millimétriques.

Thèse de Doctorat de l'Université des Sciences et technologies de Lille.

Le 13 novembre 1998.

[**Das Neves93**] S. Das Neves et M. De Paoli.

A quantitative study of chemical etching of InP.

Journal of the Electrochemical Society.

Vol. 140, N°9, pages 2599-2603, sept. 1993.

[**Eisenmann93**] H. Eisenmann, T. Waas et H. Hartmann.

PROXECCO-proximity effect correction by convolution.

Journal of Vacuum Science & Technology-B

Vol. 11, N°6, pages 2741-2745, nov.-déc. 1993.

[**Hasegawa97**] H. Hasegawa.

Interface-controlled Schottky barriers on InP and related materials.

Solid State Electronics.

Vol.41, N°10, pages 1441-1450, oct. 1997.

**[Howes-Morgan86]** M. Howes et D. Morgan.  
Gallium Arsenide : Materials, Devices, and Circuits.  
Editions John Wiley & Sons, page 125, 1986.

**[Hur95]** K. Hur, R. McTaggart, M. Ventresca, R. Wohlert, W. Hoke, P. Lemonias, T. Kazior et L. Aucoin.  
High efficiency single pulse doped Al/sub 0.60/In/sub 0.40/As/GaInAs/InP HEMTs for Q-band power applications  
Electronics Letters.  
Vol. 31, N°7, pages 585-586, 30 mars 1995.

**[Katz92]** A. Katz.  
Indium phosphide and related materials : processing technology and devices.  
Artech House. 1992.

**[Komalski99]** L. Komalski.  
Etalonnage de résines électroniques et étude des résines photosensibles.  
Rapport de stage d'IUT de l'Université des Sciences et technologies de Lille.  
Juin 1999.

**[LEICA]** Documentation fournie par la société LEICA pour le masqueur électronique EPBG 5 HR.

**[Logitech99]** Documentation fournie par la société Logitech pour système automatisé PM5 Autolap.

**[Mathieu87]** H. Mathieu.  
Physique des semiconducteurs et des composants électroniques.  
Editions Masson, page 105, 1987.

**[Mélique95]** X. Mélique.  
Micro-usinage volumique et surfacique du système de matériaux GaInAs/InP.  
Rapport de DEA en électronique de l'Université des Sciences et technologies de Lille.  
Juillet 1995.

**[Mélique99-2]** X. Mélique.  
Tripleur de fréquence utilisant des diodes varactors à hétérostructures en gamme millimétrique.  
Thèse de Doctorat de l'Université des Sciences et technologies de Lille.  
Le 16 novembre 1999.

**[Mönch99]** W. Mönch.  
Barrier heights of real Schottky contacts explained by metal-induced gap states and lateral inhomogeneities.  
Journal of Vacuum Science & Technology-B.  
Vol. 17, N°4, pages 1867-1876, juillet 1999.

**[Podevin99-2]** F. Podevin, P. Mounaix, M. Chaubet et D. Lippens.  
A 500GHz subharmonic mixer using InP based Schottky diodes.  
9<sup>th</sup> Heterostructures Technology Workshop.  
27-28 septembre 1999.

**[Ren92]** F. Ren, S. Pearton, D. Tennant, D. Resnick, C. Abernathy, R. Kopf, C. Wu, M. Hu, C. Pao, B. Paine, D. Wang et C. Wen.  
Dry etching bilayer and trilevel resist systems for submicron gate length GaAs based high electron mobility transistors for power and digital applications.  
Journal of Vacuum Science & Technology-B.  
Vol. 10, N°6, pages 2949-2953, nov.-déc. 1992.

**[Sato98]** T. Sato, C. Kaneshiro et H. Hasegawa.  
Strong correlation between interface microstructure and barrier height in n-InP Schottky contacts formed by *in-situ* electrochemical process.  
Proceedings, International Conference on Indium Phosphide and Related Materials. 1998.

**[Sawdai99]** D. Sawdai, D. Pavlidis et D. Cui.  
Enhanced transmission line model structures for accurate resistance evaluation of small-size contacts and for more reliable fabrication.  
IEEE Transactions on Electron Devices.  
Vol. 46, N°7, pages 1302-1311, juillet 1999.

**[Shen92]** T. Shen, G. Gao et H. Morkoc.  
Recent developments in ohmic contacts for III-V compound semiconductors.  
Journal of Vacuum Science & Technology-B.  
Vol. 10, N°5; pages 2113-2132, sept.-oct. 1992.

**[Schumann69]** P. Schumann et E. Gardner.  
Spreading resistance correction factors.  
Solid State Electronics.  
Vol. 12, N°5, pages 371-375, mai 1969.

**[Sherwin93]** M. Sherwin, R. Corless et J. Wendt.  
Submicron, footprint, air bridges defined by electron beam lithography  
Journal of Vacuum Science & Technology-B.  
Vol. 11, N°2, pages 339-340, mars-avril 1993.

**[Sundararaman90]** C. Sundararaman, A. Moution et J. Currie.  
Chemical etching of InP.  
Proceedings, 2<sup>nd</sup> International Conference on Indium Phosphide and Related Materials. 1990.

**[Tersoff84]** J. Tersoff.  
Schottky barrier heights and the continuum of gap states.  
Physical Review Letters.  
Vol. 52, N°6, pages 465-468, 6 février 1984.

[**Thomas94**] K. Thomas, W. Patrick et W. Bachtold.

Selective gate recess etching of GaInAs/AlInAs based hemt's using a CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> plasma without subsequent annealing.

Electronics Letters.

Vol. 30, N°15, pages 1251-1252, 21 juillet 1994.

[**Wakita95**] A. Wakita, N. Moll, S. Rosner et A. Fischer-Colbrie.

Thermal stability of MoAu and TiPtAu nonalloyed InGaAs contacts.

Journal of Vacuum Science & Technology-B.

Vol. 13, N°5, pages 2092-2099, sept.-oct 1995.

[**Williams87**] R. Williams.

Gallium Arsenide : Processing Techniques.

Editions Artech House, page 156, 1984.

[**Woodham92**] R. Woodham, J. Cleaver, H. Ahmed et P. Ladbrooke.

T-gate,  $\Gamma$ -gate, and air-bridge fabrication for monolithic microwave integrated circuits by mixed ion-beam, high-voltage electron-beam, and optical lithography.

Journal of Vacuum Science & Technology-B.

Vol. 10, N°6, pages 2927-2931, nov.-déc. 1992.

[**Yan-He92**] Yan-He, B.W Liang, N.C. Tien et C.W. Tu.

Selective chemical etching of InP over InAlAs.

Journal of the Electrochemical Society.

Vol. 139, N°7, pages 2046-2048, juillet 1992.

[**Zaknoune98**] M. Zaknoune, O. Schuller, F. Mollot, D. Théron et Y. Crosnier.

Nonselective wet chemical etching of GaAs and AlGaInP for device applications.

Journal of Vacuum Science & Technology-B.

Vol. 16, N°1, pages 223-226, janvier-fév 1998.

[**Zaknoune99**] M. Zaknoune.

Etude de la technologie et des potentialités pour l'amplification de puissance hyperfréquence des transistors à effet de champ des filières phosphore AlGaInP/GaInAs et métamorphique AlInAs/GaInAs sur substrat GaAs.

Thèse de Doctorat de l'Université des Sciences et technologies de Lille.

Janvier 1999.

## **4.5. Bibliographie**

[**Arcscott00**] S. Arcscott, T. David-, X. Mélique, P. Mounaix, O. Vanbésien et D. Lippens.  
Transferred-substrate InP-based heterostructure barrier varactor diodes on quartz.  
IEEE Microwave and Guided Wave Letters.  
Vol. 10, N°11, pages 472-474, nov. 2000.

[**Duval01**] E. Duval, E. Lheurette, K. Katata et M. Ketata.  
Effet de la température sur les paramètres d'interface de structures MOS déterminés par spectroscopie de conductance.  
8<sup>ème</sup> journées Nationales de la Microélectronique et de l'Optoélectronique.  
15-17 janvier 2001.

[**Ismail84**] A. Ismail, J. Palau, L. Lassabatere.  
Metal/InP interface and Schottky diode formation.  
Revue de Physique Appliquée.  
Vol. 19, N°3, pages 205-214, mars 1984.

[**Jong Lam Lee99**] Jong Lam Lee, Yi Tae Kim, Hyung Mo Yoo et Gi Young Lee.  
Au/Ge-based Ohmic contact to an AlGaAs/InGaAs pseudomorphic high electron mobility transistor with an undoped cap layer.  
Journal of Vacuum Science & Technology-B.  
Vol. 17, N°3, pages 1034-1039, mai-juin 1999.

[**Kordoš92**] P. Kordos, M. Marso, R. Meyer et H. Luth.  
Schottky barrier height enhancement on n-In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As.  
Journal of Applied Physics.  
Vol. 72, N°6, pages 2347-2355, 15 sept. 1992.

[**Lee89**] D. Lee, Sheng S. Li, N. Sauer et T. Chang.  
High quality In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As Schottky diode formed by graded superlattice In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/In<sub>0.52</sub>Al<sub>0.48</sub>As  
Applied Physics Letters.  
Vol. 54, N°19, pages 1863-1865, 8 mai 1989.

[**Maestrini99**] A. Maestrini.  
Modélisation et conception de multiplicateurs de fréquences utilisant des diodes planaires aux longueurs d'onde millimétriques et submillimétriques.  
Thèse de l'Université de Bretagne Occidentale et du DEMIRM Observatoire de Paris.  
Février 1999.

[**Maas93-2**] Stephen A. Maas.  
Microwave Mixers. Pages 161-162.  
Artech House, second edition. 1993.

- [Marsh98]** P. Marsh, D. Pavlidis et K. Hong.  
InGaAs-Schottky contacts made by in-situ plated and evaporated Pt \_ An analysis based on DC and noise characteristics.  
IEEE Transactions on Electron Devices.  
Vol. 45, N°2, pages 349-360, fév. 1998.
- [Mehdi98-2]** I. Mehdi, P. Siegel, D. Humphrey, T. Lee, R. Dengler, J. Oswald, A. Pease, R. Lin, H. Eisele, R. Zimmermann, N. Erickson.  
An all solid-state 640 GHz subharmonic mixer.  
IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. 1998.
- [Mikhelashvili99]** V. Mikhelashvili, G. Eisenstein, V. Garber, S. Fainleib, G. Bahir, D. Ritter, M. Orenstein et A. Peer.  
On the extraction of linear and nonlinear physical parameters in nonideal diodes.  
Journal of Applied Physics.  
Vol. 85, N°9, pages 6873-6883, 1 mai 1999.
- [Morais97]** J. Morais, T. Fazan, R. Landers, R. Pereira, E. Sato et W. Carvalho.  
Effect of rapid thermal annealing on the microstructure and electrical characteristics of Au/Ni/Au/Ge/Ni multilayers deposited on n-type InGaAs  
Journal of Vacuum Science & Technology-B.  
Vol. 15, N°6, pages 1983-1986, nov-déc 1997.
- [Sato97]** T. Sato et H. Hasegawa.  
Formation of pinning-free Schottky barriers on InP and related materials by novel in-situ electrochemical process and its mechanism.  
Proceedings, International Conference on Indium Phosphide and Related Materials. 1997.
- [Svelto99]** F. Svelto, P. Erratico, S. Manzini et R. Castello.  
A metal-oxide-semiconductor varactor.  
IEEE-Electron Device Letters.  
Vol. 20, N°4, pages 164-166, avril 1999.
- [Stareev93]** G. Stareev, H. Kunzel et G. Dortmann.  
A controllable mechanism of forming extremely low-resistance nonalloyed ohmic contacts to group III-V compound semiconductors.  
Journal of Applied Physics.  
Vol. 74, N°12, pages 7344-7356, 15 déc. 1993.
- [Wang98]** X. J. Wang et L. He.  
Effects of recombination current on the current-voltage characteristics in metal-InGaAs Schottky diodes.  
Journal of Applied Physics.  
Vol. 84, N°3, pages 1449-1453, 1 août 1998.

## **5.5. Bibliographie**

- [**Agarwal98**] B Agarwal, Q. Lee, D. Mensa, R. Pullela, J. Guthrie et M. Rodwell.  
80-GHz distributed amplifiers with transferred-substrate heterojunction bipolar transistors.  
IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.  
Vol. 46, N°12, pages 2302-2307, déc. 1998.
- [**Allen85**] F. Allen.  
What can molecular beam epitaxy do for silicon devices?  
Thin Solid Films.  
Vol. 123, N°4, pages 273-279, 25 jan. 1985.
- [**Arscott00**] S. Arscott, T. David, X. Melique, P. Mounaix, O. Vanbésien et D. Lippens.  
Transferred-substrate InP-based heterostructure barrier varactor diodes on quartz.  
IEEE Microwave and Guided Wave Letters.  
Vol. 10, N°11, pages 472-474, nov. 2000.
- [**Bermudez91**] V. Bermudez et S. Prokes.  
Infrared reflection absorption spectroscopy of adsorbates on semiconductors with buried metal layers-O<sub>2</sub>/GaAs.  
Surface Science.  
Vol. 248, N° 1-2, pages 201-206, mai 1991.
- [**Bruston00**] J. Bruston, S. Martin, A. Maestrini, E. Schlecht, P. Smith et I. Mehdi.  
The frameless membrane : a novel technology for THz circuits.  
Proceedings, 11<sup>th</sup> International Symposium on Space THz Technology. 2000.
- [**David02**] T. David.  
Thèse de doctorat de l'Université des Sciences et technologies de Lille.  
A paraître.
- [**Duez98**] V. Duez, X. Mélique, R. Harvart, F. Podevin, P. Mounaix, F. Mollot et D. lippens.  
Heterostructures quantum-well barrier varactor.  
6<sup>th</sup> IEEE International Conference on Terahertz Electronics. Proceedings.  
Septembre 1998.
- [**Harbison88**] J. Harbison, T. Sands, N. Tabatabaie, W. Chan, L. Florez et V. Keramidias.  
Molecular beam epitaxial growth of ultrathin buried metal layers: (Al,Ga)As/NiAl/(Al,Ga)As heterostructures.  
Applied Physics Letters.  
Vol. 53, N° 18, pages 1717-1719, 31 oct. 1988.
- [**Krach98**] M. Krach, J. Freyer et M. Claassen.  
Doping-barrier varactors for frequency-multipliers  
6<sup>th</sup> IEEE International Conference on Terahertz Electronics. Proceedings  
Septembre 1998.

**[Lee91]** T. Lee, J. East et G. Haddad.

Planar doped barrier devices for subharmonic mixers

Microwave and Optical Technology Letters.

Vol. 4, N° 1, pages 53-60, 5 jan. 1991.

**[Lee98]** Q. Lee, B Agarwal, D. Mensa, R. Pallela, J. Guthrie, L. Samoska et M. Rodwell.

A >400GHz fmax transferred-substrate heterojunction bipolar transistor IC technology.

IEEE Electron Device Letters.

Vol. 19, N°3, pages 77-79, mars 1998.

**[Lee99]** Q. Lee, S. Martin, D. Mensa, R. Smith, J. Guthrie et M. Rodwell.

Submicron transferred-substrate heterojunction bipolar transistors.

IEEE Electron Device Letters.

Vol. 20, N°8, pages 396-398, août 1999.

**[Malik80]** R. Malik, T. Aucoin, R. Ross, K. Board, C. Wood et L. Eastman.

Planar doped barriers in GaAs by molecular beam epitaxy.

Electronics Letters.

Vol. 16, N° 22, pages 836-838, 23 oct. 1980.

**[Massiet00]** J. Massiet.

Performances d'un mélangeur de fréquences à diode HBM.

Rapport de stage d'application de l'Ecole Centrale de Lyon.

Juillet 2000.

**[Mounaix00]** P. Mounaix, S. Arscott, T. David, F. Podevin, X. Mélique et D. Lippens.

Microtechnologies for the monolithic fabrication of mm and sub-mm non linear devices.

Gallium Arsenide Conference.

Paris. 2-3 octobre 2000.

**[Noda00]** H. Noda, T. Urisu, Y. Kobayashi et T. Ogino.

Initial stage of hydrogen etching of Si surfaces investigated by infrared reflection absorption spectroscopy.

Japanese Journal of Applied Physics,-Part-1.

Vol. 39, N° 12B, pages 6985-6989, déc. 2000.

**[Rodwell99]** M. Rodwell, Q. Lee, D. Mensa, J. Guthrie, S. Martin, R. Smith, R. Pallela, B

Agarwal, S. Jaganathan, T. Mathew et S. Long.

Transferred-substrate HBT integrated circuits.

Solid State Electronics.

Vol. 43, N°8, pages 1489-1495, août 1999.