



HAL
open science

Etude de nouvelles structures guide d'onde sur matériaux III-V pour la commutation optique et la photodétection

Naïma Saadsaoud

► **To cite this version:**

Naïma Saadsaoud. Etude de nouvelles structures guide d'onde sur matériaux III-V pour la commutation optique et la photodétection. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2010. Français. NNT : 2010VALE0038 . hal-00572702

HAL Id: hal-00572702

<https://hal.science/hal-00572702v1>

Submitted on 16 Dec 2020

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

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

N° d'ordre : 10 /43

THÈSE

Présentée à

L'UNIVERSITÉ DE VALENCIENNES ET DU HAINAUT CAMBRÉSIS

Pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ

Spécialité : Electronique

Par

Naïma SAADSAOUD le 30/11/10

Étude de nouvelles structures guide d'onde sur matériaux III-V pour la commutation optique et la photodétection

Jury :

Directeur de thèse :	M. Elhadj DOGHECHE	Professeur à l'Université de Valenciennes (IEMN)
Co-directeur :	M. Didier DECOSTER	Professeur à l'Université de Lille I (IEMN)
Rapporteurs :	M. Abderrahim RAMDANE	Directeur de Recherches CNRS LPN à Marcoussis
	M. Hong Wu Li	Professeur à l'Université de Nantes (IREENA)
Examineurs :	M. Jean CHAZELAS	Directeur Collaborateur R & T Division Aéronautique
	M. Soon Fatt YOON	Professeur à Nanyang Technological University (Singapore)
	M. Marc GAZALET	Professeur à l'Université de Valenciennes (IEMN)

N° d'ordre : 10 /43



THÈSE

Présentée à

L'UNIVERSITÉ DE VALENCIENNES ET DU HAINAUT CAMBRÉSIS

Pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ

Spécialité : Electronique

Par

Naïma SAADSAOUD

Étude de nouvelles structures guide d'onde sur matériaux III-V pour la commutation optique et la photodétection

Jury :

Directeur de thèse :	M. Elhadj DOGHECHE	Professeur à l'Université de Valenciennes (IEMN)
Co-directeur :	M. Didier DECOSTER	Professeur à l'Université de Lille I (IEMN)
Rapporteurs :	M. Abderrahim RAMDANE	Directeur de Recherches CNRS LPN à Marcoussis
	M. Hong Wu Li	Professeur à l'Université de Nantes (IREENA)
Examineurs :	M. Jean CHAZELAS	Directeur Collaborateur R & T Division Aéronautique
	M. Soon Fatt YOON	Professeur à Nanyang Technological University (Singapore)
	M. Marc GAZALET	Professeur à l'Université de Valenciennes (IEMN)

Remerciements

Cette thèse de Doctorat a été effectuée au sein de l'équipe Optoélectronique de l'Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologies, dirigé à mon arriver, par Monsieur le Professeur Alain Cappy, puis par Monsieur Lionel Buchaillet Directeur de Recherche au CNRS. Je leur exprime toute ma gratitude de m'avoir permis d'effectuer ces recherches dans de bonnes conditions. Mes plus vifs remerciements sont adressés au Professeur Bertrand Nongaillard, alors Directeur du DOAE, pour m'avoir accepté dans son département, et permis de m'inscrire en thèse sous la direction du Professeur Elhadj Dogheche.

Je tiens à remercier chaleureusement Monsieur le Professeur Marc Gazalet Directeur de l'école Doctorale SPI. Il me fait le très grand honneur de présider ce jury. Je lui en suis infiniment reconnaissante.

Je tiens à exprimer mes plus sincères remerciements à Monsieur le Professeur Hongwu Li, de l'Université de Nantes, et Monsieur Abderrahim Ramdane, Directeur de Recherches CNRS au LPN de Marcoussis, pour avoir accepté la lourde tâche de rapporteur, ainsi qu'à Monsieur Jean Chazelas Directeur Scientifique de la Division Aéronautique de Thalès et Monsieur le Professeur Yoon Soon Fatt, de Nanyang Technological University à Singapour pour avoir accepté de juger mon travail et de faire partie de mon jury de thèse.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à Monsieur le Professeur Elhadj Dogheche qui a proposé dirigé cette thèse, je lui en suis infiniment reconnaissante.

Je remercie tout particulièrement Monsieur le Professeur Didier DECOSTER, qui m'a accueilli au sein de l'équipe Optoélectronique et qui a encadré ce travail, pour m'avoir transmis ses connaissances appropriées. Son soutien apporté à la fin de cette recherche, surtout pendant la période de rédaction de ce mémoire, a donné à cette thèse une forme plus éclaircie.

Je tiens à assurer ma sincère et amicale reconnaissance à Monsieur Jean-Pierre VILCOT, pour ses qualités tant scientifiques qu'humaines et sa constante bonne humeur.

Un grand merci à Vincent Magnin et Joseph Harari pour leur soutien et leur aide sur la modélisation.

Merci beaucoup aux personnes ayant contribué à la réalisation technologique de mes dispositifs: Christiane Legrand pour la gravure RIE et ICP, Pascal Tilmant pour la lithographie optique, Marc François pour la Lithographie électronique, Xavier Wallart ainsi que Christophe Coinon pour la

croissance épitaxiales et leurs conseils visés, Christophe Boyaval pour le MEB, André Leroy et Annie Fatorini pour la métallisation, Karine Blary pour l'amincissement et le collage et surtout Didier Vandermeore pour le montage de mes composants...

Comment remercier à la hauteur Malek Zegaoui pour ses conseils si précieux, lui qui a contribué à la réussite de la réalisation technologique de mes composants. Je lui en suis infiniment reconnaissante.

Mes remerciements spéciaux s'adressent à tous les membres de l'équipe Optoélectronique : Dorothee Bernard, Cathy Sion, Anicha Gokarna, Sophie Maricot, Mathieu Halbawax, Gwenael Lecoustre, et les thésards que j'ai côtoyés : Christophe, Antoine, Arnaud, Floriane, Djamila, Thomas,

Je souhaite dédier cette thèse à mon adorable mère, mes sœurs, mes frères et à toute ma famille pour leur soutien, sans oublier mes beaux-parents, mes belles sœurs et bien sûr mon beau-frère,

Enfin, M'hamed, merci d'avoir pris soin de moi et de m'avoir supporté durant tout ce temps et spécialement la période de rédaction.

Merci encore à tous

Naïma SAASSAOUD SOUMEUR

Table des matières

Introduction	2
Chapitre I : Guides d'onde actifs InP à contact Schottky	6
I.1. Motivation	8
I.2. Structure InP à contact Schottky	9
I.2.1. Epitaxie	9
I.2.2. Structure guidante	10
I.3. Dispositifs étudiés	12
I.4. Etapes technologiques de fabrication des dispositifs d'essai à base de Q1,18	14
I.4.1. Description sommaire du processus technologique	14
I.4.1.1. Création des motifs	14
I.4.1.2. Gravure	14
I.4.1.3. Planarisation	15
I.4.1.4. Dépôt des électrodes	16
I.4.1.5. Amincissement	16
I.4.1.6. Clivage	17
I.4.2. Description détaillée du processus technologique	18
I.4.2.1. Masque global	18
I.4.2.2. Opérations technologiques détaillées	20
I.5. Etapes technologiques des composants à base de quaternaire 1,3 μ m	23
I.5.1. Description sommaire du processus technologique	23
I.5.1.1. Dépôt du contact Schottky	23
I.5.1.2. Guides	24
I.5.1.3. Planarisation	25
I.5.1.4. Plots de contact (épaissement)	25
I.5.1.5. Contact N	26
I.5.2. Détails des opérations technologiques	27
I.5.2.1. Masque global	27
I.5.2.2. Opération technologiques détaillées	28
I.6. Etude expérimentale des dispositifs réalisés	38
I.6.1. Banc de caractérisation	38
I.6.2. Etude des guides droits	40
I.6.2.1. Etude des guides droits actifs	42
I.6.2.1.1. Premiers dispositifs actifs à base de quaternaire 1,18 μ m	42
I.6.3. Caractérisation des commutateurs à guides couplés	49
I.6.4. Caractérisation dynamique	51
I.7. Conclusion	52
I.8. Références	54
Chapitre II : Guides d'onde GaAs/GaAsSbN/GaAs passifs et actifs	57
II.1. Motivation	59
II.2. Présentation du GaAsSbN du groupe du Professeur Yoon Soon Fatt	59
II.3. Structure des guides d'onde étudiés	60
II.4. Dispositifs fabriqués	61
II.5. Description du processus technologique sur guide d'onde GaAs	63

II.5.1. Epitaxie	63
II.5.1.1. Guides passifs	63
II.5.1.2. Guides actifs	63
II.5.2. Technologie des dispositifs d'essai	64
II.5.2.1. Guides passifs	64
II.5.2.1.1. Etapes technologiques.....	64
II.5.2.1.2. Opération technologiques détaillées	65
II.5.2.2. Guide actif.....	66
II.5.2.2.1. Etapes technologiques.....	66
II.5.2.2.2. Spécificités technologiques de la Structure PIN	66
II.5.2.2.3. Opérations technologiques détaillées	67
II.5.3. Etude expérimentale.....	73
II.5.3.1. Caractérisation optique du GaAsSbN.....	73
II.5.3.2. Caractérisations statiques des guides passifs et actifs	73
II.5.3.3. Caractérisation dynamique des guides actifs.....	78
I.6. Conclusion	80
I.7. Références.....	81
Chapitre III : Photodiode de puissance sur InP couplée monolithiquement à un guide d'onde multimode dilué	84
III.1. Motivations pour la photodiode de puissance	86
III.2. Structure de la photodiode de puissance InP	86
III.3. Epitaxie.....	90
III.4. Etapes technologiques de fabrication des dispositifs d'essai.....	91
III.4.1. Principales étapes du processus technologique	91
III.4.1.1. Dépôt des électrodes	91
III.4.1.2. Gravure	92
III.4.1.3. Planarisation	93
III.4.1.4. Report des électrodes.....	93
III.4.1.5. Contact N.....	94
III.4.2. Description détaillée du processus technologique.....	94
III.4.2.1. Composants réalisés.....	94
III.4.2.2. Détail des opérations technologiques.....	96
III.5. Caractérisation des photodiodes de puissance	104
III.5.1. Banc de mesure.....	104
III.5.2. Résultats expérimentaux	105
III.6. Conclusion.....	107
III.7. Références	109
Chapitre IV : Photodiode PIN-guide 1.3µm sur GaAs	111
IV.1. Motivation de la photodiode PIN-guide sur GaAs	113
IV.2. Structure de la photodiode PIN-guide sur GaAs	113
IV.3. Epitaxie	115
IV.4. Etapes technologiques de fabrication des dispositifs d'essai	116
IV.4.1. Principales étapes du processus technologique.....	117
IV.4.1.1. Dépôt des électrodes.....	117
IV.4.1.2. Gravure.....	118
IV.4.1.3. Planarisation	118
IV.4.1.4. Report des électrodes.....	118
IV.4.1.5. Contact N.....	119
IV.4.2. Description détaillée du processus technologique.....	119

IV.4.2.1. Composants réalisés	119
IV.4.2.2. Détail des opérations technologiques	121
IV.5. Caractérisation des dispositifs	126
IV.5.1. Mesures statiques.....	128
IV.5.2. Caractérisation dynamique.....	131
IV.6. Conclusion	133
IV.7. Références	135
Conclusion générale	138
ANNEXE A : Photodiodes PIN et UTC.....	143
A.1 Photodiode PIN	145
A2. Photodiode UTC.....	147
Références de l'annexe A.....	149
ANNEXE B : Guides d'onde optique en arête sur InP	152
B1 Guides passifs	153
B2 Guides actifs	154
Références de l'annexe B	156
ANNEXE C : Photodiodes à base de guide d'onde	159
C1 Photodiode PIN-guide	160
C2 Photodiode intégrée monolithiquement à un guide d'onde.....	160
Références de l'annexe C	164
Publications	166

Introduction

Cette thèse se veut d'ordre essentiellement technologique et expérimental. Le point de départ de ce travail était d'apporter de nouvelles solutions technologiques à la commutation optique sur InP. En effet, un gros travail a été fourni à l'IEMN pour cette fonction, en collaboration et avec le soutien de Thales Systèmes Aéroportés et la Délégation Générale pour l'Armement (DGA).

Le commutateur sur InP est un composant technologiquement délicat à réaliser, et des résultats à l'état de l'art international ont été obtenus dans le cadre de la thèse de Malek Zegaoui au prix d'une conception approfondie, qui a impliqué des prouesses technologiques avec l'usage du masquage électronique. C'est pour rendre cette technologie plus accessible et plus simple à mettre en œuvre que nous avons envisagé le remplacement d'une jonction PIN par une jonction Schottky. En même temps, il était intéressant d'évaluer les possibilités de modifier l'indice optique d'un guide d'onde de la filière InP, à l'aide d'un contact Schottky. C'est sur ce premier objectif que nous avons consacré nos premiers efforts de recherche. Cette démarche, nous a amené à mettre au point une technologie de guide d'onde optique passif et actif qui servait à fabriquer les dispositifs d'essai autorisant l'étude concernée.

Munis de cette expérience, nous avons envisagé de l'appliquer à d'autres dispositifs de type guide d'onde afin d'étudier, soit l'apport de structures épitaxiales nouvelles, soit l'apport de nouvelles filières de matériaux III-V, pour deux fonctions opto-électroniques : La commutation dont le principe de base s'exprime au travers des variations d'indice par injection d'un courant électrique, et la photodétection. C'est en suivant cette axe là que nous avons enrichi notre expérience de recherche au travers de deux projets complémentaires que sont une participation au PEA ORGE et un projet MERLION avec l'Université Technologique de Nanyang (NTU) de Singapour.

Le dénominateur commun de ces travaux est la maîtrise d'une technologie de type guide d'onde, qui est appliquée à l'ensemble des dispositifs auxquels nous nous sommes intéressés dans ces projets.

Notre travail de thèse peut donc paraître hétéroclite. Néanmoins, notre démarche résulte d'une recherche et d'un souci d'efficacité. Il a correspondu à une volonté de répondre de façon aussi rapide que possible à un certain nombre de sollicitations contractuelles, parfois internationales. Chaque fois, il s'agissait d'étudier, à l'aide d'une technologie que l'on peut considérer comme équivalente pour tous ces projets, soit de nouveaux effets physiques, soit d'explorer des performances accessibles avec de nouvelles structures ou de nouveaux matériaux, pour deux applications, la commutation et la photodétection.

La structure de notre thèse va donc suivre l'approche que nous avons adoptée pour mener à bien l'ensemble des projets auxquels nous avons participé. Cette thèse comportera quatre chapitres, qui vont correspondre aux quatre projets forts que nous avons menés de façon aussi approfondie que possible, en mettant en œuvre chaque fois une technologie de type guide d'onde, chacun de ces dispositifs ayant ensuite été caractérisés aussi complètement que possible .

Chaque chapitre contiendra donc une partie expliquant nos motivations, puis décrira et expliquera là où les structures envisagées, détaillera la technologie, et terminera par les résultats expérimentaux de caractérisation, et les conclusions partielles que nous pouvons tirer de chaque étude.

Tout naturellement notre thèse s'articulera donc sous la forme de quatre chapitres correspondant aux quatre types d'objets nouveaux que nous avons réalisés :

- ❖ des guides d'ondes actifs de la filière InP à contact Schottky pour la commutation optique,
- ❖ des guides d'onde à base d'une double hétérostructure GaAs/GaAsSbN/GaAs pour le guidage optique à la longueur d'onde 1,55 μm et la commutation,
- ❖ des photodiodes de puissance InP constituées d'un guide d'onde multimode dilué couplé monolithiquement de façon évanescente à une photodiode PIN dérivée de la photodiode UTC,
- ❖ des photodiodes PIN-guide sur GaAs pour la photodétection à la longueur d'onde 1,3 μm .

Pour chacun de ces chapitres, nous analyserons successivement, en suivant la même philosophie, nos motivations, la structure des dispositifs, la technologie et les résultats expérimentaux.

Les annexes A,B,C compléteront la physique des dispositifs : photodiodes PIN et UTC pour l'annexe A, guides d'onde InP pour l'annexe B et photodiodes guide d'onde pour l'annexe C.

Chapitre I : Guides d'onde actifs InP à contact Schottky

I.1. Motivation

De gros efforts ont été accomplis par l'IEMN, en collaboration et avec le soutien et la collaboration de Thales Systèmes Aéroportés et la Délégation Générale pour l'Armement (DGA), pour aboutir à des commutateurs électrooptiques répondant aux besoins des systèmes de Thales. C'est après plus de 10 ans de recherche que l'IEMN a démontré expérimentalement la possibilité de réaliser un commutateur très performant, dont la diaphotie (ou diaphonie optique) atteint 40dB pour un courant de commande d'une trentaine de milliampères [1]. Ce composant est rapide avec des temps de commutation de quelques nanosecondes. Il n'apporte pas de bruit supplémentaire à la liaison [2]. Ce composant fonctionne sur les variations d'indice optique obtenues par injection de porteurs dans une hétérostructure PIN de type guide d'onde sur InP. Le dispositif retenu, fabriqué en optique intégrée sur InP, est un commutateur de type DOS (Digital Optical Switch, voir figure I.1.) constitué d'une jonction Y comportant une électrode sur chaque branche de sortie. C'est l'injection d'un courant électrique dans l'une des branches qui, par effet de porteurs libres, notamment par effet plasma, diminue l'indice optique dans cette branche de sortie, et repousse la lumière vers l'autre branche. L'injection de porteurs est obtenue à l'aide d'une jonction PIN située sous l'électrode de commande. Les performances élevées en termes de diaphotie, résultent d'une optimisation de la géométrie des électrodes, ainsi que l'a démontré Malek Zegaoui dans son travail de thèse [3]. C'est un dispositif sensiblement équivalent que propose Carleton University, à Ottawa [4-8], avec cependant des performances plus modestes en ce qui concerne la diaphotie.

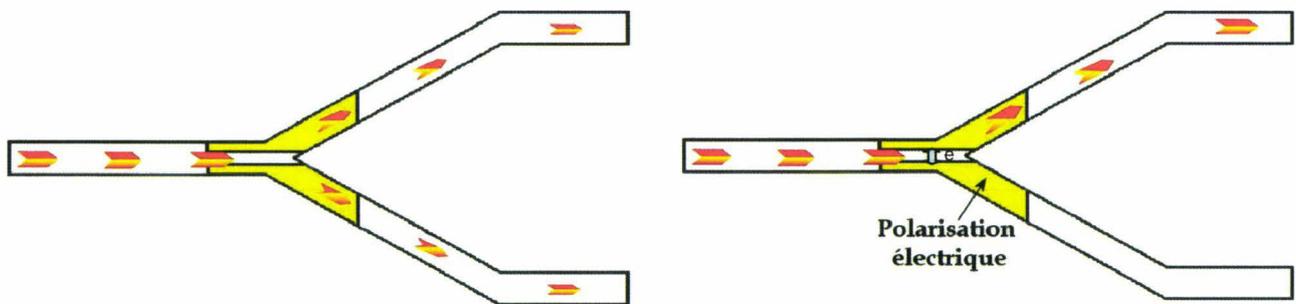


Figure I.1 : Schéma de principe du commutateur DOS

Dans tous les cas, quelle que soit la géométrie des électrodes, les performances, et surtout la diaphotie, sont très dépendantes de l'écart minimal « e » entre les deux électrodes de commande. En toute rigueur, il faudrait que cet écart soit nul, ce qui est évidemment impossible. Il en résulte que des fortes diaphoties ne peuvent être obtenues qu'au prix d'un écart entre les deux électrodes de commande aussi submicronique que possible. Cette condition impose des prouesses technologiques impliquant l'usage d'un masqueur électronique.

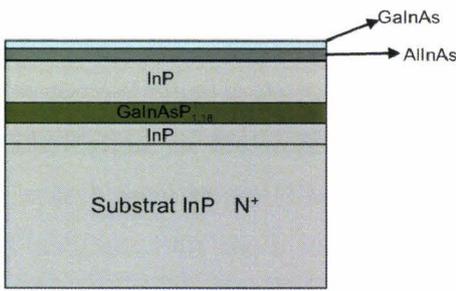
C'est pourquoi la motivation première de ce travail était de réduire la complexité technologique de ce dispositif en conservant les mêmes performances. La voie envisageait de remplacer la jonction PIN par un contact Schottky, ce qui supprime l'étape ardue de la gravure de la couche P entre les électrodes pour isoler celles-ci, et le contrôle de cette gravure dans un espace submicronique pour des longueurs d'électrodes avoisinant le millimètre. Ce remplacement suppose que l'on puisse injecter des porteurs dans une double hétérojonction avec un contact Schottky. Même si dans les théories habituelles du contact Schottky aucune accumulation de porteurs n'est envisagée, on peut penser que la combinaison d'un contact Schottky avec une double hétérostructure peut favoriser une accumulation de porteurs dans le matériau d'énergie de bande interdite la plus petite. C'est cette évaluation pour les matériaux de la filière InP qui constitue l'essence même de ce premier chapitre.

I.2. Structure InP à contact Schottky

I.2.1. Epitaxie

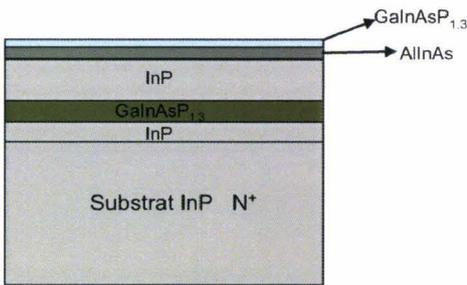
La croissance des couches épitaxiales a été réalisée par Christophe Coinon de l'équipe épitaxie de l'IEMN dirigée par Xavier Wallart, sur un substrat de deux pouces de diamètre, dans un bâti d'épitaxie par jets moléculaire source gaz. Les structures sont celles de la figure I.2a et la figure I.2b.

Deux types d'épitaxies ont ainsi été traités ; leurs croissances ont été effectuées sur un substrat InP N⁺. La couche guidante est définie par un alliage en quaternaire GaInAsP d'épaisseur 0,3μm; elle est non intentionnellement dopée et sa composition est adaptée à la longueur d'onde 1,18μm ou 1,3μm en accord de maille sur InP, pour un fonctionnement en transparence à la longueur d'onde optique de 1,55μm. Ce quaternaire représente le cœur du guide optique d'indice plus élevé que celui d'InP. C'est dans cette couche que se propagera la plus grande partie de la puissance optique injectée dans le guide d'onde. Le confinement supérieur est composé de 1,6μm d'InP non intentionnellement dopé, suivi d'une couche de contact Schottky AlInAs d'épaisseur 150Å qui est protégée par une fine couche de 50Å de GaInAs pour le guide à base de quaternaire 1,18μm et 50Å de GaInAsP pour le guide à base de quaternaire 1,3μm. L'épitaxie démarre aussi par une couche inférieure appelée tampon, composée de 0,3μm d'InP non intentionnellement dopée sur le substrat d'InP dopé N⁺.



Matériau	Type	Epaisseur
GaInAs	Nid	50Å
AllnAs	Nid	150Å
InP	Nid	1,6µm
GaInAsP _{1,18}	Nid	0,3µm
InP	Nid	0,3µm
Substrat InP	N ⁺	~ 400µm

Figure 1.2 a : Structure épitaxiale utilisée pour la fabrication des guides actifs à contact Schottky à base de quaternaire 1.18µm



Matériau	Type	Epaisseur
GaInAsP	Nid	50Å
AllnAs	Nid	150Å
InP	Nid	1,6µm
GaInAsP _{1,3}	Nid	0,3µm
InP	Nid	0,3µm
Substrat InP	N ⁺	~ 400µm

Figure 1.2b : Structure épitaxiale utilisée pour la fabrication des guides actifs à contact Schottky à base de quaternaire 1.3µm

1.2.2. Structure guidante

La structure guidante de base étudiée dans ce chapitre est présentée ci-dessous, figure I.3.

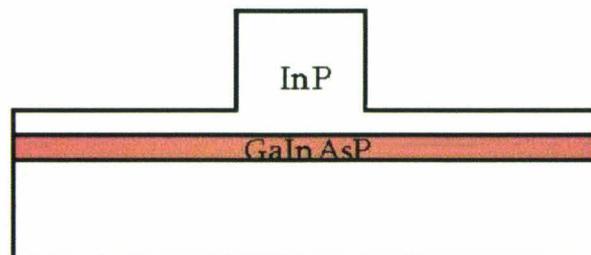
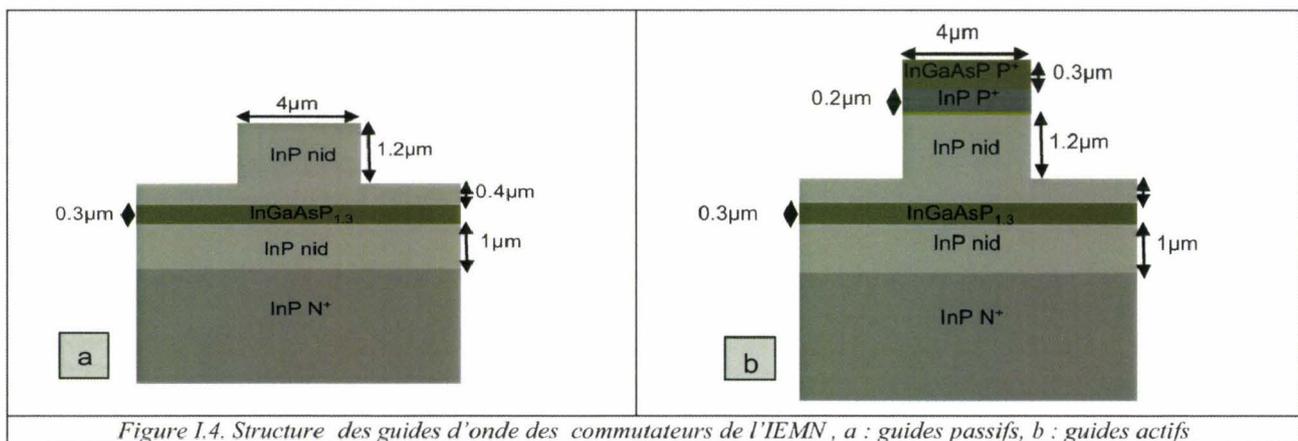


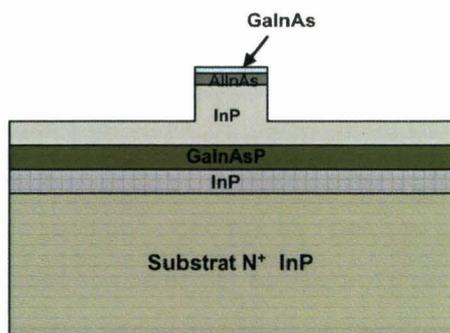
Figure I.3. Coupe schématique du guide optique utilisé dans ce travail

Elle dérive de la structure conventionnelle utilisée depuis plusieurs années dans les commutateurs électro-optiques développés à l'IEMN. Pour mémoire nous rappelons ci-dessous figure I.4, la structure du guide d'onde passif et actif du commutateur électrooptique sur InP de l'IEMN. Pour une information plus complète nous demandons aux lecteurs de se rapprocher, par exemple, des thèses de Malek Zegaoui [3] et de Nargess Choueib [9]. Très succinctement, nous rappelons la justification des structures de guide du commutateur de l'IEMN. Le guide passif (figure I.4a) est un guide en arête obtenu par gravure de la couche de confinement supérieure qui est en InP. Le cœur du guide d'onde d'indice supérieur à celui de

l'InP est en quaternaire GaInAsP (les valeurs sont précisées dans l'annexe B). L'ensemble est obtenu par croissance épitaxiale sur un substrat N^+ qui sert de couche de confinement inférieur. Cette croissance est effectuée à l'aide d'un bati par jets moléculaires sources gaz à l'IEMN. La structure épitaxiale autorise le confinement vertical de la lumière dans la couche de quaternaire. La structure en arête induit le confinement latéral. Les épaisseurs de quaternaire $0,3\mu m$ et de la couche d'InP supérieure $1,6\mu m$ sont choisies pour obtenir un profil de mode aussi proche que possible de celui d'une fibre lentillée. Pour rendre cette structure active, on y adjoint (figure I.4b), au cours de la croissance épitaxiale, une région InP dopée P et une couche de contact supérieure en quaternaire dopée P^+ . Cette partie active est ensuite munie d'électrodes déposées sur la face arrière et sur le haut du guide actif en formant un contact ohmique ; l'ensemble donne ainsi une diode PIN [10]. Le passage d'un courant électrique lorsque cette diode est polarisée en direct, permet l'injection de charges dans le matériau à petit gap et par conséquent, essentiellement par effet plasma, la réduction de l'indice optique du matériau.



La structure à contact Schottky dont nous présentons l'étude dans ce chapitre est dérivée directement de celle du commutateur de l'IEMN. Elle est présentée figure I.5.1; la croissance de la couche épitaxiale est effectuée par jets moléculaires sources gaz par l'équipe matériaux de l'IEMN. On retrouve les matériaux qui forment la base des guides passifs, c'est-à-dire le cœur en quaternaire et une couche de confinement en InP. On retrouve également la gravure supérieure dans l'InP pour former l'arête du guide.



Matériau	Dopage	Epaisseur
GaInAs	nid	50Å
AlInAs	nid	150Å
InP	n.i.d.	16000Å
GaInAsP _{1,18}	n.i.d.	3000Å
Buffer InP	n.i.d.	3000Å
Substrat	N^+	400µm

Figure I.5.1 Structure du guide d'onde à contact Schottky à base de quaternaire $1,18\mu m$ et structure épitaxiale dans le tableau ci-dessus.

Notons au passage que la largeur de l'arête est typiquement de $5\mu\text{m}$. La différence essentielle avec la structure PIN provient du contact Schottky, ou contact métal semi-conducteur, qui est obtenu par un dépôt de Ti/Pt/Au en haut de l'arête sur une couche supérieure très fine (150\AA) d'AlInAs (figure I.5.2). Tous les matériaux sont non dopés, pour que la zone déserte sous le contact Schottky s'étende le plus loin possible. Au moment de la croissance épitaxiale est ajoutée une couche finale en GaInAs qui empêche l'oxydation de l'AlInAs. La hauteur d'arête pour notre structure à contact Schottky est sensiblement équivalente à celle déjà utilisée dans les commutateurs de l'IEMN ; elle est de l'ordre de $1,1\mu\text{m}$. Nous avons procédé ainsi de façon à obtenir des comportements optiques équivalents, et pouvoir comparer sous l'injection d'un courant électrique. Dans un premier temps, la couche de quaternaire est celle dont la composition est adaptée à la longueur d'onde $1,18\mu\text{m}$. Nous avons procédé ainsi parce que nous avons déjà étudié ces matériaux dans la structure PIN, et que leur croissance épitaxiale est plus commode. Dans un deuxième temps, nous avons étudié aussi des structures pour lesquelles la composition de quaternaire est adaptée à la longueur d'onde $1,3\mu\text{m}$, sachant que ce matériau a également correspondu à des travaux en structure PIN. Nous reportons par la suite les technologies que nous avons été amenées à mettre en œuvre pour fabriquer ces dispositifs d'essai avec le quaternaire $1,18\mu\text{m}$, puis avec le quaternaire $1,3\mu\text{m}$, en reportant aussi chaque fois les résultats expérimentaux que nous avons obtenus.

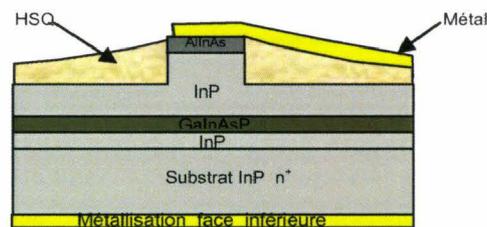


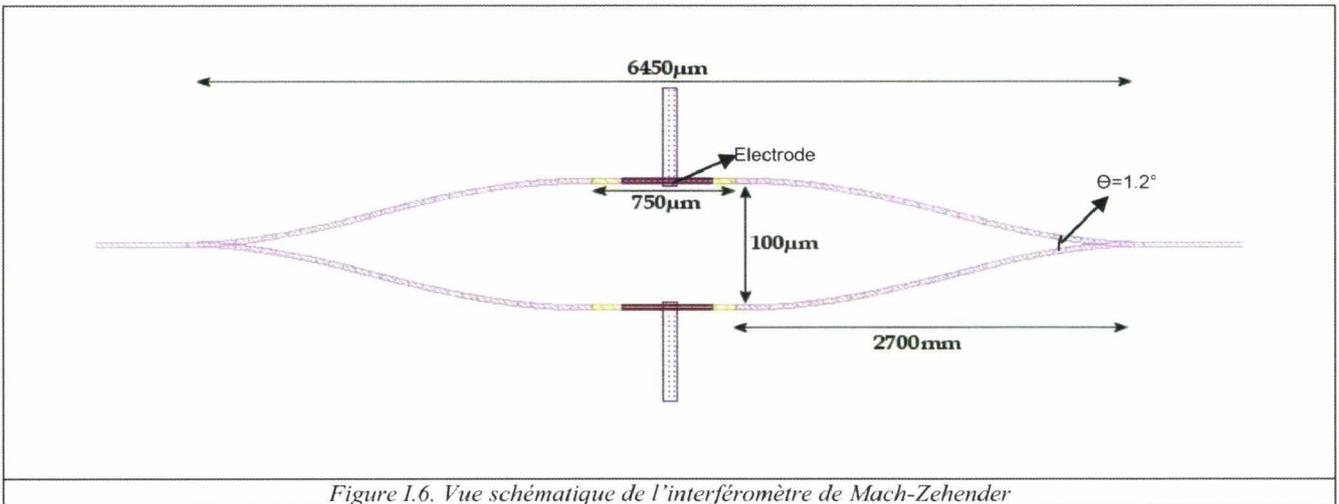
Figure I.5.2 Structure à contact Schottky à base de quaternaire $1,18\mu\text{m}$

I.3. Dispositifs étudiés

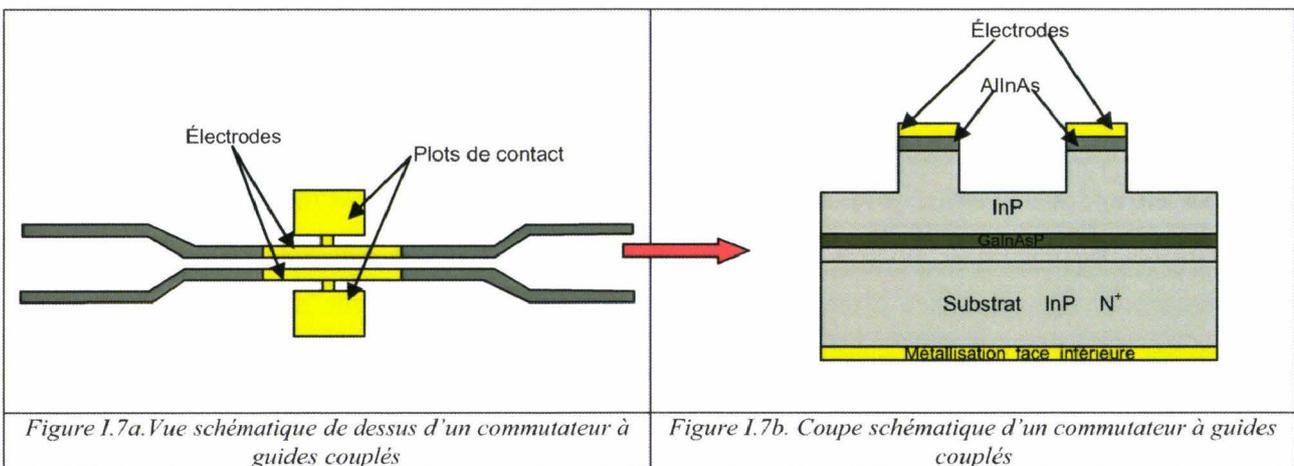
L'objectif principal de notre travail consiste ici à évaluer les variations d'indice consécutives à l'injection d'un courant électrique dans un guide d'onde InP en arête muni d'un contact Schottky. Dans ce but, nous pensons utiliser conjointement la technique de la cavité Perot-Fabry et de l'interféromètre de Mach-Zehnder en optique intégrée [11]. Dans chacun des cas, les variations d'indice se traduisent par un caractère oscillatoire de la puissance optique, en sortie du dispositif, lorsque l'on injecte un courant électrique pour une puissance d'entrée constante, traduisant le mécanisme des franges d'interférence. Nous avons donc prévu de fabriquer et caractériser:

- des guides droits passifs pour la mesure des pertes de propagation et de couplage,

- des guides actifs munis d'électrodes Schottky ; que ce soit dans les cas passifs ou actifs, les faces clivées jouent le rôle des miroirs de la cavité Perot-Fabry. Les électrodes ont des longueurs de 500, 1000 et 2000 μm ,
- des interféromètres de Mach-Zehnder dont nous donnons ci-dessous, figure I.6, une vue schématique [9]. Ce dispositif est constitué de deux jonctions Y situées respectivement en entrée et en sortie de l'interféromètre, reliées par deux bras actifs pourvus d'électrodes. L'angle entre les deux bras du Y est de 1,2° [3] et la longueur des électrodes vaut 500 μm , 1000 μm et 2000 μm .



Par ailleurs, dans l'hypothèse où nous obtiendrions une variation d'indice suffisante, nous avons prévu d'ajouter à ces dispositifs de base des commutateurs à guides couplés. Ce sont des structures bien connues constituées de deux guides couplés permettant le couplage de l'onde optique d'un guide à l'autre. Une modification d'indice consécutive à l'injection d'un courant se traduit par un changement de couplage, et l'on peut ainsi espérer commuter la lumière d'un guide à l'autre en sortie du commutateur. Une vue schématique de dessus et en coupe de ce commutateur est donnée ci-dessous (figure I.7a et figure I.7b).



En extrémité des dispositifs fabriqués, nous avons introduit des guides passifs en S pour obtenir un écartement suffisant des guides d'entrée et de sortie [12]. La distance entre guides couplés est de $2\mu\text{m}$, $4\mu\text{m}$ et $6\mu\text{m}$. Les longueurs d'électrodes sont $500\mu\text{m}$, $1000\mu\text{m}$ et $2000\mu\text{m}$.

I.4. Etapes technologiques de fabrication des dispositifs d'essai à base de Q1,18

I.4.1. Description sommaire du processus technologique

I.4.1.1. Création des motifs

Les premiers dispositifs sur la structure InP à base de quaternaire 1,18 μm ont été réalisés par lithographie optique. La lithographie optique définit ici les guides optiques passifs en utilisant un masque de résine optique négative, qui sera transféré sur un masque de nitrure (figure I.8.1).

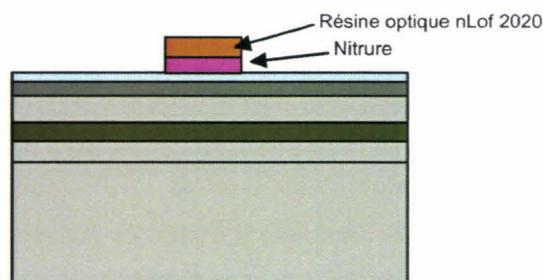


Figure I. 8.1. Transfert du masque de résine sur nitrure

I.4.1.2. Gravure

Après un nettoyage de la résine par un plasma O_2 , on effectue une gravure homogène, verticale et surtout peu rugueuse afin de réduire au maximum les pertes optiques. L'arête des guides à graver est constituée de 50\AA de GaInAs, de 150\AA de AlInAs et $1,1\mu\text{m}$ d'InP, soit une épaisseur totale de $1,12\mu\text{m}$ (figure I.8.2). Par souci de simplicité, afin d'éviter les problèmes de sous-gravure, nous nous sommes tournés vers la gravure sèche RIE [13-17] ; cette technique de gravure est bien maîtrisée au sein du laboratoire pour les matériaux III-V. Le plasma utilisé est à base d'un mélange de méthane et d'hydrogène. Le bati dont nous disposons est un bati de gravure RIE Plasma lab 80 OXFORD contrôlé par PC. Un système d'interférométrie laser est adjoint au système de gravure pour le contrôle de fin d'attaque.

L'épaisseur à graver est de $1,12\mu\text{m}$; les temps de gravure sont assez longs. Nous fragmentons le temps total de gravure en cycles de 20 minutes, afin d'assurer l'évacuation des espèces gravées. L'utilisation du

méthane entraîne la formation de polymères modifiant les conditions de gravure, qu'il convient donc de retirer par plasma oxygène. Donc une gravure s'effectue en une suite de cycles élémentaires, permettant l'élimination au fur et à mesure des polymères formés au cours de la gravure ; chaque cycle comprend les étapes suivantes :

- ✓ Pompage jusqu'à la pression de base
- ✓ Gravure des matériaux par plasma CH_4/H_2
- ✓ Retrait des polymères par plasma oxygène

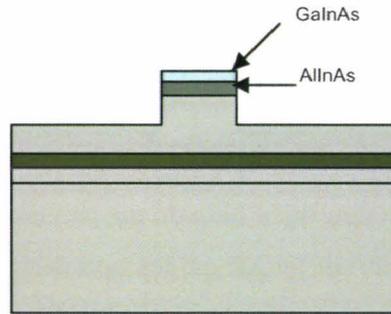


Figure 1.8.2 Gravure de l'arête du guide

1.4.1.3. Planarisation

Comme nous l'avons déjà indiqué, une étape décisive dans la réalisation de la partie active de nos guides est la planarisation à base de HSQ qui permet le report des électrodes sur un matériau isolant [18]. En effet, cette dernière a pour rôle de rattraper le dénivelé de $1,4\mu\text{m}$ entre le haut des électrodes et le bas du ruban d'InP formant les guides optiques ainsi que d'éviter les courants de fuite en surface (figure 1.8.3). Dans ce but, nous utilisons un dépôt pleine plaque de la HSQ qui a la propriété de se déposer, pour des raisons liées à sa fluidité, selon une épaisseur, plus mince sur une arête que sur un plan ; de plus, le dépôt en lui-même est simple et bien maîtrisé. Une fois déposée sur toute la surface du substrat, on densifie cette résine par plasma O_2 et elle s'apparente à de la silice.

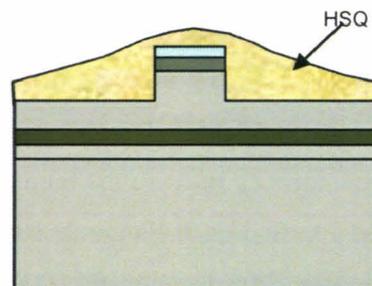


Figure 1.8.3 Dépôt de la HSQ sur l'ensemble du substrat

Une ouverture de la couche de HSQ au niveau du guide est réalisée par une gravure RIE. Ensuite on effectue une gravure du GaInAs superficiel par attaque chimique qui est sélective par rapport à AlInAs

(figure I.7.4). Rappelons que le GaInAs sert ici de couche protectrice pour AlInAs (oxydation...). Cette opération ne nécessite que quelques secondes [19-21].

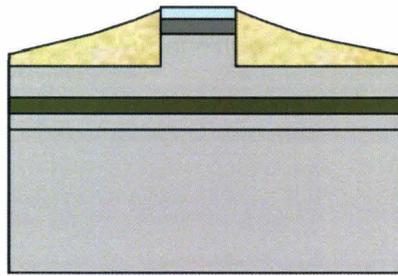


Figure I.7.4. Ouverture de la HSQ au niveau du guide

I.4.1.4. Dépôt des électrodes

La lithographie optique des motifs des électrodes et des plots de contact se fait en même temps en réalisant un profil casquette. Suit le dépôt de la séquence des couches métalliques (Ti/Pt/Au) par évaporation suivi d'un lift-off pour la réalisation du contact Schottky sur l'arête du guide (figure I.8.5).

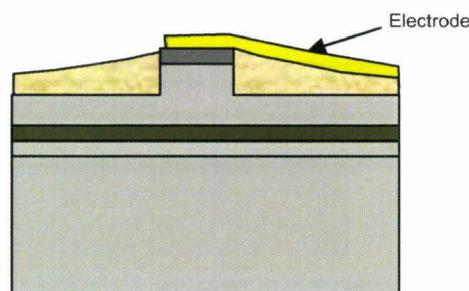


Figure I.8.5. Vue schématique en coupe de la face avant en fin de technologie.

I.4.1.5. Amincissement

Le processus technologique de la face avant est terminé. On commence alors le processus de la face arrière ; il s'agit de l'amincissement de la plaque à 130 μm (figure I.8.6) et de la métallisation par un dépôt d'or en vue de réaliser le contact ohmique de type n^+ des dispositifs.

Avant les étapes technologiques de la face arrière, notre plaque est collée sur un support en verre. Ceci demande des précautions ; notamment la face avant est protégée par une épaisse couche de 9 μm de résine optique qui protège les composants. L'étape de collage est très délicate, il faut absolument éviter les bulles d'air entre les deux plaques. Celles-ci rendraient notre plaque très fragile lors du ponçage et un

clivage intempestif serait catastrophique étant donné la taille et le nombre de nos composants. On utilise de la cire chauffée à 80°C et une pression homogène est indispensable lors du collage. Après le collage, l'amincissement se fait par ponçage à l'abrasif suivi d'un polissage à l'eau de javel. Ceci permet d'atteindre une épaisseur de substrat d'InP de 130µm ce qui facilitera le clivage.

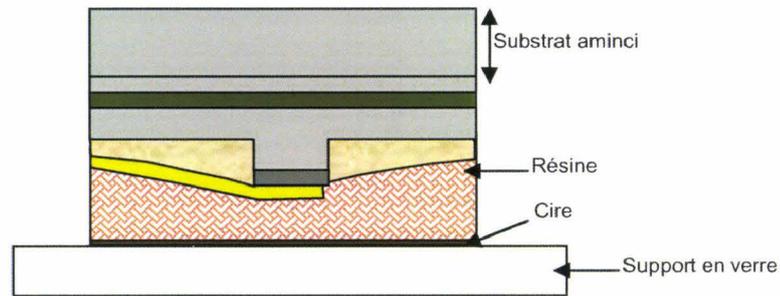


Figure 1.8.6. Vue schématique du composant en cours d'amincissement face arrière.

La plaque est ensuite décollée du support de verre à l'aide d'une solution organique dite « jus d'orange » chauffée qui attaque la cire. Un nettoyage à l'acétone enlève la résine protectrice et à la fin on dépose des couches Titane/Or qui forment le contact ohmique de type n^+ sous le substrat (figure 1.8.7).

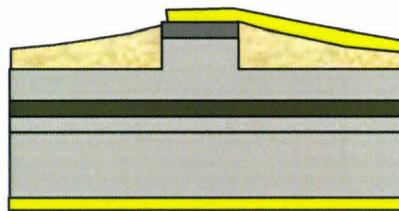


Figure 1.8.7. Vue schématique du composant final.

1.4.1.6. Clivage

La fin du processus technologique est le clivage : le but du clivage est d'avoir des faces clivées en entrée et sortie du composant les plus parfaites possibles. Cette étape est bien adaptée pour des structures photoniques à injection latérale.

La mise en œuvre du clivage est faite à l'aide d'une pointe diamant sur le bord de substrat, puis elle est propagée à l'aide d'une lame. En pratique nous utilisons une cliveuse automatique qui permet une précision du clivage d'environ 10µm.

1.4.2. Description détaillée du processus technologique

1.4.2.1. Masque global

Ce masque est constitué de guides droits dont des guides droits passifs qui nous permettront d'évaluer les pertes de propagation de la structure guidante et des guides droits métallisés, avec différentes longueurs d'électrodes (500 μm , 1000 μm et 2000 μm) figure I.8.2. Ces guides métallisés nous permettront de mesurer les variations d'indice dues à l'injection d'un courant ainsi que les pertes dues à la métallisation. Nous avons également prévu des guides couplés métallisés avec les différents écarts de 2 μm , 3 μm et 4 μm (figure I.8.3). Enfin nous avons rajouté des interféromètres, pour mesurer les variations d'indices de façon plus précise.

Dans ce processus technologique nous avons utilisé deux masques qui sont présentés figure I.8.1. Nous joignons, figure I.8.2 et figure I.8.3, une superposition de ces deux masques pour les guides droits passifs et actifs ainsi que pour les guides couplés.

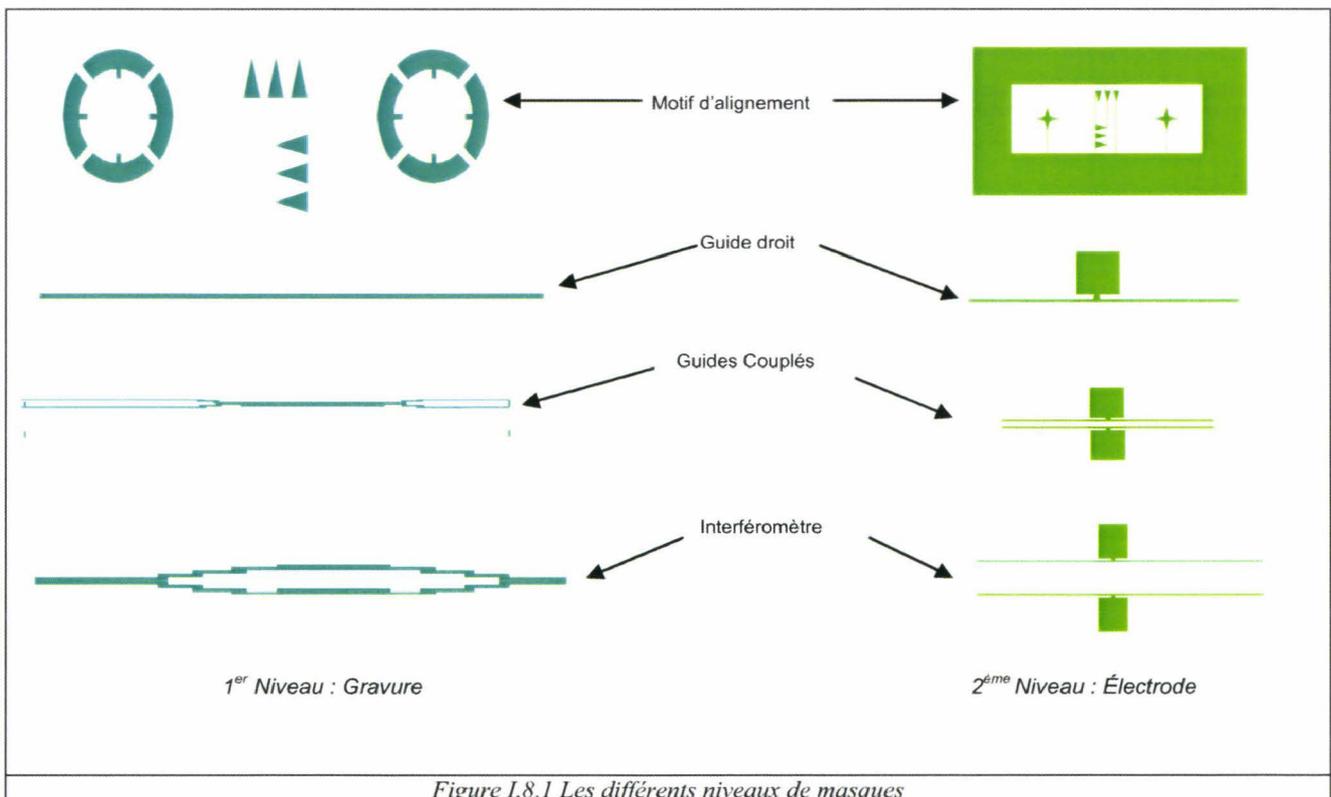


Figure I.8.1 Les différents niveaux de masques

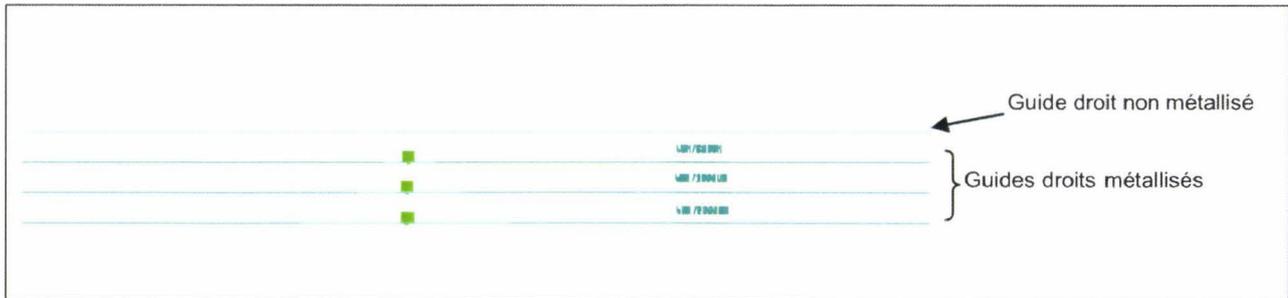


Figure 1.8.2 Représentation de la superposition des masques de guides droits

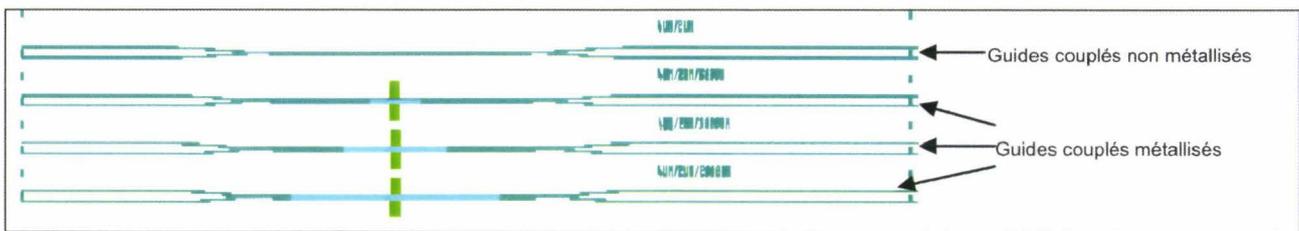


Figure 1.8.3. Représentation de la superposition des masques de guides couplés

La vue globale du masque utilisé avec l'épitaxie à base de quaternaire 1,18 μm est présentée figure 1.8.4.

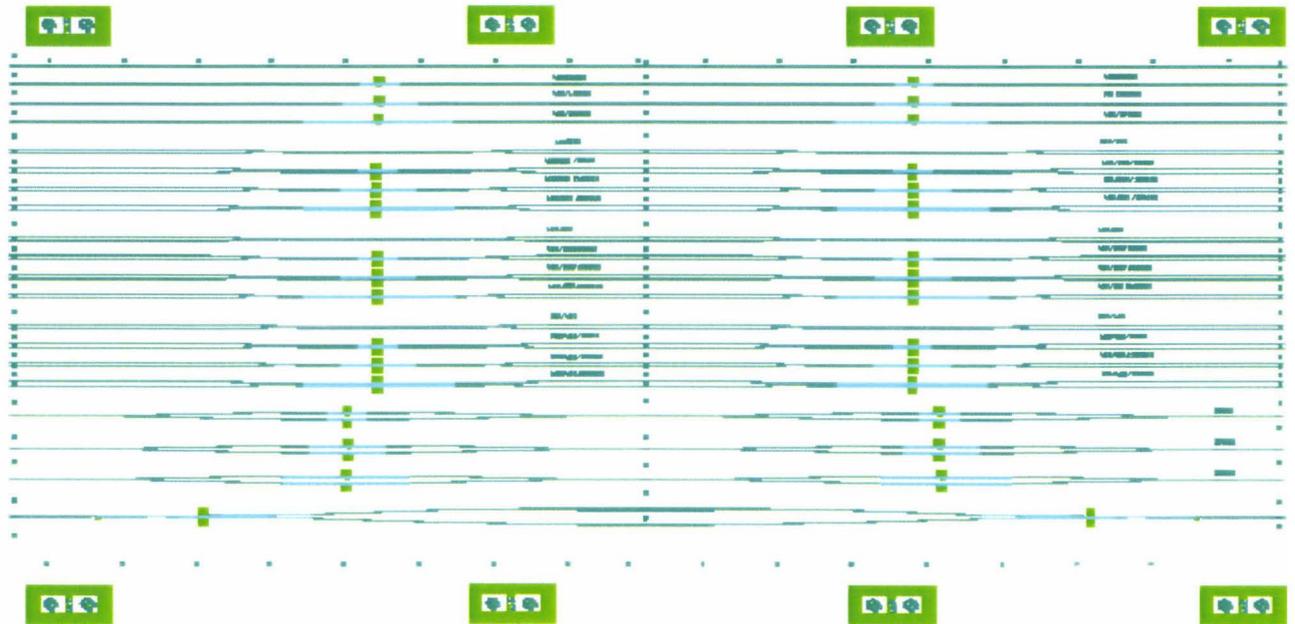
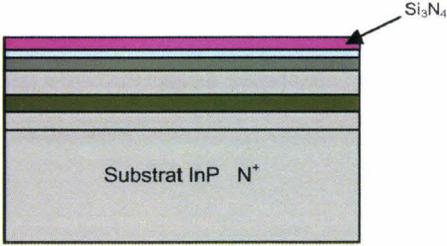
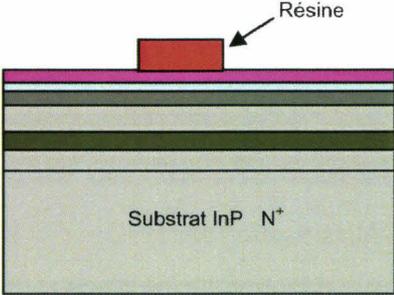


Figure 1.8.4 Masque complet des dispositifs à réaliser.

I.4.2.2. Opérations technologiques détaillées

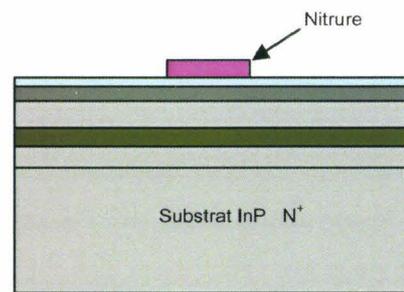
Les différentes opérations technologiques sont présentées de façons détaillées dans le tableau 1.1 ci dessous

<p>1. Désoxydation avec HF 1% pendant 3min ; ensuite nettoyage avec acétone et alcool et séchage avec azote.</p> <p>2. Déshydratation pleine plaque à une température de 200°C pendant 10 minutes pour évaporer les solvants résiduels.</p> <p>3. Dépôt 200nm de nitrure Si_3N_4 par PECVD à une température de 300°C.</p> <p>4. Recuit pleine plaque 5 min à 200°C pour évaporer les solvants résiduels.</p>	 <p>Le diagramme illustre un substrat rectangulaire gris clair étiqueté "Substrat InP N+" à l'intérieur. À la surface supérieure, une fine couche magenta est indiquée par une flèche et l'étiquette "Si₃N₄". Cette couche est au-dessus de plusieurs autres couches minces de différentes couleurs (gris, vert, gris) qui sont partiellement visibles.</p>
<p>5. Dépôt de résine optique nLof 2020 :</p> <ul style="list-style-type: none">* v : 3000rpm, a : 1000rpm/s, t : 20s* Inversion de masque par un recuit sur pleine plaque pendant 1 minute à une température de 110°C <p>6. Insolation par RC8 : 7,4mW/cm² pendant 3s puis recuit à 110°C pendant 1 minute</p> <p>7. Révélation avec AZ 326 pendant 30s avec une légère agitation de quelques seconds ensuite rinçage avec EDI pendant 15s.</p> <p>L'épaisseur totale de résine déposée est de 1,5μm</p>	 <p>Le diagramme illustre le même substrat "Substrat InP N+" qu'en haut. La couche magenta "Si₃N₄" est toujours présente. Une nouvelle couche rouge, étiquetée "Résine" par une flèche, a été déposée sur une portion de la surface supérieure, au-dessus de la couche de nitrure.</p>

8. Gravure du nitrure Si_3N_4 par le plasma CHF_3/CF_4 ; débit respectif 20/20sccm sous pression 50mTorr et 180W de puissance.

9. Gravure de résine au niveau des guides par plasma O_2 pendant quelques minutes, ensuite à l'aide du remover Pg à une température de 60°C pendant 30 minutes

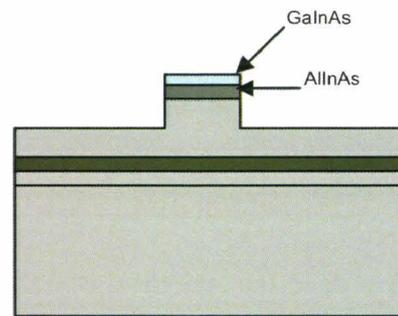
La vitesse de gravure du nitrure Si_3N_4 est de
70nm/min



10. Gravure RIE d'InP en utilisant CH_4/H_2 , débits respectifs : 20/80sccm, Pression : 30mTorr, tension : 35V, puissance : 150W

11. Gravure du Nitrure par le plasma CHF_3/CF_4 ; débit respectifs 20/20sccm sous pression 50mTorr et 180W de puissance

La vitesse de gravure de l'InP est de 17nm/min



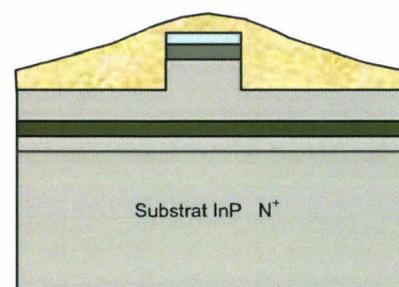
12. Planarisation par HSQ :

*Déshydratation pleine plaque à une température de 200°C pendant 15 minutes pour évaporer tous les solvants résiduels

* Dépôt de la fox16 (v : 1000rpm, a : 1000rpm/s, t : 30s)

* Recuit pleine plaque à une température de 120°C pendant 10 minutes

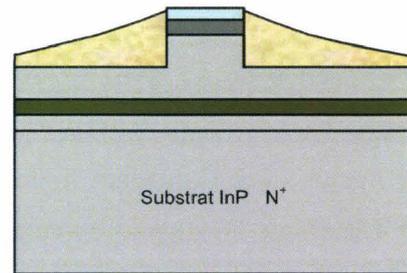
* Densification (oxydation) à un débit 50sccm de O_2 , puissance 290W, pression 100mTorr, tension 150W, temps 30min



13. Ouverture de la HSQ au niveau des guides par le plasma en utilisant les gaz CHF_3/CF_4 , débits respectifs 20/20sccm, sous pression de 50mTorr et avec une puissance de 180W

14. Gravure 50Å de GaInAs au niveau des guides par acide Succinique/ H_2O_2 de proportions respectives 40/3.

La vitesse de gravure du GaInAs est de 6.25Å/s



15. Métallisation (électrode + plots d'épaissement) :

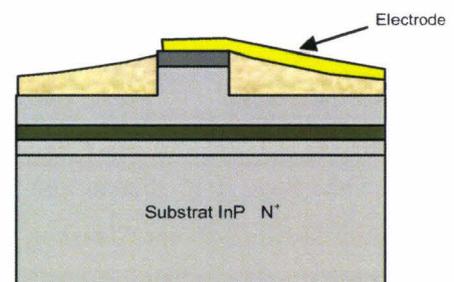
* Dépôt monocouche nLof2020 diluée v : 2000rpm
a : 1000rpm/s t : 20s ensuite un recuit pleine plaque pendant 1min à 110°C

* Insolation par RC8 : 7,4mW/cm² pendant 3s ensuite recuit à 110°C pendant 1 minute

* Révélation avec AZ 326 pendant 2min avec une légère agitation de quelques secondes, ensuite rinçage avec EDI pendant 15s.

* Métallisation par évaporation Ti/Pt/Au d'épaisseurs respectives (250Å/250Å/2500Å)

Lift-off avec remover Pg à 60°C pendant 3h



16. Amincissement face arrière avec une solution alumine :

- *Enduction de AZ 4562 v : 2000rpm, a : 1000rpm/s
t : 40s

- * Recuit à 110°C pendant 3min

- * Chauffage du support en verre à 80°C et étalement d'une noisette de cire « OCON-199 »

- * Collage dans une machine « LOGITECH » pour assurer la planéité nécessaire

- * Amincissement avec solution alumine de grains 15µm pendant 10min et de grains 3µm pendant 5min, avec une vitesse de rotation 25rpm

- * Polissage pendant 3min sous pression maximale et la vitesse de rotation maximale 70rpm

- * Décollage par dissolution de la cire dans une solution « Non solvant Cleaning Fluid »

- * Nettoyage avec l'acétone et alcool

17. Métallisation face arrière Ti/Au (100/500 Å)

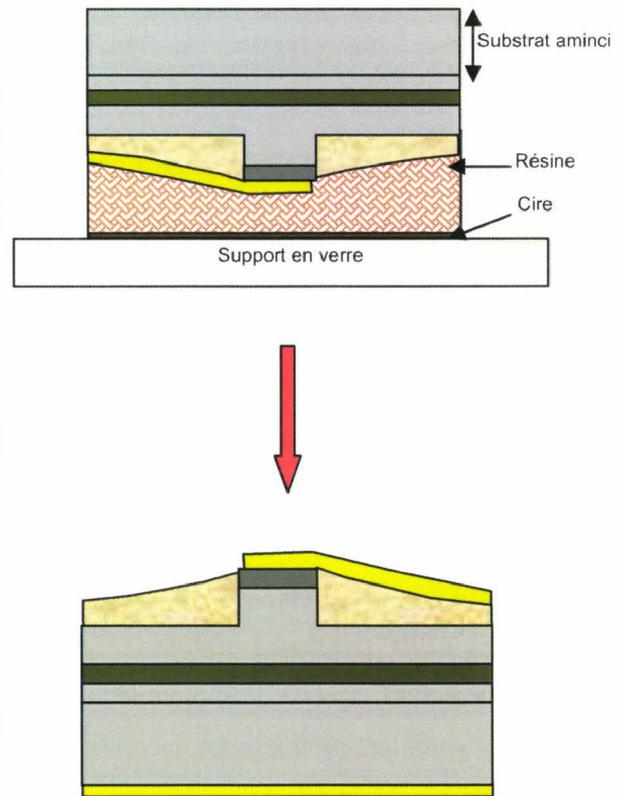


Tableau I.1. Différentes opérations technologiques par lithographie optique

I.5. Etapes technologiques des composants à base de quaternaire 1,3µm

En dehors du matériaux, la principale modification comparée au dispositif 1,18µm, est la métallisation en deux temps, constituée tout d'abord du dépôt du contact Schottky proprement dit, puis d'un report de plot de contact relativement épais (0,7µm)

I.5.1. Description sommaire du processus technologique

I.5.1.1. Dépôt du contact Schottky

Une lithographie électronique permet la réalisation de la forme casquette (figure I.9.1), à l'aide d'un bicouche de résines électroniques positives (EL13% (6000Å)/PMMA3% (600Å)).

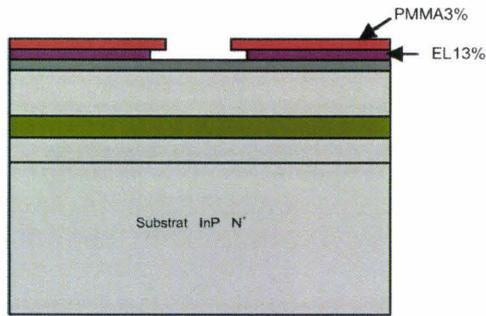


Figure 1.9.1 Coupe schématique de la plaque avec la résine électronique après révélation

Le dépôt des contacts Schottky (figure 1.9.2) est effectué par évaporation. Il est constitué de la séquence suivante de métaux : Ti/Pt/Au, suivie par un lift-off.

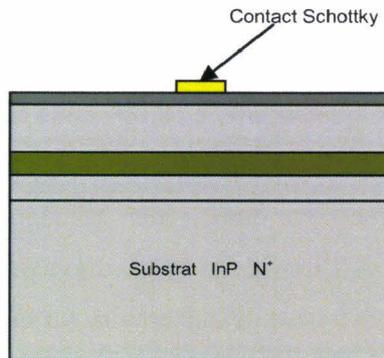


Figure 1.9.2. Dépôt du contact Schottky

1.5.1.2. Guides

Une lithographie électronique définit les guides optiques passifs et actifs, en utilisant un masque de résine électronique négative réversible qui sera transféré sur un masque de nitrure (figure 1.9.3)

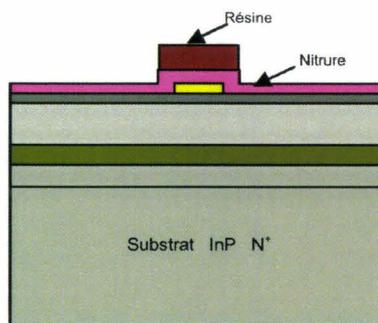


Figure 1.9.3. Transfert du masque de résine sur nitrure.

Lors de cette étape on utilise la gravure sèche « RIE ». La profondeur de gravure est égale à 1,1µm (figure 1.9.4)

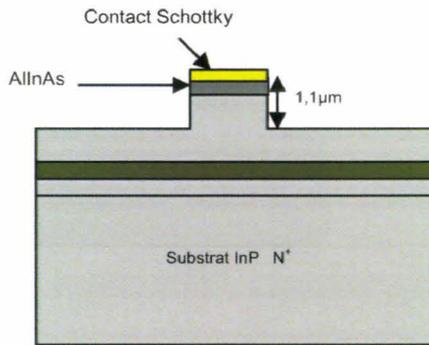


Figure I.9.4. Gravure du guide en arête

I.5.1.3. Planarisation

Comparé aux dispositifs à base de quaternaire $1,18\mu\text{m}$, nous avons cherché à améliorer cette étape de planarisation en ajoutant au préalable une étape de passivation par un dépôt de nitrure. Il a en effet été prouvé par Malek Zegaoui [22] que cette étape réduit de façon significative les courants de fuite qui pourraient provenir de la surface. A l'issue de la passivation par le nitrure, cette étape de planarisation s'effectue comme pour les dispositifs à base de quaternaire $1,18\mu\text{m}$ par un dépôt de HSQ (figure I.9.5).

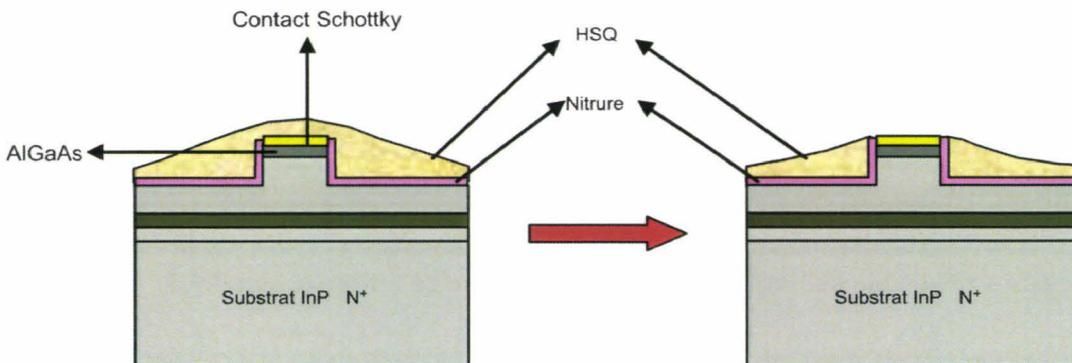


Figure I.9.5. Réalisation de la planarisation par HSQ.

I.5.1.4. Plots de contact (épaissement)

A ce stade de la réalisation du composant, une lithographie électronique et un dépôt d'une couche métallique (Titane/Or, $1000/6000\text{\AA}$) sont nécessaires pour réaliser les plots de contact qui permettront l'injection du courant dans la structure (figure I.9.6 a). Notons à ce stade, que dans la technologie du dispositif $1,18\mu\text{m}$ le plot de contact ait réalisé en même temps que le contact Schottky, en une seule métallisation d'épaisseur totale $0,3\mu\text{m}$.

Ici, pour cette technologie l'épaisseur totale du plot reporté est de $0,7\mu\text{m}$ soit $1\mu\text{m}$ au niveau des électrodes (figure I.9.6 b)

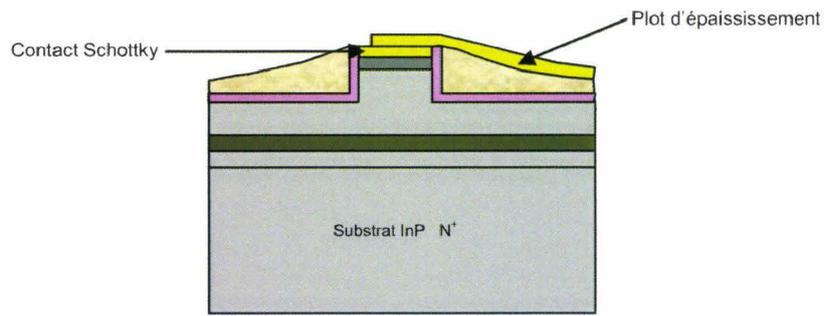


Figure I.9.6a Dépôt des plots d'épaissement

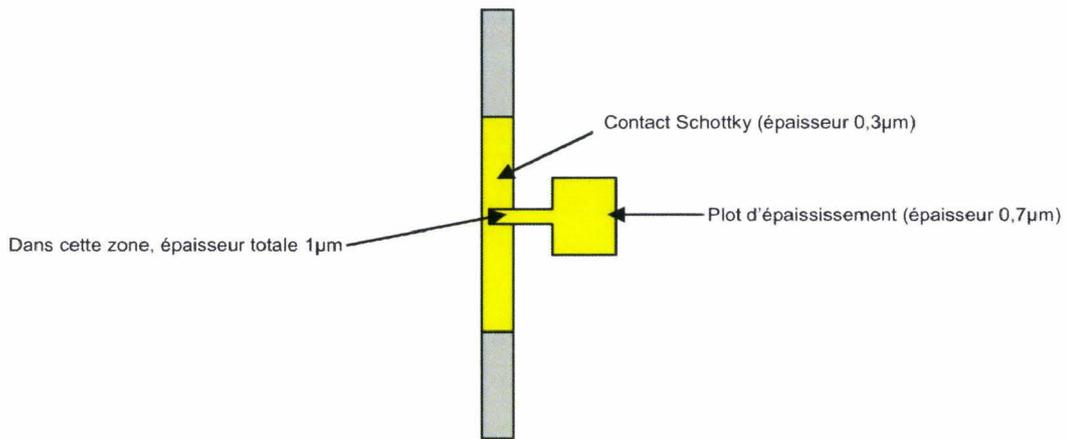


Figure I.9.6b Vue de dessus de plot d'épaissement

I.5.1.5. Contact N

Un amincissement de la face arrière est indispensable afin de faciliter l'étape de clivage nécessaire pour caractériser optiquement les composants. Dans ce but, on protège nos composants par une épaisse couche de résine AZ4562. Ensuite, notre substrat est collé avec de la cire chauffée à 80°C, sur une lame en verre. Cette étape est très délicate (figure I.9.7).

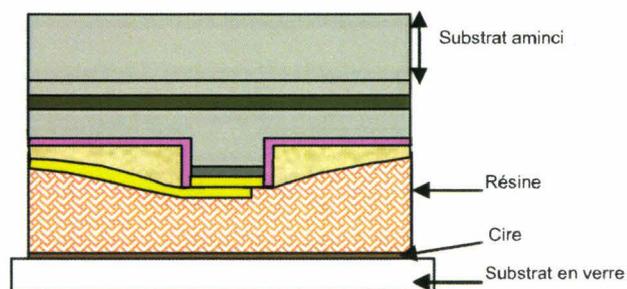


Figure I 9.7. Vue schématique du composant en cours d'amincissement face arrière.

Après avoir aminci la face arrière du substrat à $130\mu\text{m}$, le substrat est décollé de la lame en verre grâce à une solution organique dite « jus d'orange ». Ensuite, la résine protectrice sera enlevée par de l'acétone. Des couches de contact métallique type n, Titane /Or, sont déposées pleine plaque face arrière (figure I.9.8).

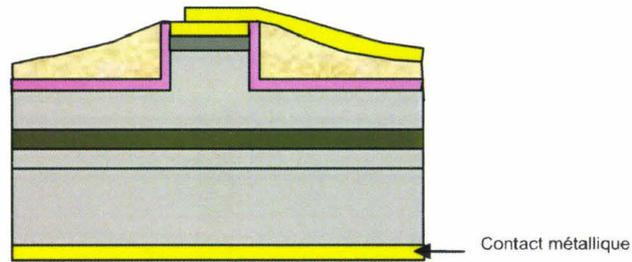


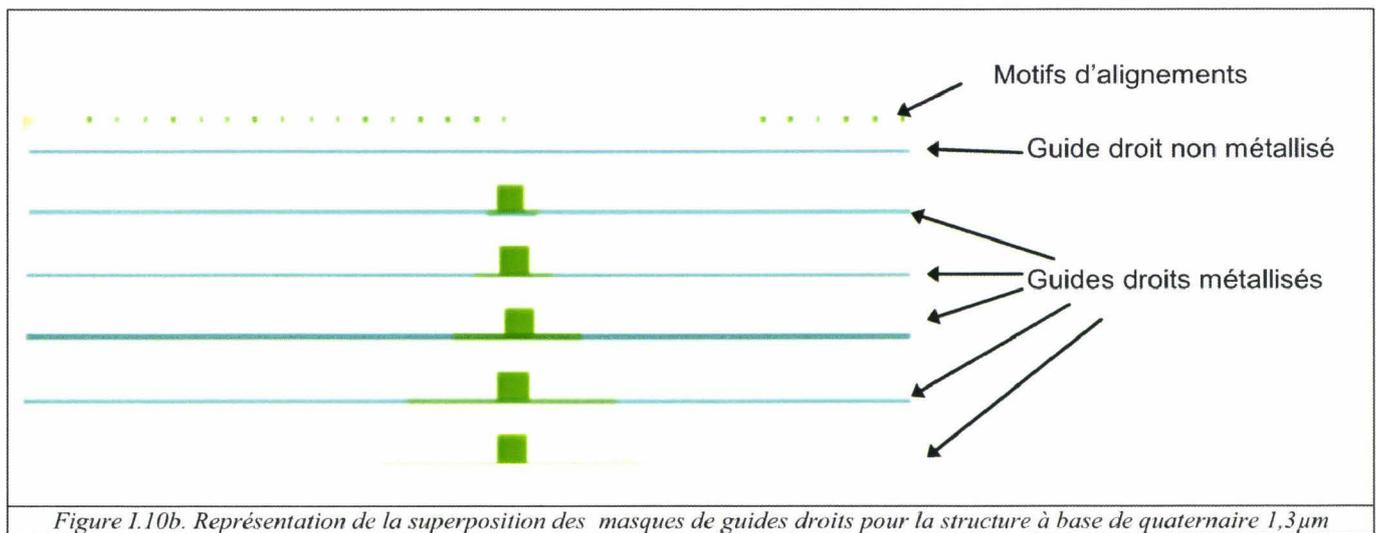
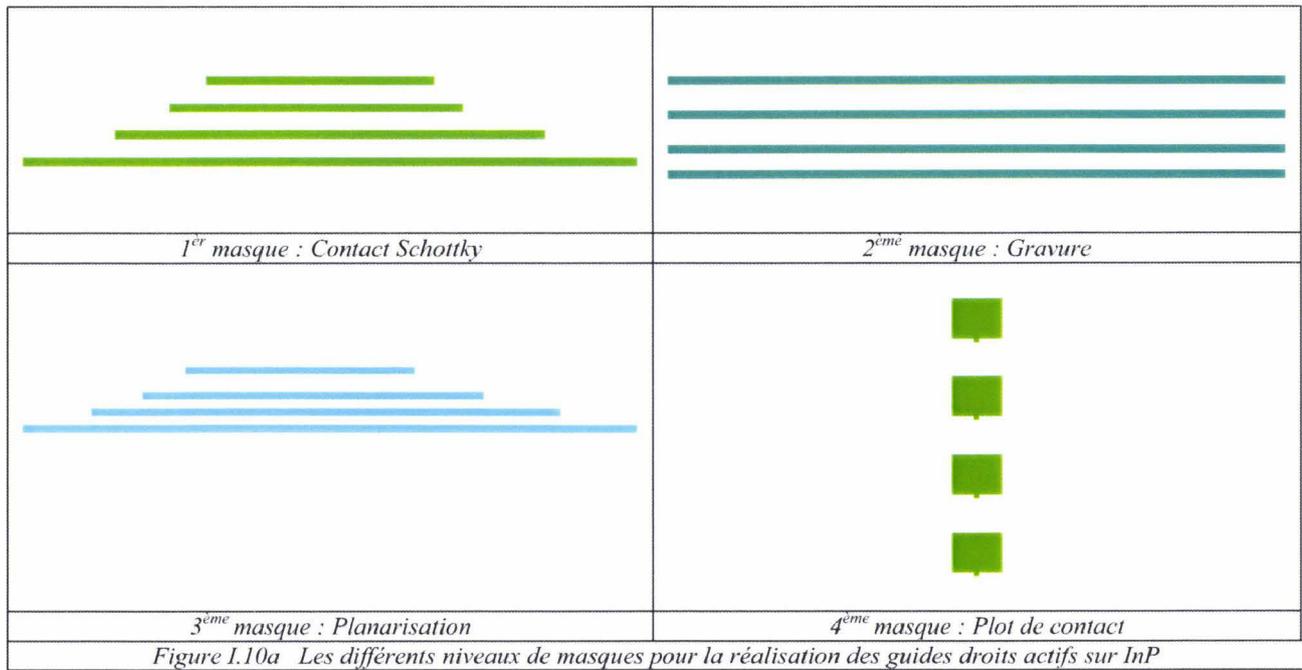
Figure I.9.8. Vue schématique du composant final.

I.5.2. Détails des opérations technologiques

I.5.2.1. Masque global

Il est constitué de guides droits métallisés. Ceux-ci ont une longueur de 5mm et une largeur de $4\mu\text{m}$. Les longueurs des électrodes sont $200\mu\text{m}$, $300\mu\text{m}$, $500\mu\text{m}$, $1000\mu\text{m}$ et $2000\mu\text{m}$. La caractérisation de ces guides permet d'étudier les caractéristiques de guidage (pertes d'insertion, pertes de propagation, pertes dues au métal) et les variations d'indice par injection d'un courant. Nous présentons figure I.10a, chacun des quatre masques, ainsi que la superposition de ces quatre masques électroniques utilisés pour la réalisation technologique des dispositifs $1,3\mu\text{m}$ (figure I.10b). Ils nous permettent d'illustrer leur géométrie.

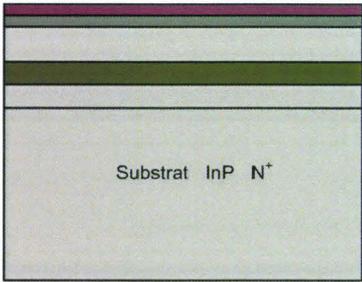
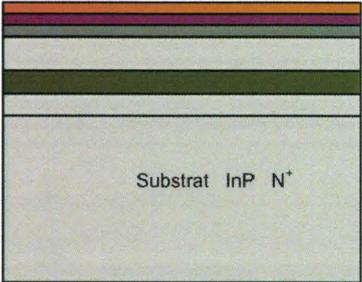
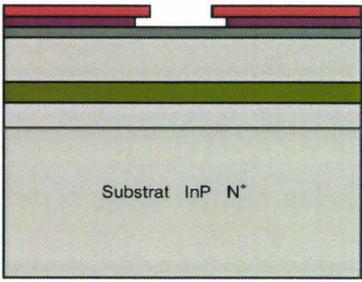
Comparé à la technologie des dispositifs $1,18\mu\text{m}$, nous utilisons deux masques supplémentaires, l'un pour la métallisation du plot de contact, l'autre pour l'ouverture du nitrure durant l'étape de passivation juste avant la planarisation par HSQ (masque appelé planarisation).



I.5.2.2. Opération technologiques détaillées

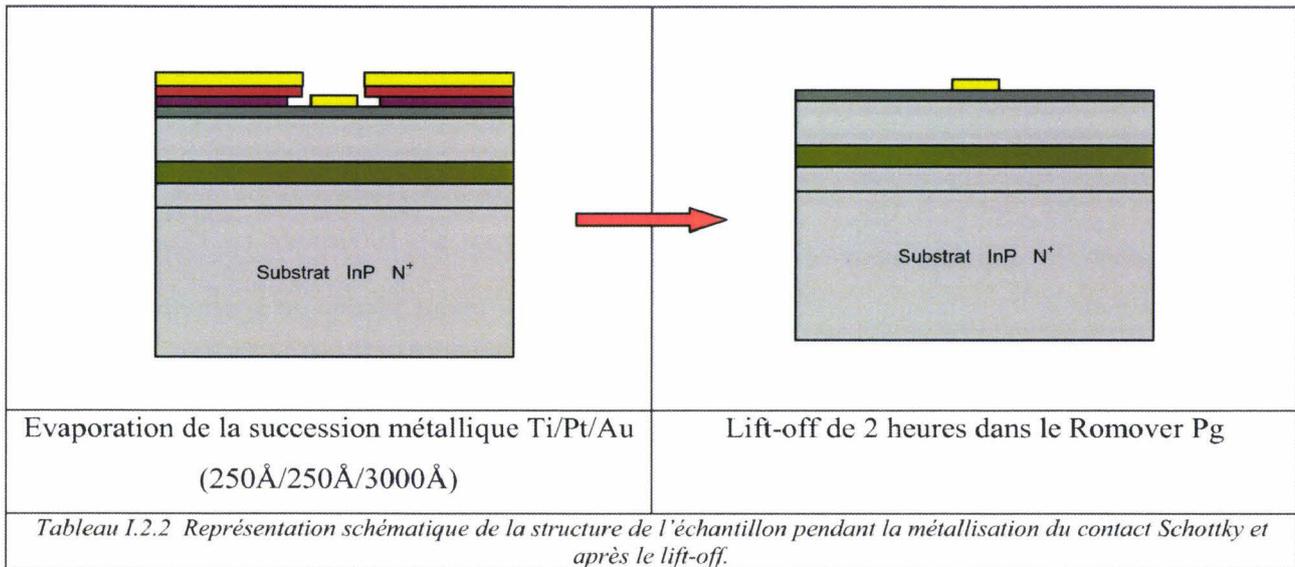
Les différentes opérations technologiques sont présentées de façons détaillées dans les tableaux ci-dessous.

Comme pour les dispositifs à base de quaternaire 1,18μm, à gauche nous donnons les opérations technologiques, à droite une représentation schématique de l'échantillon traité à l'issue de l'ensemble des opérations correspondant à un encadré.

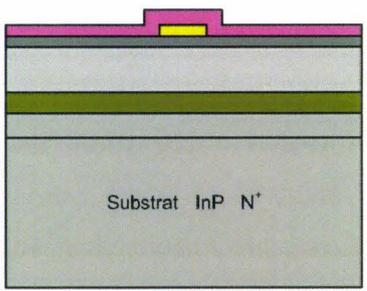
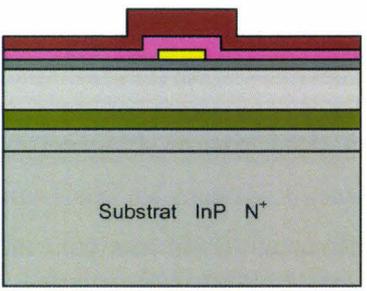
<p>1. Nettoyage du substrat à l'acétone et à l'alcool.</p> <p>2. Déshydratation du substrat sur plaque pendant 10min à 200°C.</p> <p>3. Enduction de EL 13%</p> <p>$v = 2900\text{rpm}$, $a = 1000\text{rpm/s}$, $t = 12\text{sec}$.</p> <p>4. Recuit sur plaque chauffante pendant 1mn à 80°C, 10min à 180°C; laisser refroidir à 20°C pendant 2min.</p> <p>L'épaisseur de EL13% déposée est de 668nm</p>	
<p>5. Enduction de PMMA 3% $v = 3400\text{rpm}$, $a = 1000\text{rpm/s}$, $t = 12\text{s}$.</p> <p>6. Recuit sur plaque chauffante pendant 1mn à 80°C, 10min à 180°C ; laisser refroidir à 20°C pendant 2min</p> <p>L'épaisseur de PMMA 3% déposée est de 63nm.</p>	
<p>7. Lithographie électronique tension = 50kV, dose = 180μC/cm²</p> <p>8. Développement avec la solution : 1/3 MIBK, 2/3 IPA agitée pendant 2min à 150tr/min, puis avec le substrat pendant 60sec à 100tr/min.</p> <p>9. Rinçage pendant 30sec avec l'alcool isopropylique " IPA".</p>	
<p><i>Tableau I.2.1. Description du procédé lithographique du profil en casquette avant le dépôt du contact Schottky</i></p>	

Après la révélation, nous avons fait des mesures de l'épaisseur du bicouche qui permettent de vérifier que l'épaisseur désirée (7200Å) est atteinte.

Les métaux sont ensuite évaporés sous vide sur ce substrat révélé. La succession des métaux est Titane/Platine/Or suivant les épaisseurs respectives 250Å/250Å/3000Å. On continue cette étape par un lift-off en plongeant le substrat dans un bain de Remover Pg à 80°C pendant 2 heures (tableau I.2.2).

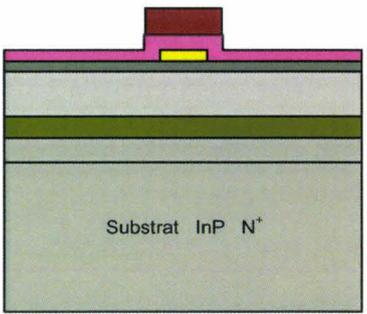


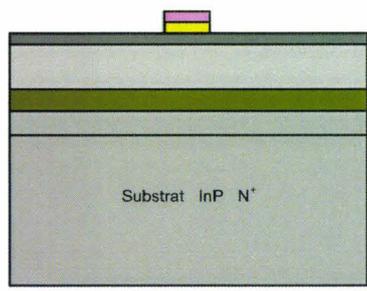
La gravure RIE (CH₄/H₂) nous permet d'effectuer une gravure homogène, peu rugueuse et d'éviter les problèmes de sous-gravure. Pendant la gravure de 1,2 µm d'InP, nous avons besoin d'une résine qui résiste et qui protège bien le premier niveau (les électrodes) qui pourrait être dégradé pendant cette longue gravure ; mais cette résine n'existe pas dans notre laboratoire. Nous avons donc utilisé une couche de nitrure d'une épaisseur suffisante (2000Å) pour bien protéger les électrodes pendant la gravure, en reportant le masque de résine sur le nitrure. En revanche, le choix d'une écriture électronique nous oblige à utiliser une résine électronique négative SAL 601 afin d'éviter une écriture lente, ce qui est le cas d'une résine positive ; ensuite cette résine sera inversée par un recuit post-écriture. Le tableau I.2.3 nous donne le procédé technologique suivi.

	
<p>1. Dépôt de 2000Å de Nitrure par PECVD à une température de 260°C</p> <p>2. Recuit en pleine plaque à une température de 200°C pendant 5 minutes pour évaporer les solvants résiduels.</p>	<p>3. Dépôt du promoteur d'adhérence HMDS : $v = 3000\text{rpm}$, $a = 1000\text{rpm/s}$, $t = 20\text{sec}$</p> <p>4. Enduction de résine électronique SAL 601 ; $v = 2000\text{rpm}$, $a = 1000\text{rpm/s}$, $t = 15\text{sec}$</p> <p>5. Recuit pleine plaque de 3 minutes à 105°C pour évaporer les solvants résiduels</p>
<p><i>Tableau I.2.3. Procédé du dépôt de nitrure et de la résine</i></p>	

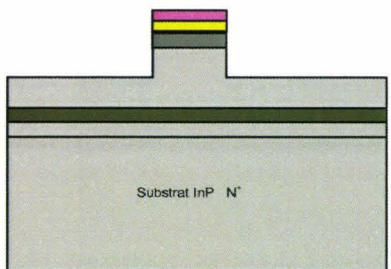
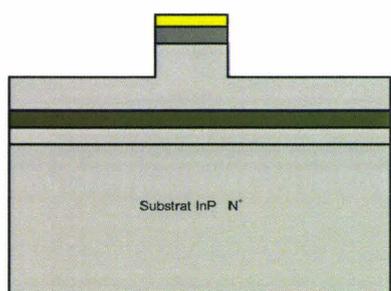
Après cette étape, le substrat est soumis à une écriture électronique pour définir les guides optiques, ensuite la résine est révélée avec le développeur MF 322.

Une fois le développement fait, un transfert du masque de résine sur le nitrure est réalisé par une gravure RIE (CHF_3/CF_4), qui sera suivi par un plasma O_2 afin d'enlever la couche de résine SAL 601 restante. Voici une présentation détaillée de ces deux étapes (tableau I.2.4).

<p>6. Ecriture électronique : tension = 50kV, dose = $4\mu\text{C}/\text{cm}^2$.</p> <p>7. Inversion du masque par un recuit post-écriture pleine plaque à 105°C pendant 3min.</p> <p>8. Développement pendant 10 minutes dans 2 bains de MF 322.</p> <p>Rinçage à l'EDI pendant 30 secondes.</p>	
--	--

<p>9. Gravure du nitrure par plasma (CHF_3/CF_4) ; débits respectifs (20/20)sccm pendant 2min30s sous pression=50mT, puissance=180W, tension=337V</p> <p>10. Nettoyage du masque de résine par plasma O_2, 30sccm, 100mT, 100W, 320V pendant 5 minutes.</p>	 <p>Substrat InP N⁺</p>
<p align="center"><i>Tableau I.2.4. Procédé du transfert de masque de résine sur le nitrure.</i></p>	

La dernière étape concerne la définition des guides passifs et actifs par une gravure RIE CH_4/H_2 de $1.1\mu\text{m}$ d'InP qui sera arrêtée par suivi interférométrique, Nous devons ensuite nettoyer le substrat en éliminant la couche de nitrure restante par plasma CHF_3/CF_4 (tableau I.2.5).

 <p>Substrat InP N⁺</p>	 <p>Substrat InP N⁺</p>
<p>11. Gravure RIE d'InP, débits respectifs de (CH_4/H_2) : (20/80)sccm, pression = 30mT, puissance = 150W, tension = 35V.</p> <p>12. Plasma $\text{O}_2/100$ sccm, pression = 90mT, puissance = 100W, tension = 320V.</p> <p>Pompage jusqu'à la pression de base.</p>	<p>13. Gravure du nitrure par plasma (CHF_3/CF_4), débit respectifs (20/20) pendant 2min minutes sous pression = 50mT, puissance = 180W, tension = 337V.</p>
<p align="center"><i>Tableau I.2.5. Procédé de gravure RIE de l'InP, et du nettoyage du nitrure</i></p>	

Un passage au Microscope Electronique à Balayage (MEB) a été nécessaire pour contrôler l'état de gravure ainsi que l'épaisseur de gravure. Voici une photographie prise au microscope électronique à balayage (figure I.11) de la plaque traitée à l'issue de l'ensemble de ces opérations technologiques.

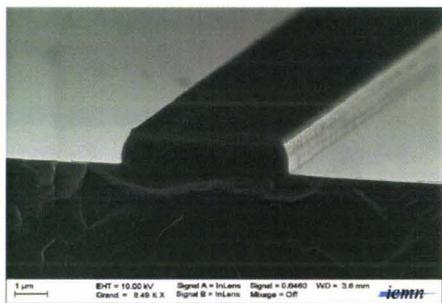
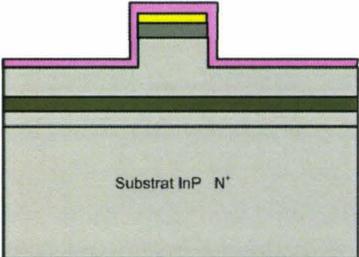
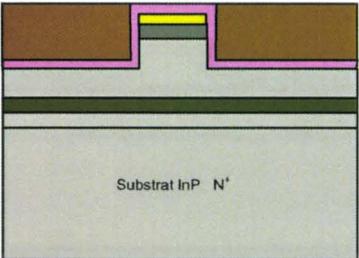
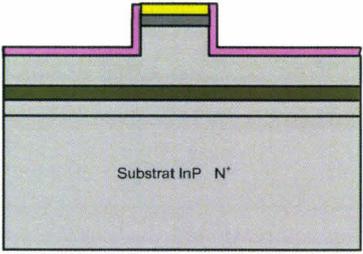
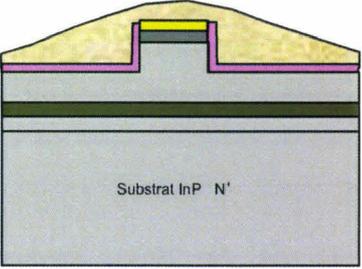


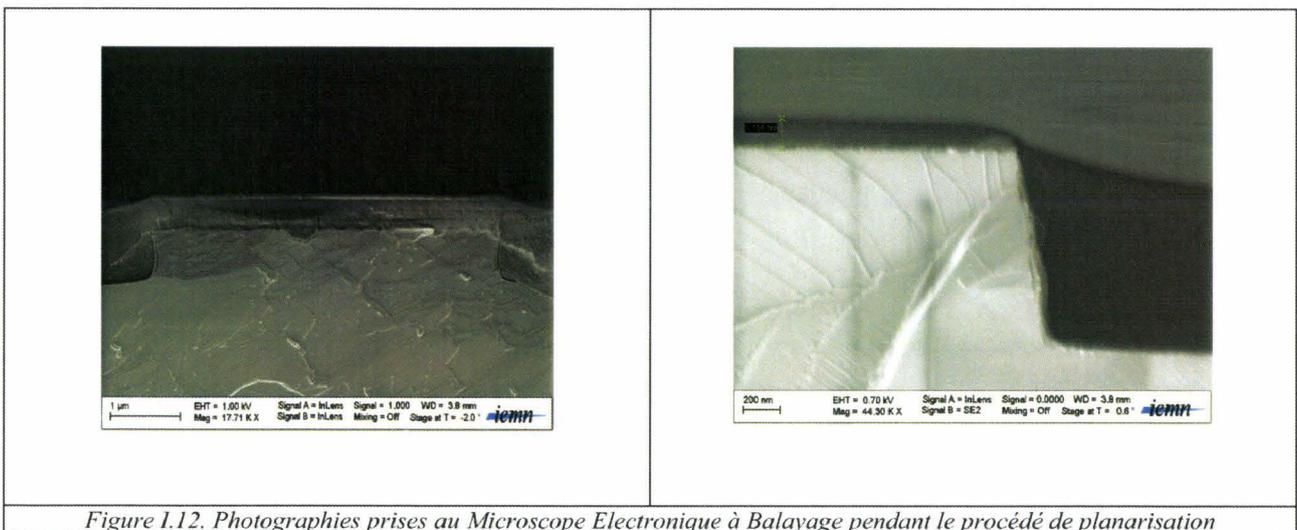
Figure I.11 Photographie prise au Microscope Electronique à Balayage d'un guide droit à la fin de la gravure RIE .

Rappelons que les dispositifs actifs à base de quaternaire 1,3μm se font en deux étapes. La première étape est de passiver par un dépôt d'une fine couche de nitrure suivi par un recuit flash (tableau I.2.6) et la deuxième étape est la planarisation par un dépôt de la HSQ (tableau I.2.7).

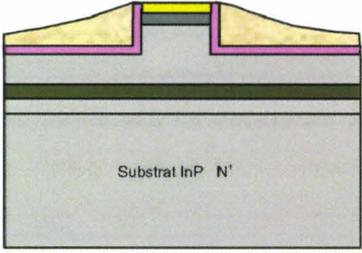
	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Dépôt 80 nm de nitrure à une température de 260°C par PECVD. 2. Recuit en pleine plaque à une température 200°C pendant 5 minutes pour évaporer les solvants résiduels. 	<ol style="list-style-type: none"> 3. Enduction de résine électronique EL13% v : 3400 rpm, a : 1000 rpm/s, t : 12s 4. Recuit en pleine plaque à 80°C pendant 1min ensuite à 180°C pendant 10min 5. Ecriture électronique tension : 50kV, dose : 180μC/cm² 6. Développement avec la solution : 1/3 MIBK, 2/3 IPA, agitée pendant 2min à 150tr/min, puis avec le substrat pendant 60sec à 100tr/min. 7. Rinçage pendant 30sec avec l'alcool isopropylique " IPA".
<p>Tableau I.2.6. Procédé de dépôt du nitrure pour la planarisation</p>	

	
<p>8. Gravure du nitrure au niveau de l'ouverture par plasma CHF₃/CF₄, débit respectifs 20/20sccm pendant 2min minutes sous pression = 50mTorr, puissance = 180W, tension = 337V.</p> <p>9. Retrait des résidus de résine par plasma O₂, débit 30sccm pendant 5min sous pression = 100mTorr, puissance 100W.</p> <p>10. Recuit flash à une température 400°C pendant 30s</p>	<p>11. Dépôt du promoteur d'adhérence HMDS : v = 3000rpm, a = 1000rpm/s, t = 20sec</p> <p>12. Dépôt HSQ : v = 1000rpm, a = 1000rpm², t = 30s</p> <p>13. Recuit en pleine plaque à une température 120°C pendant 10 minutes</p> <p>14. Densification par plasma O₂ débits 50sccm, tension : 290W, pression : 100mTorr</p>
<p>Tableau I.2.7 Procédé de planarisation par HSQ</p>	

La figure I.12 présente des photographies prises au Microscope Electronique à Balayage lors de la planarisation par la HSQ.



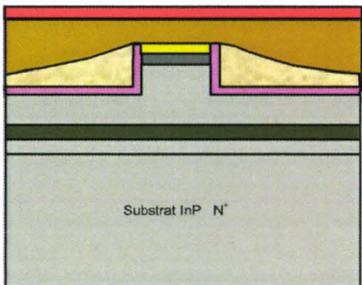
On grave la HSQ par une gravure RIE. Les gaz que nous avons utilisés sont le CF_4 et le CHF_3 . C'est l'étape la plus critique dans la réalisation, car nous n'avons aucune idée de la vitesse de gravure de la HSQ. De plus, le contrôle interférométrique par laser est inapproprié car le diamètre de spot du laser est beaucoup plus grand que les dimensions du masque d'ouverture. Pour ce faire, nous avons été obligés de contrôler chaque fois au Microscope Electronique à Balayage (tableau I.2.8).

<p>14. Ouverture de la HSQ au-dessus des électrodes de guides droits métallisés par RIE CHF_3/CF_4, débit respectifs 20/20sccm sous pression = 50 mTorr, puissance = 180W. La vitesse de gravure est de 24nm/min</p>	
<p>Tableau I.2.8. Procédé de gravure de la HSQ pour la planarisation</p>	

L'étape finale du traitement de la face avant est le dépôt du report de l'électrode. La dimension de ces plots doit être suffisante pour que l'on puisse positionner facilement les pointes permettant la caractérisation.

Comme précédemment (dépôts des électrodes), nous avons besoin d'un profil en casquette. Pour réaliser ce profil, nous utilisons le procédé du bicouche ARP et PMMA 3% ; l'épaisseur est de l'ordre $3\mu m$; ces résines électroniques seront exposées au masqueur électronique. Après révélation, nous effectuons un dépôt d'une couche d'accrochage en titane qui assure une bonne adhérence sur la HSQ suivi d'un dépôt d'une couche d'or de 600nm d'épaisseur. Nous terminons avec un lift-off à base de Remover Pg.

Le tableau I.2.9 rassemble les étapes de réalisation de ces plots de contact.

<ol style="list-style-type: none"> 1. Enduction de ARP : $v = 1500rpm$, $a = 1000rpm/s$, $t = 15s$. 2. Recuit sur plaque chauffante pendant 1min à $80^\circ C$, 10min à $180^\circ C$ 3. Enduction de PMMA 3% $v = 3400rpm$, $a = 1000rpm/s$, $t = 12s$ 4. Recuit sur plaque chauffante pendant 1min à $80^\circ C$ ensuite 10min à $180^\circ C$ <p>L'épaisseur de ARP déposée est $2\mu m$, tandis que l'épaisseur de PMMA 3% est 630\AA</p>	
--	--

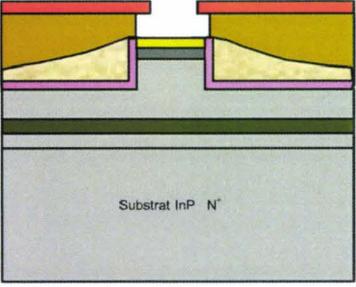
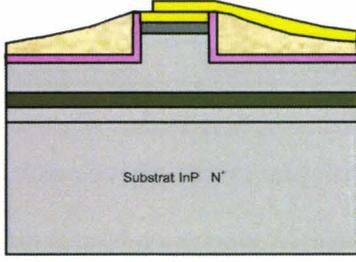
<p>5. Lithographie électronique : tension = 50kV, dose = 180 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$.</p> <p>6. Développement avec la solution : 1/3MIBK, 2/3IPA agitée pendant 2 min à 150tr/min, puis avec le substrat pendant 2min à 100tr/min.</p> <p>7. Rinçage pendant 30 secondes avec l'alcool isopropylique "IPA".</p>	
<p>8. Evaporation par pulvérisation de la couche métallique de Ti/Au : 1000Å/6000Å.</p> <p>9. Lift-off de 2h dans une solution Remover Pg.</p>	

Tableau I.2.9. Procédé de dépôt des plots de contact.

Deux photographies prises l'une, au microscope optique et l'autre au microscope électronique à balayage, sont présentées ci-dessous, (figure I.13a et figure I.13b).

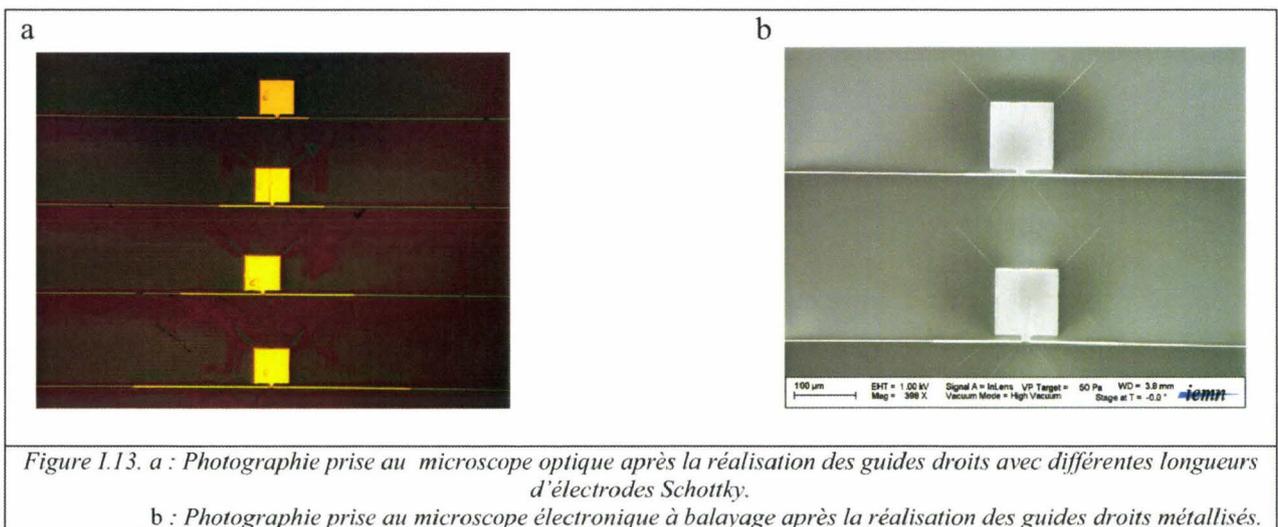
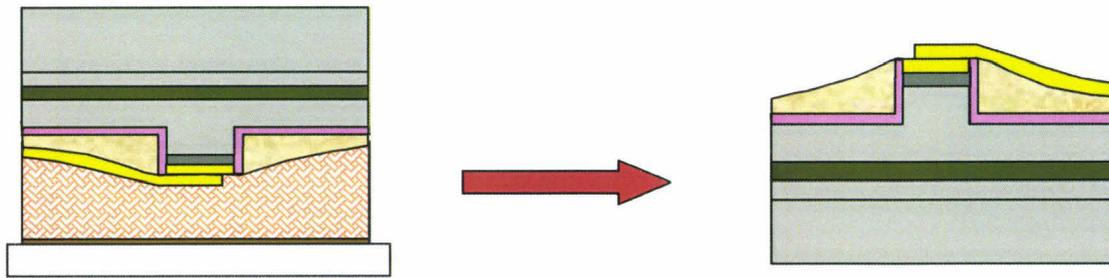


Figure I.13. a : Photographie prise au microscope optique après la réalisation des guides droits avec différentes longueurs d'électrodes Schottky.

b : Photographie prise au microscope électronique à balayage après la réalisation des guides droits métallisés.

Nous passons ensuite à l'amincissement du substrat. Le procédé utilisé au cours de cette étape est le même que celui utilisé précédemment pour les guides d'onde à base de quaternaire $1.18\mu\text{m}$. Nous renvoyons donc le lecteur au paragraphe I.4.1.5 « Amincissement », pour prendre connaissance des détails relatifs à cette opération (tableau I.2.10).



1. Enduction de AZ4562 $v = 2000\text{rpm}$, $a = 1000\text{rpm/s}$, $t = 40\text{s}$.
2. Recuit sur plaque chauffante pendant 3min à 110°C , l'épaisseur de résine déposée est de 6000Å .
3. Chauffage du support en verre à 80°C et étalement d'une noisette de cire (OCN-199).
4. Collage dans une machine (LOGITECH) de collage pour assurer la planéité nécessaire.
5. Amincissement avec de l'alumine de grains $15\mu\text{m}$ pendant 10min et de l'alumine de grains $3\mu\text{m}$ pendant 5min, avec une vitesse de rotation du plateau de 25rpm .
6. Polissage pendant 3min sous pression maximale et avec la vitesse de rotation maximale 70rpm .

Décollage par dissolution de la cire dans une solution « *Non Solvent Cleaning Fluid* », puis le substrat est plongé dans une solution d'acétone pour dissoudre la couche de résine.

Tableau I.2.10. Procédé d'amincissement

La dernière étape de la réalisation du composant concerne la métallisation face arrière qui permet de prendre le contact de type N^+ sur le substrat. Cette étape est très délicate parce que nous manipulons un substrat aminci à $130\mu\text{m}$, et donc le risque de le casser est important.

Nous déposons tout d'abord une couche de résine épaisse AZ4562 pour protéger la face avant du substrat. Nous procédons ensuite à la métallisation de la face arrière par pulvérisation d'une couche d'accrochage en titane suivie d'une couche d'or beaucoup plus épaisse. La résine protectrice déposée sur le substrat est nettoyée avec un bain d'acétone. L'échantillon est récupéré avec beaucoup de précautions pour éviter qu'il ne casse (tableau I.2.11).

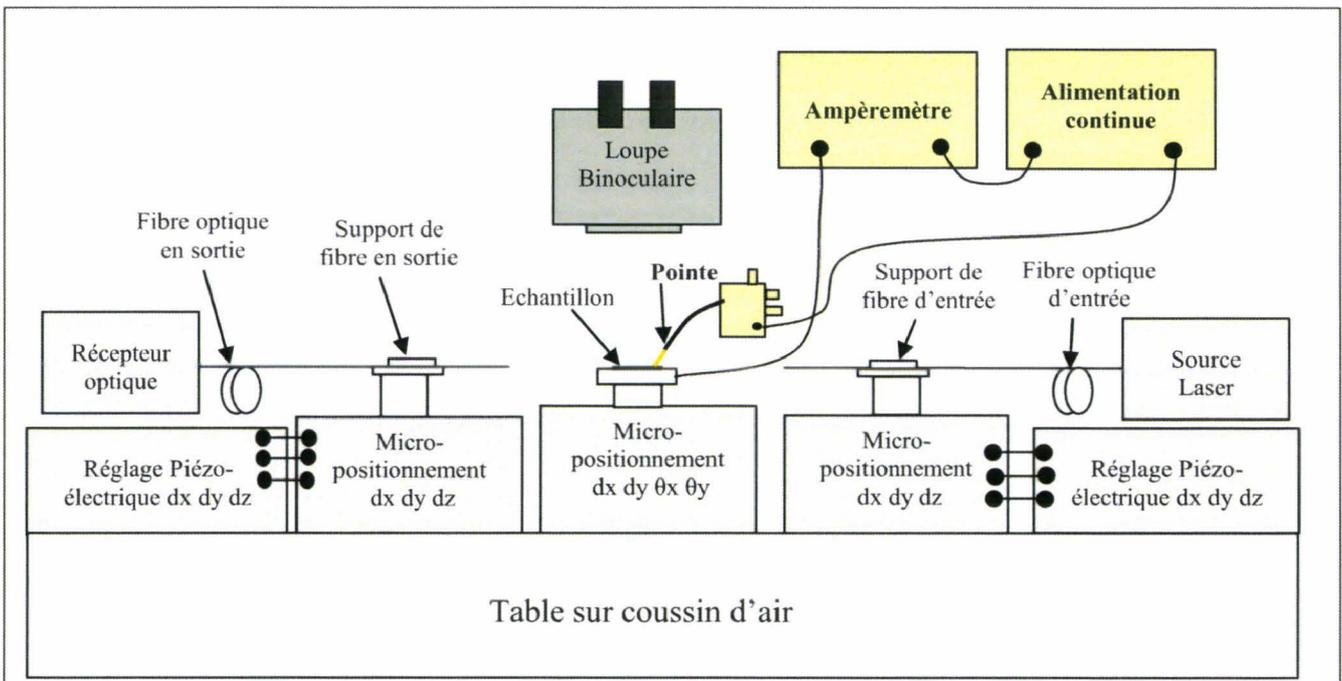
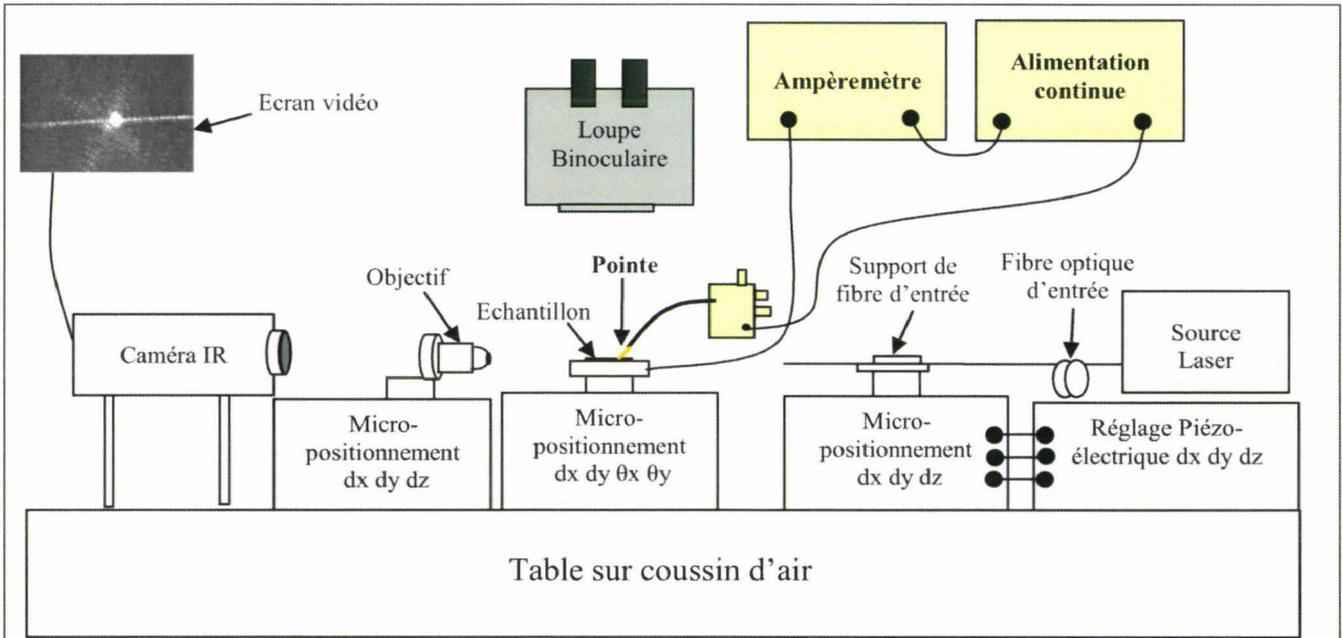
<ol style="list-style-type: none"> 1. Enduction de AZ6245 $v = 2000\text{rpm}$ a = 1000rpm/s, $t = 40\text{s}$ 2. Recuit sur plaque chauffante pendant 3min à 110°C, l'épaisseur de résine déposée est 6000Å. 3. Dépôt par pulvérisation face arrière Ti/Au $100\text{Å}/500\text{Å}$. 	
<i>Tableau I.2.11. procédé de métallisation face arrière</i>	

I.6. Etude expérimentale des dispositifs réalisés

I.6.1. Banc de caractérisation

Le banc de caractérisation est celui déjà utilisé pour d'autres travaux de thèse [23]. Rappelons brièvement qu'il permet des mesures en champ lointain en sortie de nos dispositifs guide d'onde et des mesures fibre à fibre sur ces mêmes dispositifs. Le cœur du banc est constitué d'un ensemble de micro-positionnements permettant le déplacement dans les trois directions de l'espace ainsi que des déplacements angulaires de l'échantillon à analyser. Ces déplacements sont pilotés de façon mécanique et par réglage piézo-électrique. Une source optique adéquate émettant à la longueur d'onde $1.55\mu\text{m}$ (EXFO FLS 2600) ou à la longueur d'onde $1,3\mu\text{m}$ (Tunics-Xs) est utilisée. Elle est munie d'une fibre optique monomode, et toutes nos mesures sont effectuées au travers d'un contrôleur de polarisation (GEC- identity y-35-5276-01) avant injection optique dans nos composants. Cette fibre d'entrée est montée sur un système de micro-positionnement de façon à parfaire l'alignement de la fibre avec la structure guidante du composant photonique. La fibre d'entrée est lentillée (le diamètre de la tâche lumineuse au point de focalisation est d'environ $4,5\mu\text{m}$). En sortie du composant, pour les mesures en champ lointain, nous disposons d'un objectif de microscope de grandissement 40 pour un écart entre guides d'entrée de $250\mu\text{m}$. Ce champ lointain est visualisé à l'aide d'une caméra infrarouge (HAMAMATSU camera head, model C2741) connectée à un système vidéo par l'intermédiaire d'une interface appropriée. Pour les mesures fibre à fibre, le signal optique en sortie est récupéré à l'aide d'une fibre monomode clivée montée sur un système de micro-positionnement. Cette fibre monomode est connectée à un récepteur optique (HP 8153A, power sensor 800-1700nm) permettant de mesurer la puissance optique récupérée par cette fibre. Ce banc est utilisé pour la caractérisation des guides passifs. Pour les guides actifs, nous avons adjoint un système permettant l'injection d'un courant ; il concerne un support d'échantillon doré connecté à un ampèremètre (ITT MX579 Metrix) qui est relié à la masse de l'alimentation continue (TTI power supply). L'injection du courant se fait par une pointe amovible.

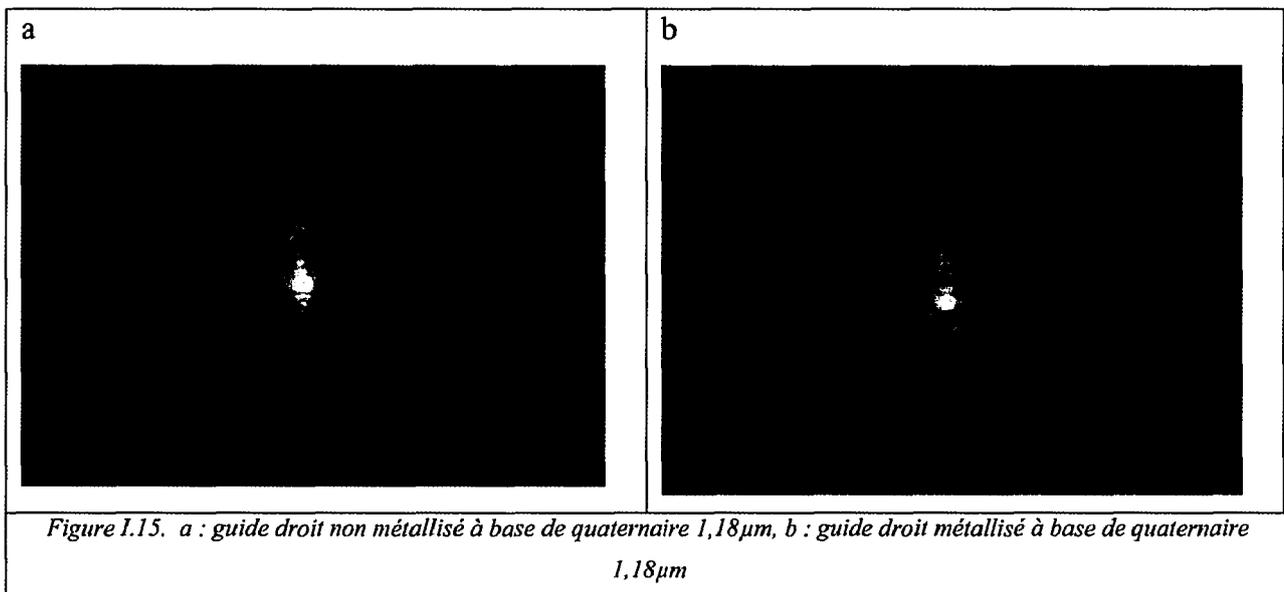
Nous donnons figure I.14.a et figure I.14.b une vue schématique de ce banc de mesure dans les configurations « champ lointain » et « fibre à fibre » respectivement.



I.6.2. Etude des guides droits

Nous reportons ici l'étude des pertes de couplage et de propagation dans des guides passifs non métallisés et métallisés par un contact Schottky. Le but est d'évaluer ici les pertes de propagation dues à la structure épitaxiale et à la gravure des guides en arête, puis d'évaluer les pertes supplémentaires dues à la métallisation du contact Schottky. Ces éléments sont des informations utiles dans l'hypothèse d'une utilisation pour la réalisation d'un composant photonique ; les pertes de couplage sont également une donnée fondamentale pour des applications ultérieures.

Nous montrons tout d'abord, figure I.15, les photographies prises en champ lointain de l'intensité du signal optique en sortie d'un guide droit à cœur en quaternaire 1,18 μm métallisé et non métallisé. On peut noter qu'il n'y a aucune différence majeure entre le guide métallisé et le guide non métallisé.

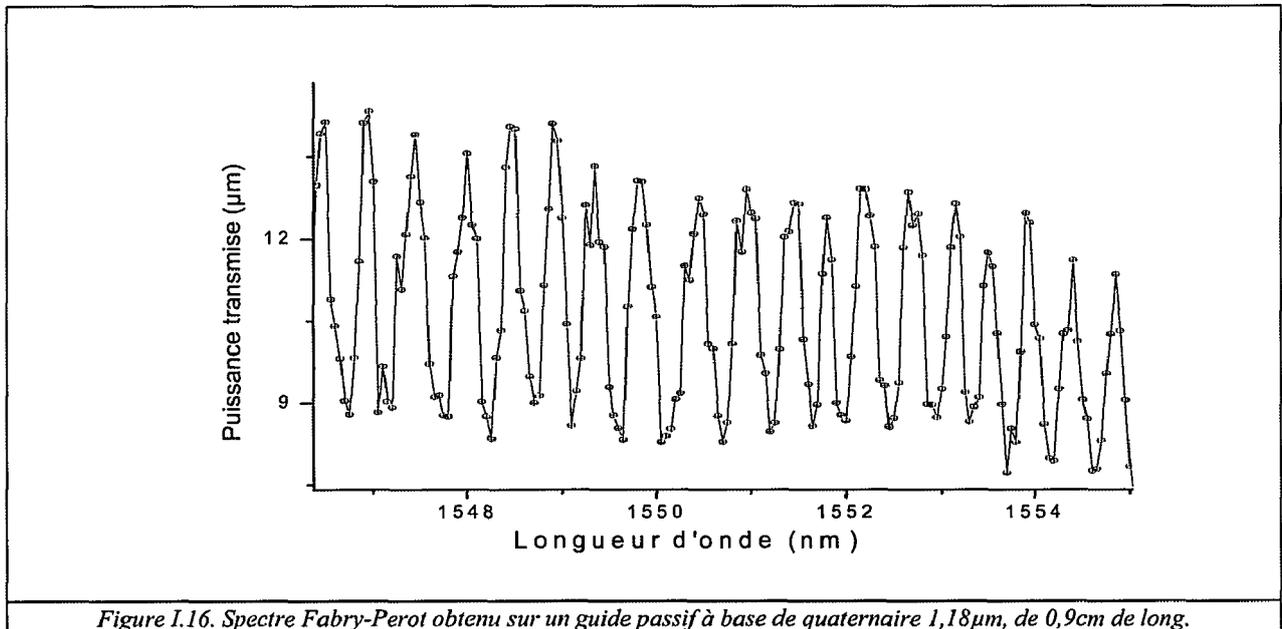


Nous avons ensuite caractérisé ces guides droits en termes de pertes optiques. Nous avons commencé par les pertes de propagation d'un guide droit à base de quaternaire 1,18 μm non métallisé en utilisant la technique du Fabry-Perot [24-25]. Nous donnons les interférences Fabry-Perot d'un guide de longueur 0,9cm (figure I.16). L'expérience a été menée autour de 1,55 μm pour une puissance optique d'entrée d'environ 1mW. Les pertes de propagation dans les guides ont été déterminées en utilisant la relation

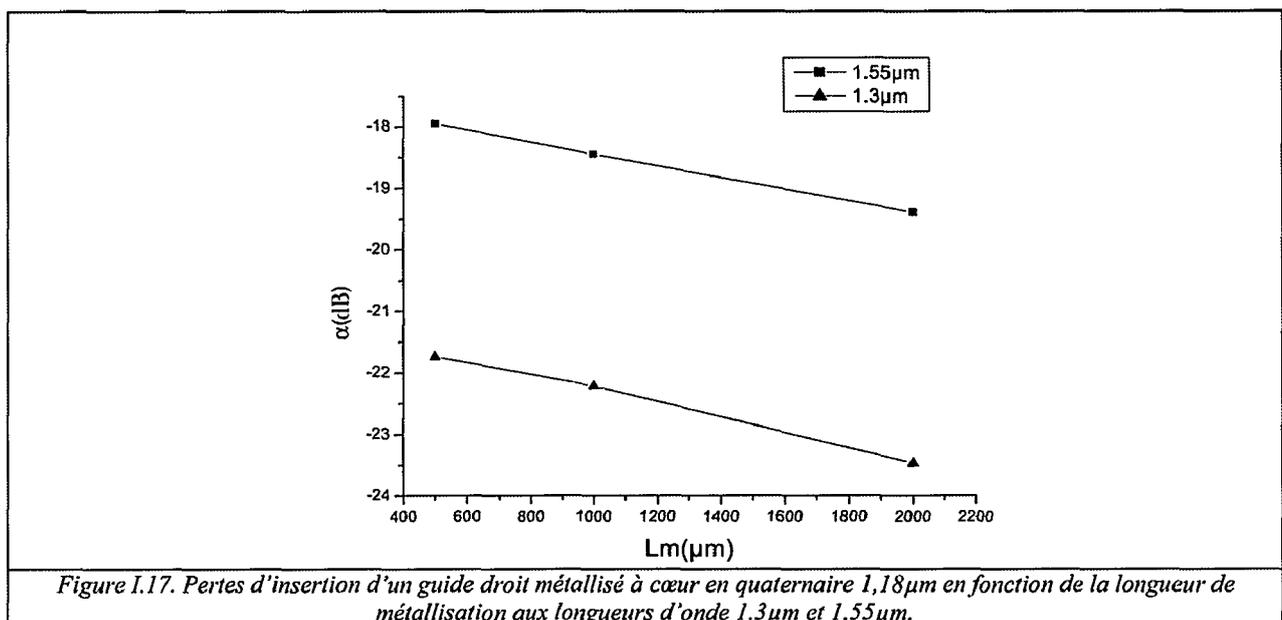
$$[25] : \alpha_p = -\frac{10}{L} \text{Log}_{10} \left[\frac{1}{R} \frac{\sqrt{C} - 1}{\sqrt{C} + 1} \right],$$

sachant que R est le coefficient de réflexion aux interfaces entre le guide et l'air ; ce dernier est donné par $R = (n_{\text{eff}} - 1)^2 / (n_{\text{eff}} + 1)^2$; C est le contraste de franges donné par $C = I_{\text{max}} / I_{\text{min}}$ où I_{max} et I_{min} correspondent respectivement à un maximum et à un minimum de la puissance de sortie.

Les pertes de propagations se situent aux environs de 4dB/cm pour un guide à cœur de quaternaire 1,18 μ m, et les pertes d'insertion de ce guide sont de l'ordre de 18dB. Les pertes de couplage totales sont donc de 14,4dB, soit environ 7dB par face, en supposant des pertes identiques pour chaque face, ce qui est discutable. La longueur d'onde de travail est de 1,55 μ m.



Nous avons ensuite caractérisé des guides métallisés dont le cœur est en quaternaire 1,18 μ m avec différentes longueurs de métal afin de déterminer les pertes de propagation supplémentaires dues à la métallisation. Pour cela, nous avons effectué des mesures de pertes d'insertion fibre à fibre pour trois longueurs de métallisation, respectivement 500 μ m, 1000 μ m et 2000 μ m (figure I.17), en conservant la puissance d'entrée constante. Ces expériences ont été effectuées aux longueurs d'onde 1,55 μ m et 1,3 μ m.



La pente de cette courbe conduit aux pertes dues à la métallisation. Cette technique nous permet d'estimer les pertes dues à la métallisation aux environs de 1dB/mm pour la longueur d'onde 1,55 μ m et 0,7dB/mm pour la longueur d'onde 1,3 μ m. L'écart entre les deux longueurs d'onde se justifie par un confinement plus fort de l'onde optique à la longueur d'onde 1,3 μ m.

I.6.2.1. Etude des guides droits actifs

Les expériences menées sur les guides actifs munis d'un contact Schottky ont pour but de mettre en évidence les variations d'indice consécutives à l'injection d'un courant électrique dans le guide à l'aide du contact Schottky. Pour ce faire, nous utilisons la cavité Perot-Fabry formée par le guide clivé avec ses deux faces de sortie jouant le rôle de miroirs de la cavité. Toute variation d'indice dans la cavité doit se traduire par une variation de la phase du signal optique dans la cavité, et par conséquent par une modification de l'intensité du signal optique en sortie de la cavité. Ces expériences sont tout à fait analogues à celle déjà présentées pour la caractérisation des guides passifs, mais cette fois la longueur d'onde du signal optique reste fixe et c'est l'indice optique dans la cavité que nous espérons modifier par l'injection d'un courant.

Les expériences sont effectuées sur deux types de structures :

- Des guides optiques pour lesquels le quaternaire de cœur a sa composition adaptée à la longueur d'onde 1,18 μ m. Rappelons que dans ce cas la métallisation du plot de contact est faite en même temps que l'électrode Schottky et que l'épaisseur de cette métallisation est de 300nm. Autrement dit, pour ces dispositifs, il n'y a pas eu de dépôt ultérieur d'un plot de contact épais. Les mesures ont été menées aux longueurs d'onde 1,3 μ m et 1,55 μ m.
- Des guides optiques pour lesquels le quaternaire de cœur a sa composition adaptée à la longueur d'onde 1,3 μ m. Dans ce deuxième cas un plot d'épaississement d'épaisseur de 0,7 μ m a été ajouté au contact Schottky, sachant que la métallisation Schottky est comme dans les dispositifs précédents de l'ordre de 0,3 μ m d'épaisseur. Cette fois-ci les expériences ont été menées à la longueur d'onde 1,55 μ m, puisqu'à la longueur d'onde 1,3 μ m le guide est absorbant.

I.6.2.1.1. Premiers dispositifs actifs à base de quaternaire 1,18 μ m

Nous avons mesuré la puissance de sortie d'un guide droit métallisé pour une longueur de métallisation de 1000 μ m, en fonction de la densité du courant injecté à la longueur d'onde 1,55 μ m et 1,3 μ m, en conservant la puissance d'entrée constante (figure I.18).

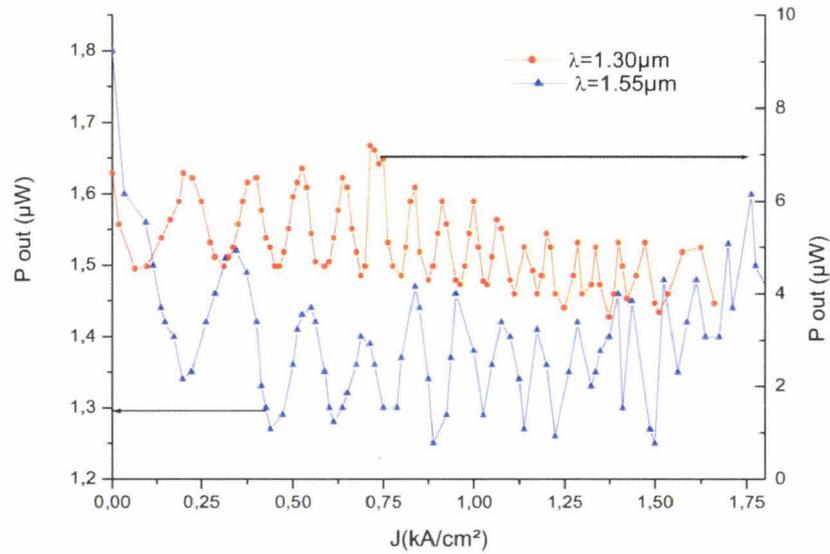


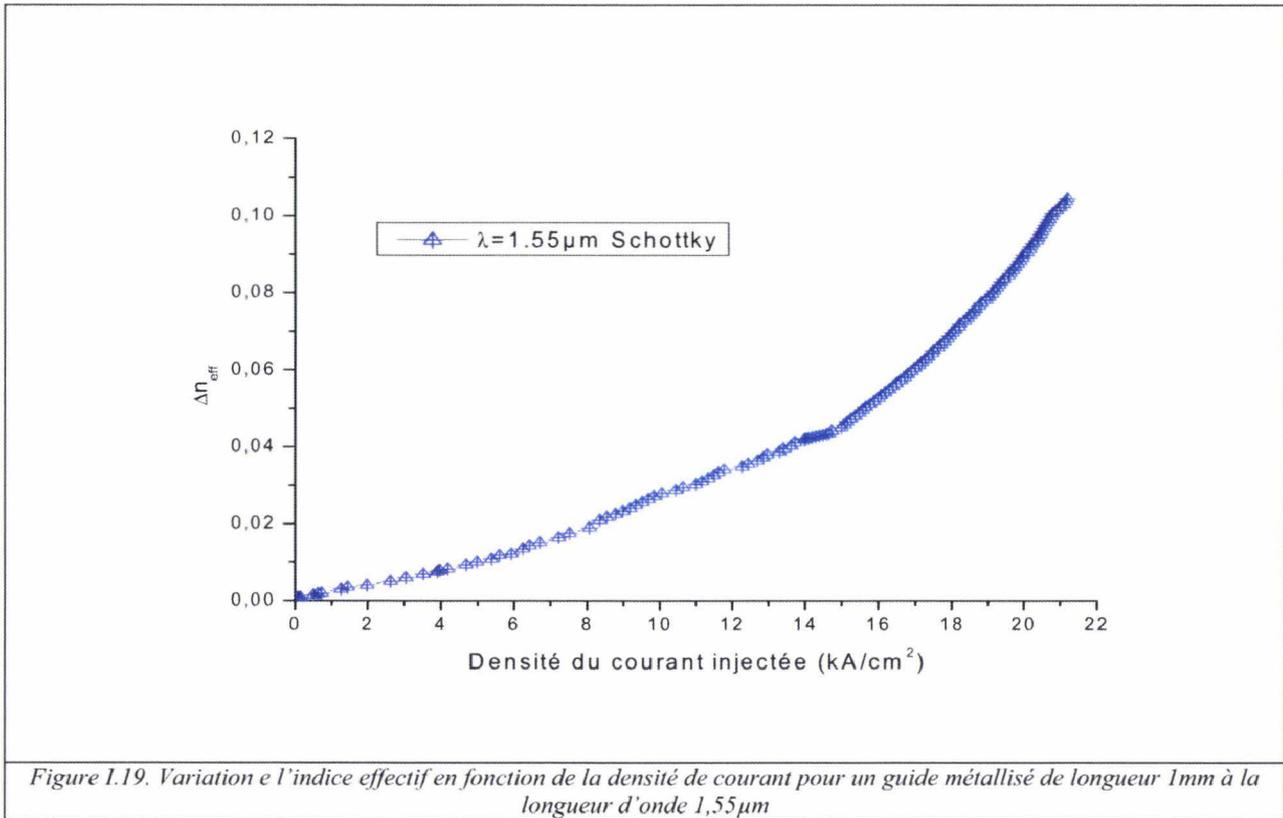
Figure I.18. Puissance en sortie des guides droits métallisés à base de quaternaire 1,18 en fonction de la densité du courant injecté pour une longueur de métallisation 1mm à la longueur d'onde 1,55μm et 1,3μm. L'électrode à une longueur de 1000μm

On observe tout d'abord que la puissance de sortie adopte un comportement oscillatoire au fur et à mesure que la densité du courant injecté augmente. Ce comportement oscillatoire traduit l'existence des interférences constructives et destructives dans la cavité Fabry-Perot formée par le guide avec ses faces clivées d'entrée et de sortie, interférences liées aux variations de l'indice de réfraction dans la partie active à contact Schottky. Il est possible, à l'aide de cette expérience, de déterminer la variation de l'indice effectif en fonction du courant injecté. En effet, entre chaque minimum ou maximum, la phase optique a varié de 2π , cette variation de phase est donnée par:

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi \cdot 2L \cdot \Delta n_{eff}}{\lambda}$$

où L est la longueur de la métallisation, λ la longueur d'onde du signal optique de travail, et Δn_{eff} la variation d'indice effectif entre 2 maximums ou 2 minimums successifs.

Il en résulte que la variation d'indice effectif entre deux maximums et deux minimums successifs vaut $\lambda/2L$ [26]. Nous avons ainsi tracé la variation d'indice effectif Δn_{eff} en fonction de la densité de courant injecté pour la longueur d'onde 1,55μm (Figure I.19).



Cette variation peut être très importants ; elle atteint plus de 0,1 pour des densités de courant légèrement supérieures à 20KA/cm^2 [27], ce qui est exceptionnel. La courbe obtenue est non linéaire, et fait penser à une loi en puissance du courant. Pour comprendre ces variations d'indice tout à fait hors du commun, nous avons repris nos expériences Perot-Fabry, en modifiant non seulement le courant injecté, mais aussi la longueur d'onde du signal optique. Nous avons ainsi constaté que la variation d'indice est positive, autrement dit l'injection d'un courant s'accompagne d'un accroissement de l'indice du matériau. Ce résultat est contradictoire avec une variation d'indice par effet de porteurs libres qui s'accompagne, pour l'effet plasma qui est dominant, par une diminution de l'indice optique quand le courant augmente. On note par ailleurs sur la figure I.18, que la puissance optique moyenne reste stable au fur à mesure de l'injection du courant ce qui implique aucun accroissement des pertes qui devrait exister lors de l'injection de porteurs libres. Ces variations d'indice positives quand le courant augmente font penser à une modification par effet thermique. Pour confirmer cette hypothèse, nous avons tracé la variation d'indice effectif en fonction de la puissance électrique appliquée au composant lorsqu'on injecte le courant électrique. Les résultats sont présentés figure I.20.

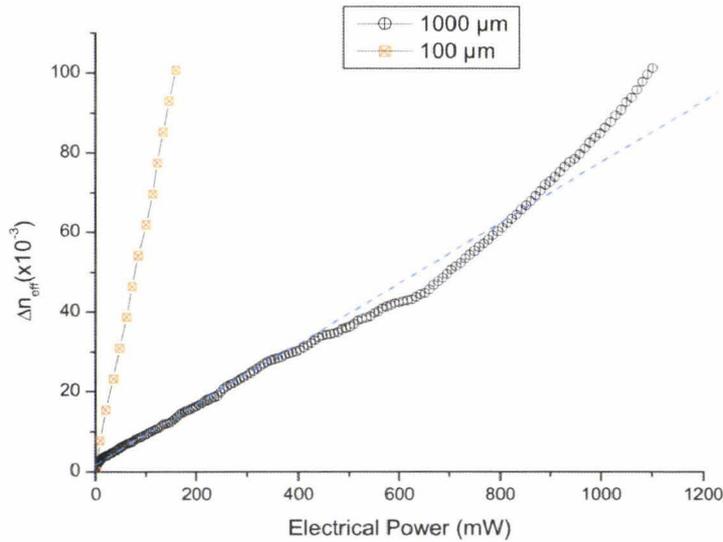
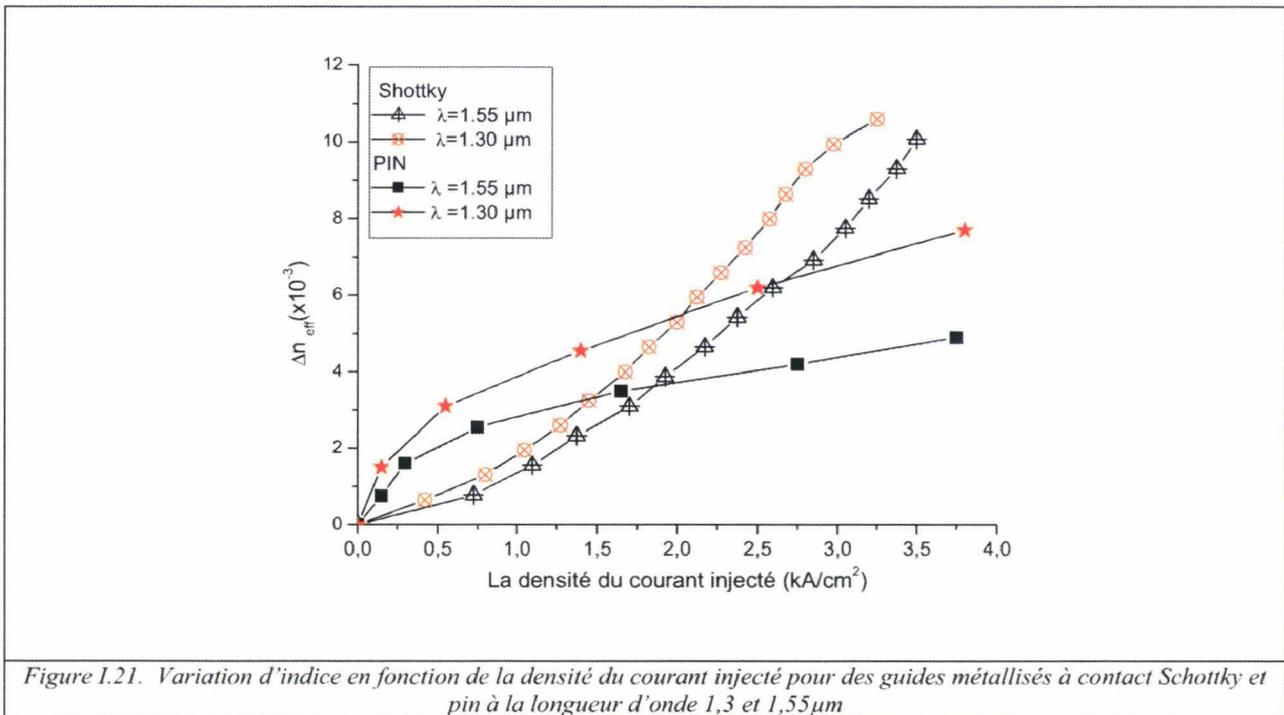


Figure 1.20. Variation d'indice effectif en fonction de la puissance électrique consommée pour des guides métallisés de longueurs d'électrode 1mm et 100μm à la longueur d'onde 1,55μm

Ces expériences ont été menées pour deux longueurs d'électrodes, l'une de 1mm et l'autre de 100μm ; dans chacun des cas la variation d'indice avec la puissance électrique est quasiment linéaire. Ce résultat semble compatible avec une interprétation de la variation d'indice par effet thermique. Pour quantifier les variations d'indice par effet thermique, nous allons supposer que l'élévation de température du guide optique à contact Schottky peut se calculer en introduisant la résistance thermique R_{th} équivalente du dispositif en utilisant la relation classique $\Delta T = R_{th}P_e$ ou ΔT représente l'élévation de la température du dispositif consécutive à la puissance électrique P_e appliquée. La variation d'indice optique due à la température pour l'InP est connue ; elle vaut $\frac{dn}{dT} = 2.10^{-4} K^{-1}$ [28]. Dans ce cas la variation d'indice pour une puissance électrique appliquée P_e s'exprimera donc sous la forme d'une loi linéaire $\Delta n = \frac{dn}{dT} R_{th}P_e$, en accord avec nos résultats expérimentaux. Pour comparer avec l'expérience, il convient d'évaluer R_{th} , ce que nous avons fait par un modèle simple de barreau d'InP dont les dimensions sont celles de la puce fabriquée (5μm x 1mm x 125μm) et (5μm x 100μm x 125μm) et dont la conductivité thermique est celle de l'InP ($\sigma_{th} = 0,7W/cm.K$) [29]. Nous trouvons ainsi $R_{th} = 360^\circ/W$ pour le contact Schottky de longueur 1mm et $3600^\circ/W$ pour le contact Schottky de longueur 100μm. Ces résultats sont tout à fait comparables à ceux issus de nos expériences et vont dans le sens de l'interprétation par effet thermique, puisque la pente des droites $\Delta n (P_e)$ conduit à $R_{th} = 420^\circ/W$ pour l'électrode Schottky de 1mm et $4200^\circ/W$ pour l'électrode Schottky de 100μm. On outre, nous avons constaté au cours de nos expériences sur les dispositifs à contact Schottky d'1mm, qu'au-delà d'une puissance électrique d'un peu plus d'un watt, l'échantillon était détruit. Selon nos estimations, la température du dispositif atteindrait alors environ 420°C ce qui correspond à une limite maximale supportée par le matériau et la technologie. Là encore l'effet thermique se confirme.

Sans vouloir reprendre en détail les résultats de l'étude développée par Malek Zegaoui [3], dans sa thèse, sur l'étude des effets de variation d'indice par porteurs libres dans des guides d'ondes $Q_{1,18}$ actifs en structure PIN, nous comparons figure I.21, pour les deux longueurs d'onde $1,3\mu\text{m}$ et $1,55\mu\text{m}$, les variations d'indice obtenues par injection d'un courant dans une structure à contact Schottky et dans la structure de type PIN. Les comportements sont complètement différents. Si, pour une structure à contact Schottky, on constate une augmentation constante de la variation d'indice avec un courant injecté, et ceci quelle que soit la longueur d'onde de travail, on constate pour la structure PIN (également à quaternaire de cœur $1,18\mu\text{m}$) une tendance à la saturation de la variation d'indice à des valeurs avoisinantes quelques $5 \cdot 10^{-3}$, dès lors que la densité de courant injecté augmente sensiblement.



Ce mécanisme a souvent été interprété en termes de variation de la durée de vie des paires électron-trous

qui est en $\tau = \frac{1}{(A + BN + CN^2)}$ où A, B et C sont liés respectivement aux recombinaisons non radiatives,

radiatives et Auger [30]. Ces variations fortes de la durée vie des paires électron-trou avec la densité des porteurs se vérifient effectivement pour le quaternaire $1,18\mu\text{m}$ (figure 20). En revanche, avec le quaternaire $1,3\mu\text{m}$, ces variations de durée de vie avec la densité de porteurs sont très faibles, voire inexistantes, probablement parce que l'essentiel des recombinaisons dans ce matériau sont de nature non radiatives (figure I.22) [11].

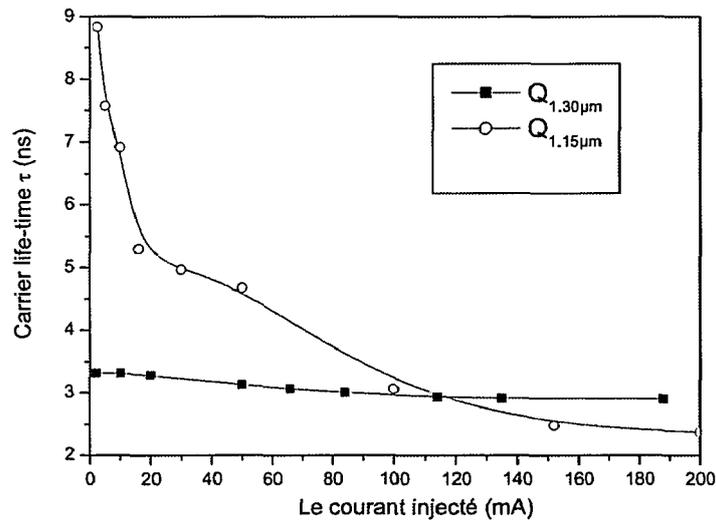


Figure 1.22. Durée de vie des paires électron-trous en fonction du courant injecté pour des guides de structure PIN à base de quaternaire 1,3 μ m et 1,18 μ m. Courbes recueillies de la thèse de Malek Zegaoui [3], [11]

Néanmoins les effets de quasi saturation de la variation d'indice avec le courant électrique se manifestent, même pour le quaternaire 1,3 μ m (figure I.23) [11].

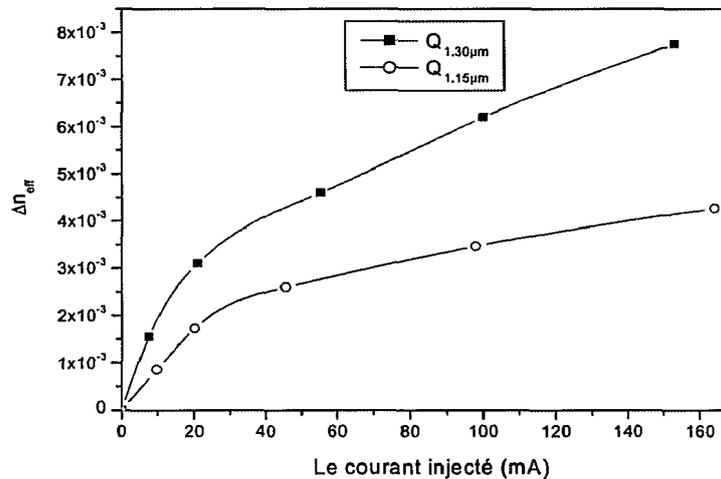


Figure 1.23. Variation d'indice en fonction du courant injecté pour des guides de structure PIN à base de quaternaire 1,3 μ m et 1,18 μ m à la longueur d'onde 1,55 μ m. Courbes recueillies de la thèse de Malek Zegaoui [3], [12]

On peut donc penser que les effets thermiques pourraient avoir tendance à réduire les effets de porteurs libres sur la variation d'indice, puisque ce deux effets sont opposés en termes de variation d'indice : Une augmentation de courant et donc de la température conduit à une augmentation de l'indice, alors que dans le même temps l'injection de porteurs réduit cet indice. Par curiosité, nous avons combiné les effets thermiques et les effets de porteurs libres en ajoutant à la variation d'indice de la structure PIN, celle obtenue avec la structure Schottky, toutes les deux fabriquées avec le quaternaire 1,18 μ m. Les résultats sont présentés figure I.24.

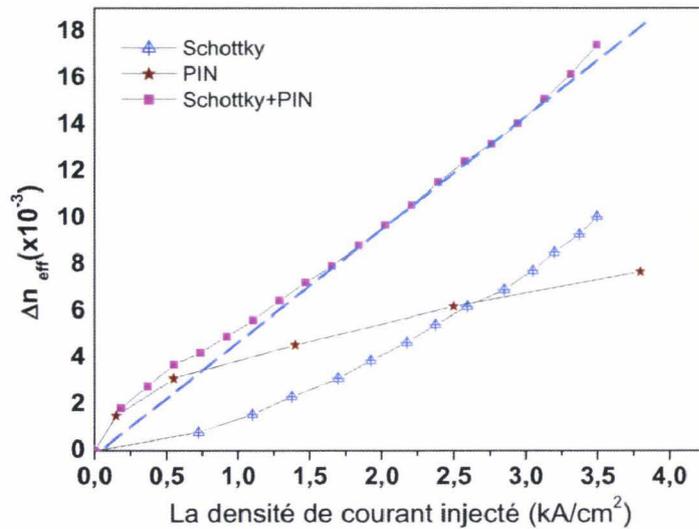


Figure I.24. Variations d'indice effectif en fonction de la densité de courant injectée à la longueur d'onde $1,55\mu\text{m}$ pour le guide à base de quaternaire $1,18\mu\text{m}$

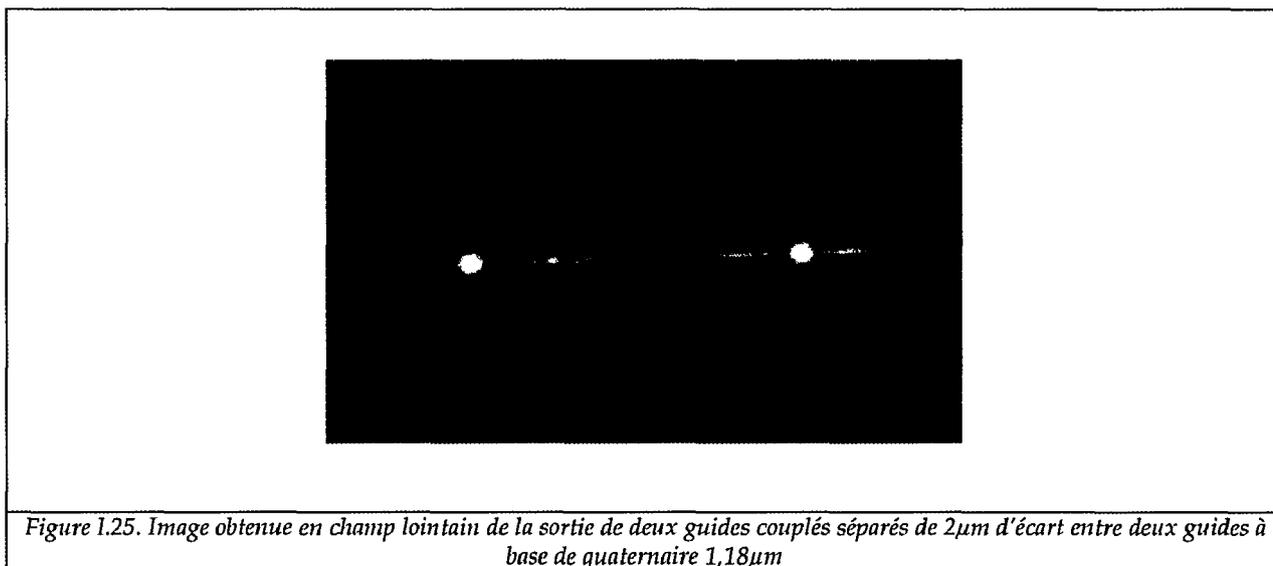
On constate effectivement que les deux effets combinés conduisent à une loi quasi linéaire de la variation d'indice en fonction de la densité de courant injecté, qui pourrait représenter celle d'un effet de porteurs libres si aucun effet thermique ne réduisait l'action de ces porteurs libres. Il faut bien sûr prendre ces résultats avec beaucoup de précautions, puisque les technologies des dispositifs peuvent être sensiblement différentes, notamment en termes d'épaisseur de métallisation et donc de résistance thermique.

Pour se convaincre de l'importance de cette épaisseur de métallisation, nous avons tenté les mêmes expériences Perot-Fabry de mesure de variation d'indice par injection de courant dans un guide Perot-Fabry de deuxième génération. Dans ce cas, comme nous l'avions signalé précédemment, le quaternaire de cœur est de composition $1,3\mu\text{m}$ mais surtout nous avons ajouté un plot de contact reporté dont l'épaisseur de métallisation est de l'ordre de $0,6\mu\text{m}$. Malgré tous nos essais d'injection de courant dans cette structure, nous n'avons observé aucune oscillation Perot-Fabry en sortie de nos guides métallisés. Nous interprétons ce résultat, qui peut paraître surprenant au premier abord, par un effet radiateur de la métallisation supplémentaire qui réduit considérablement la résistance thermique de l'échantillon, ce qui se traduit par aucune élévation véritable de température par injection de courant électrique. On vérifie ainsi que les effets de porteurs libres sont inexistantes dans les structures à contact Schottky, et que les effets thermiques sont ici trop faibles pour obtenir une variation d'indice significative. Il convient de mettre ce résultat à profit pour augmenter l'efficacité des structures PIN en réduisant les effets thermiques par une métallisation suffisamment épaisse.

I.6.3. Caractérisation des commutateurs à guides couplés

Etant données les fortes variations d'indice obtenues par effet thermique lorsqu'on injecte un courant électrique dans un guide actif à contact Schottky, nous avons cherché à appliquer ce phénomène pour la réalisation de commutateurs optiques à guides couplés. Dans ce but, nous avons caractérisé des structures constituées de deux guides optiques actifs distants de $2\mu\text{m}$. A titre indicatif, nous avons également envisagé des guides distants de $4\mu\text{m}$ et de $6\mu\text{m}$. Pour faciliter la caractérisation, ces guides actifs étaient prolongés de guides passifs en forme de S afin que les deux entrées et sorties soient suffisamment éloignées l'une de l'autre. Nous avons choisi une distance de $65\mu\text{m}$.

Dans une première expérience, nous avons injecté un signal optique dans l'un des deux guides optiques. Nous avons observé en sortie une image champ lointain de la sortie des deux guides couplés. Le résultat de cette expérience est représenté figure I.25. On observe un signal optique en sortie des deux guides, prouvant ainsi l'existence d'un couplage entre nos deux guides distants de $2\mu\text{m}$ sans injection de courant.



Nous avons ensuite injecté un courant électrique dans l'un des deux guides actifs, à l'aide d'une pointe placée sur le plot de contact prévu pour ce guide actif. Nous avons pu remarquer, à la caméra, la diminution très sensible de luminosité de l'un des deux spots au bénéfice de l'autre (figure I.26). Cette expérience prouve l'effet de commutation consécutive à la variation d'indice résultant de l'injection du courant électrique.

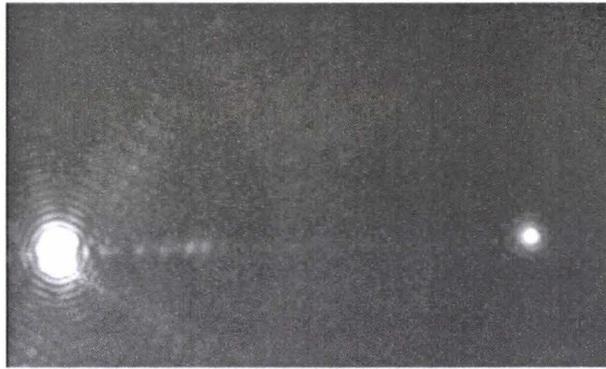
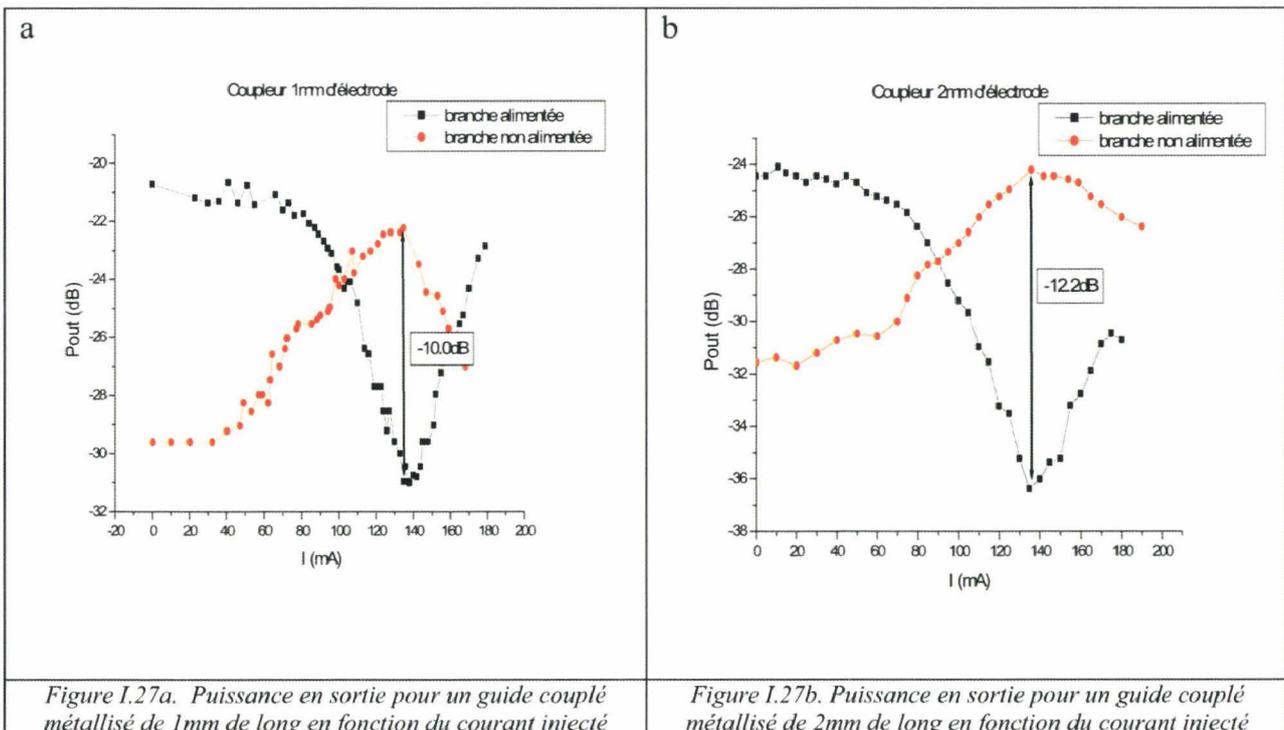


Figure I.26. Image obtenue en champ lointain de la sortie des guides avec injection de courant.

Pour quantifier ce mécanisme de commutation, nous avons remplacé la caméra par une fibre clivée placée successivement à la sortie de chacun de ces guides couplés. Pour chacune des topologies, nous avons mesuré la puissance optique recueillie dans la fibre en fonction du courant injecté dans le guide actif. Les résultats sont présentés figure I.27a pour la longueur d'électrode 1mm et figure I.27b pour la longueur d'électrode 2mm. Dans les deux cas, on constate nettement une diminution du signal optique dans l'une des branches au bénéfice de l'autre branche ; le maximum d'écart entre les puissances de sortie est obtenu pour un courant d'environ 130mA. Le courant est évidemment le même pour les deux structures, puisque nous avons obtenu une variation d'indice sensiblement linéaire avec le courant pour de faibles injections. Pour cette valeur du courant électrique, les différences de puissance optique en sortie des guides sont d'au moins 10dB et atteignent 12dB pour les guides actifs de 2mm d'électrode. Cette expérience valide sans aucun doute la variation d'indice consécutive à l'injection d'un courant électrique dans le guide d'onde à contact Schottky, et la possibilité d'utiliser ce mécanisme pour la commutation.



I.6.4. Caractérisation dynamique

Au delà de la connaissance des variations d'indice obtenues avec l'injection d'un courant électrique dans nos structures à contact Schottky, il est également intéressant de connaître la rapidité avec laquelle s'effectue cette variation d'indice. En particulier, le fait que cette variation d'indice soit consécutive à un effet thermique, laisse présager un phénomène beaucoup plus long que celui résultant d'un effet de porteurs libres. On sait par exemple que certains dispositifs optiques à modification d'indice par effet thermique ont un temps de réponse qui se situe autour de la milliseconde, alors que les commutateurs à effet de porteurs libres sont connus pour des temps de réponse de l'ordre quelques nanosecondes.

Pour évaluer la rapidité des variations d'indice sous l'injection d'un courant électrique dans une structure à contact Schottky, nous avons caractérisé l'une de ces structure, en l'occurrence un guide droit métallisé, dans lequel nous avons injecté un courant impulsionnel périodique, et nous avons mesuré la variation de la puissance optique en sortie du guide d'optique. Pour effectuer cette expérience nous avons remplacé l'alimentation continue par un générateur d'impulsions, ensuite nous avons placé une photodiode fibrée dont le signal électrique de sortie a été mesuré à l'aide d'un l'oscilloscope. Plus précisément, le banc de mesure utilisé pour cette expérience est montré figure I.28. Le courant impulsionnel injecté est également mesuré à l'aide de l'oscilloscope, et sa forme d'onde est superposée à la réponse temporelle issue de la photodiode.

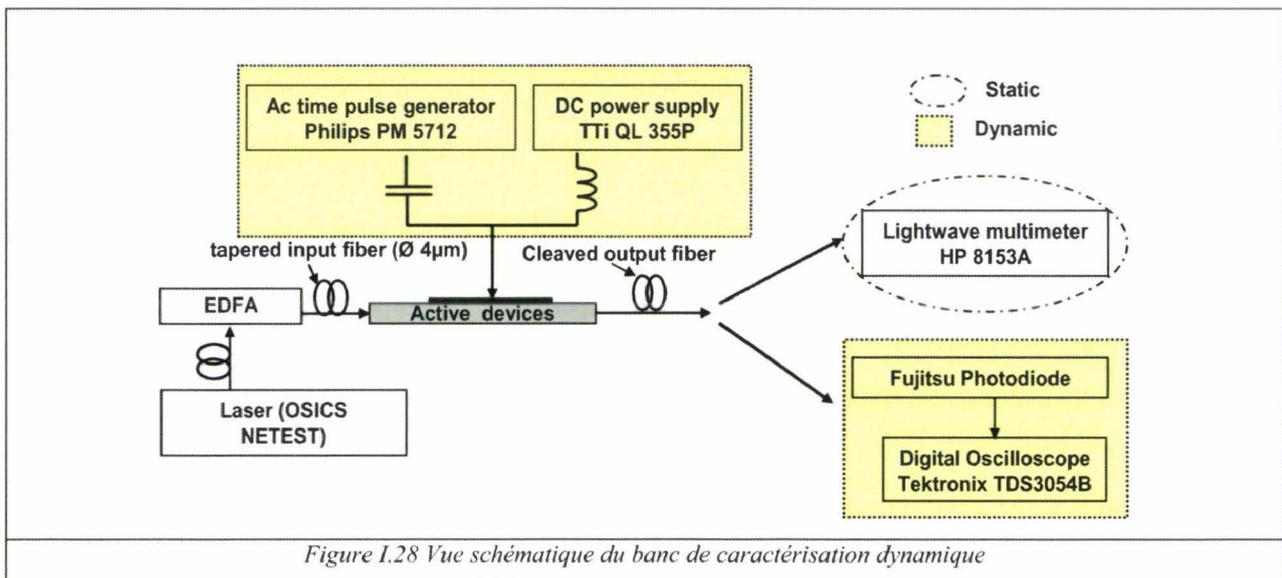
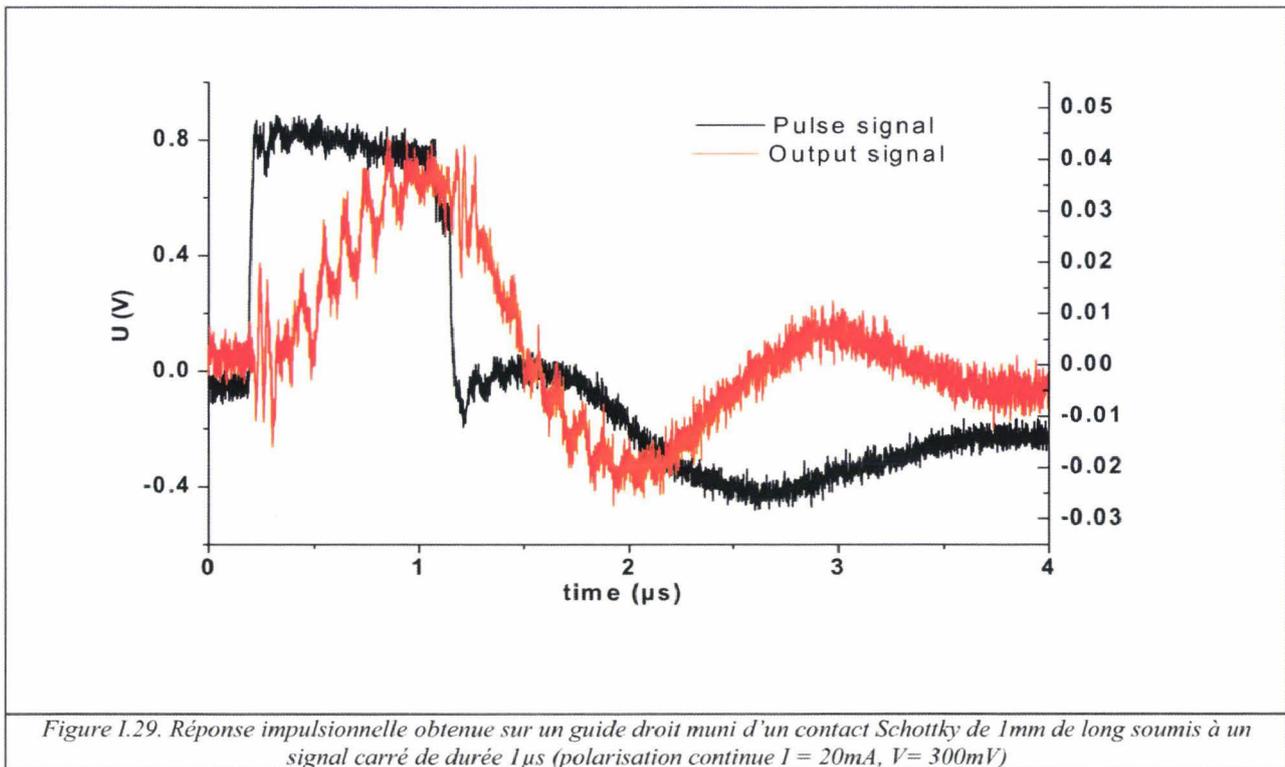


Figure I.28 Vue schématique du banc de caractérisation dynamique

La figure I.29 montre un résultat typique pour un courant impulsionnel dont la largeur d'impulsion est environ 1µs avec une période de répétition de 1ms. On observe dans ce cas un signal injecté de forme quasi-rectangulaire, alors qu'en sortie de la photodiode, on observe un signal qui présente un temps de

montée de l'ordre de la microseconde, environ 700ns, et un temps de descente sensiblement équivalent. En d'autres termes, la rapidité de la variation d'indice dans nos structures à contact Schottky se situe autour de la microseconde ; le mécanisme de variation d'indice est donc ici environ 100 à 1000 fois plus long que celui obtenu par porteurs libres. Il est clair que ce résultat peut présenter un handicap pour la commutation rapide ; cependant nous pouvons rappeler que ces effets thermiques peuvent s'accompagner, si on le souhaite, d'une variation d'indice très importante, beaucoup plus importante que celle obtenue traditionnellement par effet d'injection de porteurs.



I.7. Conclusion

Nous avons montré dans ce chapitre que les structures guide d'onde actif à contact Schottky peuvent être caractérisées par de fortes variations d'indice quand on injecte un courant électrique. Ces variations sont essentiellement dues à un effet thermique qui disparaît lorsque les métallisations sont suffisamment épaisses pour jouer le rôle de radiateur. Ces variations d'indice sont exceptionnelles puisqu'elles atteignent des valeurs qui se situent au delà de 0,1, correspondant à une température de matériau de l'ordre de 400°C, à la limite de la dégradation. Nous avons montré que ces variations d'indice peuvent être utilisées pour la commutation optique, et nous avons démontré un effet de commutation pour une structure à guides actifs couplés. Cependant, le prix à payer de cette variation d'indice énorme est un temps de réponse voisin de la microseconde, beaucoup plus long que celui obtenu pour des effets de

porteurs libres, qui se situe autours de quelques nanosecondes. Autrement dit, si on utilise cet effet dans des composants photoniques, il faut, soit se contenter de cette rapidité modeste, soit, peut être, utiliser des nanostructures pour réduire la capacité thermique de l'objet dont on cherche à modifier la température. Une autre voie qu'il serait intéressant d'explorer, serait celle qui consiste à améliorer l'efficacité des structures pin à injection de porteurs en prévoyant des métallisations suffisamment épaisses pour supprimer tout effet thermique dans ces structures à effets de porteurs libres.

I.8. Références

- [1] M. ZEGAOU, N. CHOUEIB, J. HARARI, D. DECOSTER, V. MAGNIN, X. WALLART, J. CHAZELAS
2x2 InP Optical Switching Matrix based on carrier induced effects for 1.55 μ m applications
Photonics Technology Letters, IEEE, Vol. 21, N°19, pp.1357-1359, October 2009
- [2] K. BLARY, S. DUPONT, J.P. VILCOT, J. CHAZELAS, D. DECOSTER
DOS optical switch for microwave optical links based application
Electronics Letters, Vol. 38, N°25, pp. 1697-1699, december 2002
- [3] M. ZEGAOU
Commutation électro-optique à haute diaphotie sur InP
Thèse, Université de Lille 1, 27 Mai 2005
- [4] S. NG, S. ABDALLA, P. BARRIOS, A. DELAGE, I. GOLUB, S. JANZ, R. MCKINNON, P.J. POOLE, B. SYRETT
Low current optical switching by carrier injection induced reconfigurable waveguide
Proc. of SPIE, Vol. 5579, pp. 644-651, 2004.
- [5] S. ABDALLA, S. NG, D. CELO, S. EL-MOUGY, T.J. SMY, B. SYRETT, P. BARRIOS, A. DELAGE, I. GOLUB, S. JANZ, R. MCKINNON, P.J. POOLE, S. RAYMOND
Optical switching in InGaAsP waveguides using localized index gradients
Journal of Vacuum Sciences and Technology, A 22 (3), pp. 796-799, 2004.
- [6] P. BARRIOS, P. POOLE, M. BUCHANAN, P. CHOW-CHONG, I. GOLUB, C. LACELLE, B. SYRETT, S. ABDALLA, S. EL-MOUGY
InGaAsP digital optical switch on InP
Proc. of SPIE, Vol. 4833, pp. 735-741, 2000.
- [7] S. ABDALLA, S. NG, P. BARRIOS, D. CELO, A. DELAGE, S. EL-MOUGY, I. GOLUB, J.-J. HE, S. JANZ, R. MCKINNON, P.J. POOLE, S. RAYMOND, T.J. SMY, B. SYRETT
Carrier injection-based digital optical switch with reconfigurable output waveguide arms
IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 16, n° 4, pp. 1038-1040, 2004
- [8] S. NG, S. SIEGFRIED, W. ROSS MCKINNON, P. BARRIOS, A. DELAGE, A. SYRETT
Performance optimization of a Reconfigurable waveguide Digital Optical Switch on InGaAsP-InP: Design, Material, and Carrier Dynamics
IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 43, n°. 12, December 2007
- [9] N. CHOUEIB
Matrices de commutation par effets d'injection de porteurs sur InP
Thèse, Université de Lille 1, 14 Février 2008
- [10] J.F. VINCHANT, J.A. CAVAILLES, M. ERMAN, P. JARRY, M. RENAUD
InP/InGaAsP guided-wave phase modulators based on carrier-induced effects: theory and experiment
IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 10, n° 1, pp. 63-69, 1992.

- [11] M. ZEGAOUI, J. HARARI, J.P; VILCOT, F. MOLLOT, D. DECOSTER, H.W. LI, J. CHAZELAS
Determination of carrier-induced optical index and loss variation in GaInAsP/InP heterostructures from static and dynamic Mach-Zhnder interferometer measurements
 Electronics Letters, Vol. 41, n° 16, pp. 1019-1020, 2004
- [12] M.HEINBACH, M. SCHEINLE, A. SCHMID, B. ACKLIN, G. MULLER
Low .Loss bent connections for optical switches
 IEEE Journal of lighwave technology, Vol.6, N°6, pp. 1146-1152, 1988
- [13] J. KAINDL, S. SOTIER, G. FRANZ
Dry etching of III/V- semiconductors : fine tuning of pattern transfer and process control
 Journal Electrochemical Soc, Vol. 142, pp. 1418-2424, 1995
- [14] D. E. IBBOTSON, D. L. FLAMM
Plasma etching for III-V Compound devices
 Solide State Tech. 31, Vol. 105, 1988.
- [15] C.S. WEHLAN, T.E. KAZIOR, K.Y.HUR
High rate CH₄:CH₂plasma etch processes for InP
 J. Vac. Sci. Tech. B15, pp. 1728-1732, 1997.
- [16] B. CAKMAK
Fabrication and characterization of dry and wet etched InGaAs/InGaAsP/InP low wavelength semiconductor lasers
 Optics Express, Vol. 10, n° 13, 2002.
- [17] T.R. HAYES, M.A. DREISBACH, P.M. THOMAS, W.C. DAUTREMONT-SMITH, L.A. HEIMBROOK
Reactive ion etching of InP using CH₄/H₂ mixtures: mechanisms of etching and anisotropy
 Journal Vac. Sci. Tech. B7, pp. 1130-1140, 1989
- [18] M. ZEGAOUI, J. HARARI, N. CHOUEIB, V. MAGNIN, D.DECOSTER
Quick planarisation based on Hydrogen Silsesquioxane (HSQ) for deep etched InP based structures
 Electronics Letters, Vol. 43, n° 22, 2007
- [19] A. R. CLAWSON
Guide to references on III-V semiconductor chemical etching
 Materials Science and Engineering, Vol.31, Issues 1-6, pp. 1-438, 2001
- [20] G. C. DESALVO, W. F. TSENG, J. COMAS
Etch and selectivities of citric acid/hydrogen peroxide on GaAs/AlGaAs/InGaAs/InAlAs, and InP
 Journal Electrochemical Soc, Vol. 139, n°3, pp. 831, 1992
- [21] S. R. BAHL, A. JESUS
Elimination of mesa-sidewal gate-leakage in InAlAs/InGaAs HFETS by selective sidewall recessing
 Inst Phys. Cof. Ser, n° 120, Chapitre. 4, pp. 207-214, 1992
- [22] M.ZEGAOUI, N.CHOUEIB, P. TILMANT, M. FRANCOIS, C. LEGRAND, J.CHAZELAS, D.DECOSTER
A novel bondpad report process for III-V semiconductor devices using full HSQ properties
 Microelectronic Engineering 86, pp. 68-71, 2009

[23] K. BLARY

Matrices de commutation optiques sur InP

Thèse, Université de Lille 1, 05 décembre 2003.

[24] A. BEURAIN, S. DUPONT, H. W. LI, J.P. VILCOT, C. LEGRAND, J. HARARI, M. CONSTANT, D. DECOSTER

Characterization and fabrication of InGaAsP/InP deep-etched micro-waveguides

Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 40, n° 3, pp. 216-218, 2004

[25] T. FEUCHTER, C. THIRSTRUP

High precision planar waveguide propagation loss measurement technique using a Fabry-Perot cavity

IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 6, n° 10, pp. 1244-1247, 1994

[26] SCHRAND, G. MULLER, L. STOLL, U. WOLFF

Simple measurement of carrier-induced refractive index change in InGaAsP pin ridge waveguide structures

Electronics Letters, Vol.27, n°4, pp. 297, 1991

[27] N. SAADSAOUD, M. ZEGAOU, D. DECOSTER, E. DOGHECHE, X. WALLART, J. CHAZELAS

High thermally induced index variations with short response time in InP/GaInAsP/InP waveguide Schottky diodes

Electronics Letters, Vol.45, n°15, 2009

[28] P. MARTIN, E. SKOURI, L. CHUSSEAU, C. ALIBERT

Accurate refractive index measurements of doped and undoped InP by a grating coupling technique

Appl. Phys. Lett, Vol 67, n° 7, pp. 881-883, 1995

[29] S. ADACHI

Lattice thermal conductivity of group-IV and III-V semiconductor alloys

J.Appl. Phys, Vol.102, pp. 063502, 2007

[30] R. OLSHANSKY, C.B. SU, J. MANNING, W. POWAZINIK

Measurement of radiative and nonradiative recombination rates in InGaAsP and AlGaAs light sources

IEEE J. Quantum Electron, Vol. 20, n°8, pp. 838-854, 1984

Chapitre II : Guides d'onde GaAs/GaAsSbN/GaAs passifs et actifs

II.1. Motivation

Ce chapitre est consacré à l'exploration d'une nouvelle filière de matériaux GaAs en collaboration avec l'équipe du Professeur Yoon Soon Fatt de la Nanyang Technological University (NTU) de Singapour. Plus précisément, le Professeur Yoon a maîtrisé la croissance de GaAsSbN faiblement nitruré et antimonié, en couches suffisamment épaisses ($>5000\text{\AA}$), en accord de maille sur GaAs. Ces matériaux sont caractérisés par une bande interdite plus petite que celle du GaAs. On se trouve donc en présence d'une filière de matériaux nouveaux, présentant une analogie totale avec la filière InP en termes d'hétérostructures, à ceci près qu'elle possède tous les avantages de la filière GaAs en termes de coûts, de taille de substrats, de robustesse mécanique du matériau, de maturité technologique. Notamment, cette analogie avec la filière InP permet d'éviter la croissance d'une couche d'isolation optique épaisse (plusieurs microns), indispensable en filière GaAs classique pour la réalisation de guides optiques [1-6]. On pourrait ainsi, à terme, si toutes les propriétés physiques espérées se vérifiaient, réaliser des commutateurs en filière GaAs à base de ces hétérostructures. Il faut alors vérifier les propriétés de guidage optique dans des doubles hétérostructures GaAs/GaAsSbN/GaAs, et les possibilités d'y injecter des porteurs. C'est l'objet du travail présenté dans ce chapitre effectué dans le cadre d'un projet MERLION. Un projet MERLION est un projet soutenu par l'Ambassade de France à Singapour et les Académiques de Singapour (NTU, NUS, AStar...) pour favoriser les échanges entre universitaires Singapouriens et français, sur la base d'un projet commun.

II.2. Présentation du GaAsSbN du groupe du Professeur Yoon Soon Fatt

Ce groupe a démontré la croissance de $\text{GaN}_{0.035}\text{As}_{0.875}\text{Sb}_{0.09}$ pour des applications en photodétection à la longueur d'onde $1,3\mu\text{m}$ [7-9]. Il s'agit notamment d'un matériau adapté en maille à GaAs permettant des croissances d'épaisseur supérieure à $0,5\mu\text{m}$. Sa bande interdite de $0,9\text{eV}$, autorise son utilisation en photodétection à la longueur d'onde $1,3\mu\text{m}$; en revanche, ce matériau devrait être transparent à la longueur d'onde $1,55\mu\text{m}$. En outre la différence de bande interdite de $0,5\text{eV}$ entre GaAsSbN et GaAs devrait conduire à un contraste d'indice optique avec un indice plus fort pour GaAsSbN que pour GaAs.

Pour les épitaxies à l'origine des travaux présentés dans ce chapitre, les croissances ont été effectuées dans le groupe du Professeur Yoon Soon Fatt par épitaxie par jet moléculaire avec une source d'azote assistée par plasma radiofréquence. Les croissances sont effectuées à 400°C avec une puissance RF du plasma de 180W . La pression équivalente de flux d'Antimoine est de $1,1 \cdot 10^7 \text{Torr}$. Dans ces conditions, les couches de GaAsSbN contiennent environ $3,5\%$ d'azote et 9% d'Antimoine. Cette composition a été confirmée par diffraction X [10]. L'énergie de bande interdite a été estimée par modélisation et mesurée par photoluminescence ; sa valeur se situe autour de $0,88\text{eV}$. On pourra, pour plus de précision, consulter

les publications de ce groupe pour des travaux souvent en collaboration avec l'IEMN, dans le cadre de projets MERLION [11-16].

Les épitaxies fournies par le Professeur Yoon Soon Fatt sont des doubles hétérostructures GaAs/GaAsSbN/GaAs sur substrat GaAs pour les guides d'onde passifs ; la même hétérostructure est surmontée d'une couche de GaAs P⁺ pour les guides actifs. Le groupe du Professeur Yoon Soon Fatt a également préparé une épitaxie épaisse (0,5µm) de ce matériau sur substrat GaAs semi-isolant pour effectuer des mesures d'indice optique.

II.3. Structure des guides d'onde étudiés

La structure étudiée dans ce chapitre est une version GaAs de celle plus traditionnelle de la filière InP. Elle s'appuie sur la croissance de matériaux quaternaire GaAs faiblement nitrurés et antimoniés, en couche épaisse effectuée par jets moléculaires à l'Université Technologique de Nanyang (NTU) à Singapour, dans le groupe du Professeur Yoon Soon Fatt.

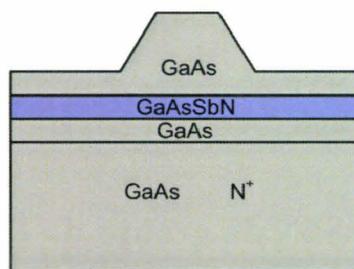


Figure II. 1. Structure schématique du guide d'onde passif à base d'une hétérostructure GaAs/ GaAsSbN/GaAs

La première structure étudiée (figure II.1) est un guide d'onde passif qui est tout à fait comparable à la structure InP rappelée au chapitre précédent, paragraphe I.2.2, et utilisée dans le commutateur de l'IEMN. Notamment, l'épitaxie de départ est constituée d'une couche de quaternaire qui joue le rôle de cœur du guide optique et d'une couche de GaAs en surface qui est la couche de confinement supérieur. La couche de confinement inférieur est tout simplement le substrat GaAs N⁺ avec une couche tampon de GaAs. Une telle structure est possible parce que le quaternaire développé à Singapour par le Professeur Yoon Soon Fatt a un indice optique supérieur à celui de GaAs, comme nous le montrerons un peu plus loin, et que son énergie de bande interdite est suffisamment grande pour être transparent à la longueur d'onde 1,55µm des télécommunications optiques [15]. Dans ces conditions, la structure du guide d'onde est tout à fait comparable à celle en InP, contrairement aux techniques habituellement utilisées en filière GaAs. Plus précisément, en filière GaAs, il n'existe traditionnellement pas de matériau dont l'indice est supérieur à celui de GaAs et qui soit transparent à la longueur d'onde 1,55 µm. C'est donc le GaAs lui même qui joue le rôle de cœur du guide optique et le ternaire AlGaAs ou GaInP joue le rôle de couche de confinement d'indice plus faible que GaAs. Ceci impose une croissance de couche d'isolation optique en AlGaAs ou

GaInP entre la couche de cœur et le substrat qui sont tous les deux en GaAs. Cette couche d'isolation a une épaisseur souvent supérieure à plusieurs microns [4-6]. L'utilisation de ces matériaux nouveaux GaAsSbN, à l'origine du confinement vertical, permet donc de supprimer cette couche d'isolation optique, ce qui simplifie considérablement la structure épitaxiale et la structure du guide d'onde. Pour un guide d'onde en arête, obtenu par la gravure de la couche supérieure en GaAs, les autres caractéristiques sont sensiblement équivalentes à celle d'une structure en InP. Notamment, la largeur de l'arête est de $4\mu\text{m}$; nous y avons également adjoint une largeur de $6\mu\text{m}$ et de $8\mu\text{m}$ pour comparer. La profondeur de gravure est ici aussi d'environ $1\mu\text{m}$.

Nous avons également fabriqué quelques dispositifs d'essai actifs, de type PIN, (figure II.2), qui comportent une couche en GaAs de type P^+ en surface, sur laquelle nous déposons une métallisation Pt/Ti/Pt/Au pour la réalisation d'un contact ohmique de type P. Pour ces structures actives, la face arrière du substrat est également pourvue d'une métallisation formant un contact ohmique de type n. Pour cette structure active qui comporte cette couche P^+ supplémentaire, la profondeur de gravure est plus importante puisqu'elle prend en compte l'épaisseur de la couche P^+ .

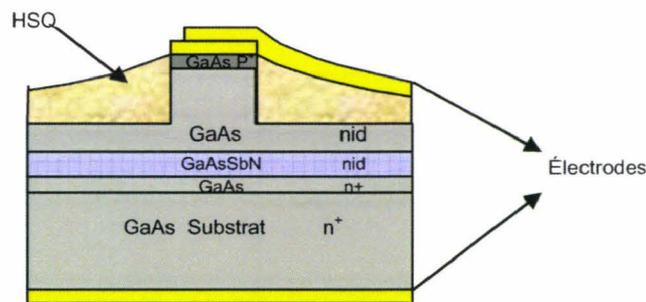


Figure II.2. Structure schématique du guide d'onde actif à base de l'hétérostructure GaAs/GaAsSbN/GaAs

II.4. Dispositifs fabriqués

Nous avons commencé par fabriquer de simples guides droits passifs en arête obtenus par gravure de la couche de confinement de GaAs supérieure, de part et d'autre de l'arête. Cette arête a une largeur typique de $4\mu\text{m}$ mais des largeurs de $6\mu\text{m}$ et de $8\mu\text{m}$ ont également été prévues. Pour cette première réalisation nous avons utilisé la lithographie optique qui ne comprend qu'un seul masque pour la définition de l'arête. Ce masque n'est constitué que de rubans de différentes longueurs et de différentes largeurs.

Pour la deuxième réalisation qui concerne cette fois-ci des guides actifs, nous avons utilisé la lithographie électronique pour la souplesse qu'elle procure lors de la fabrication. Cette fois-ci nous avons réalisé des guides droits qui sont pourvus d'un contact ohmique de type P sur le haut de l'arête et d'une métallisation face arrière pour la réalisation d'un contact ohmique de type n. Une planarisation est nécessaire pour reporter un plot de contact assurant l'alimentation de la diode PIN. Nous avons prévu une largeur d'arête de $4\mu\text{m}$ et des longueurs de métallisation du contact ohmique P de $200\mu\text{m}$, $300\mu\text{m}$, $500\mu\text{m}$, $800\mu\text{m}$ et

1000 μm . Comme pour les guides actifs 1,3 μm à contact Schottky du chapitre précédent, la réalisation technologique comprend quatre masques :

- ✓ Dépôt des électrodes
- ✓ Gravure de l'arête
- ✓ Ouverture de la couche de nitrure pour passivation et par HSQ pour planarisation
- ✓ Report du plot de contact

Nous présentons figure II.3a chacun de ces quatre masques, ainsi que la superposition des quatre masques utilisés pour la réalisation technologique de ces dispositifs, figure II.3b. Ils nous permettent d'illustrer la géométrie des dispositifs.

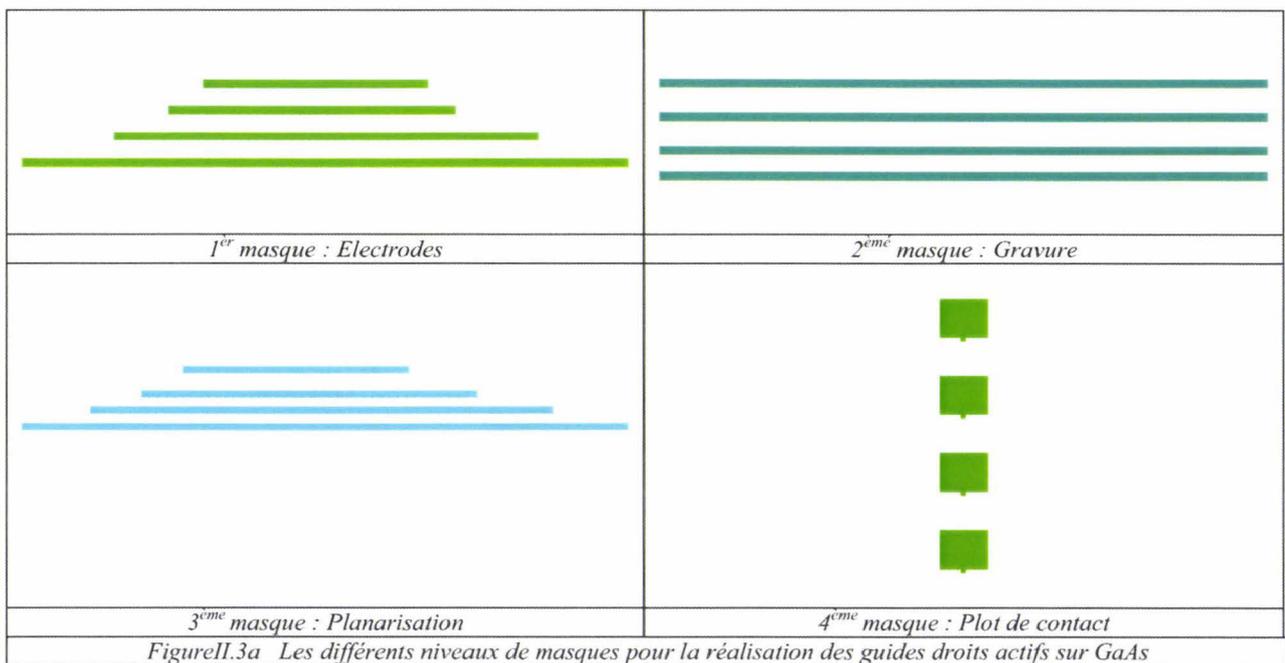


Figure II.3b. Représentation de la superposition des masques de guides droits actifs et passifs.

II.5. Description du processus technologique sur guide d'onde GaAs

II.5.1. Epitaxie

La croissance des couches épitaxiales a été réalisée par jets moléculaires à l'Université Technologique de Nanyang (NTU) à Singapour dans le groupe de Professeur Yoon Soon Fatt sur un substrat de deux pouces de diamètre.

II.5.1.1. Guides passifs

L'épitaxie est constituée d'une couche de quaternaire GaAsSbN qui joue le rôle de cœur du guide optique et d'une couche supérieure en GaAs qui est la couche de confinement supérieur. La couche de confinement inférieur est tout simplement le substrat n^+ , avec une couche tampon en GaAs pour le démarrage de l'épitaxie (figure II.4). Les couches de GaAs épitaxiées ont été dopées n^+ pour diminuer leur indice optique.

Matériau	Type	Epaisseur (μm)	Dopage (cm^{-3})
GaAs	n^+	1,5	$2 \cdot 10^{18}$
GaAsSbN	nid	0,4	
GaAs	n^+	0,4	$2 \cdot 10^{18}$
GaAs	Substrat n^+	400	$2 \cdot 10^{18}$

II.5.1.2. Guides actifs

Il s'agit ici aussi d'une hétérostructure GaAs/GaAsSbN/GaAs dont la croissance a été effectuée par le Professeur Yoon Soon Fatt et son équipe à l'Université Technologique de Nanyang (NTU) à Singapour par jets moléculaire sur substrat GaAs n^+ .

Elle est constituée d'une couche de quaternaire faiblement nitruré et antimonié qui joue le rôle de cœur du guide optique et d'une couche supérieure de GaAs non intentionnellement dopée suivie d'une couche de

contact en GaAs de type P⁺, le tout sur un substrat dopé n⁺ de GaAs (figure II.5), avec une couche tampon de GaAs n⁺ au tout début de l'épitaxie.

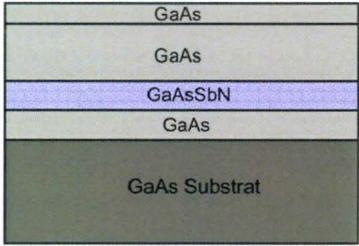
	Matériau	Type	Epaisseur (μm)	Dopage (cm ⁻³)
	GaAs	P ⁺	0,05	2.10 ¹⁹
	GaAs	nid	1,5	
	GaAsSbN	nid	0,5	2.10 ¹⁶ -3.10 ¹⁷
	GaAs	Tampon n ⁺	0.3	5.10 ¹⁸
	GaAs	Substrat n ⁺	400	5.10 ¹⁸

Figure II.5. Epitaxie de GaAs/GaAsSbN/GaAs pour guide actif Les croissances ont été effectuées à NTU dans le groupe du Professeur Yoon Soon Fatt

II.5.2. Technologie des dispositifs d'essai

II.5.2.1. Guides passifs

II.5.2.1.1. Etapes technologiques

Les guides passifs ont été réalisés par lithographie optique.

Les principales étapes sont les suivantes :

- Lithographie optique des motifs de guide à l'aide d'un masque de résine de façon à protéger la structure supérieure des dispositifs pendant la gravure des guides (figure II.6). Ce masque est constitué de lignes droites de différentes largeurs.

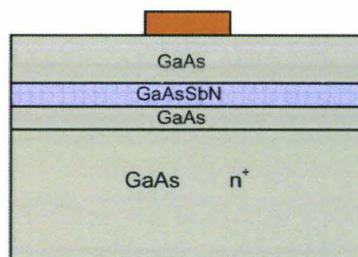


Figure II.6. Dépôt de résine optique

- Suit une gravure homogène inclinée (figure II.7) et surtout peu rugueuse afin de réduire au maximum les pertes optiques. Le guide à graver est obtenu par une gravure de 1μm du GaAs superficiel sur une épaisseur totale de 1,5μm. La gravure a été faite par voie chimique ; cette méthode permet d'avoir des flancs dont la rugosité est faible, avec un fond de gravure bien propre [17-18].

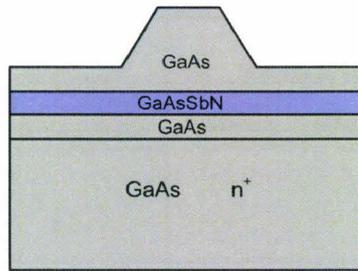
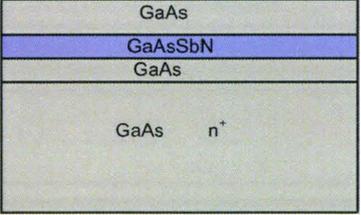
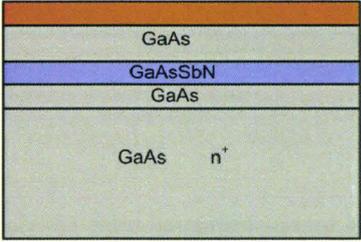
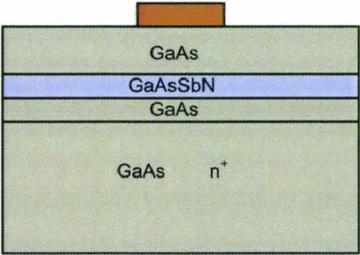
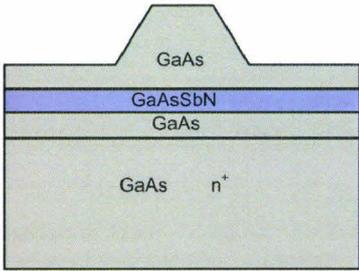


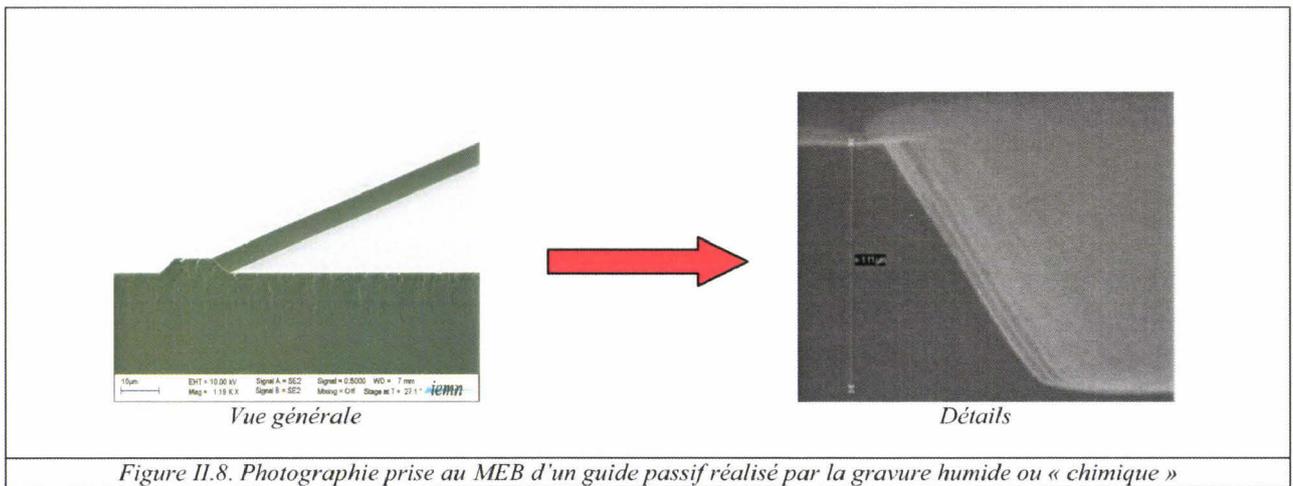
Figure II. 7. Gravure de l'arête du guide

II.5.2.1.2. Opération technologiques détaillées

Les différentes opérations technologiques sont présentées de façon détaillée dans le tableau II.1 suivant :

<ol style="list-style-type: none"> 1. Désoxydation du substrat GaAs avec de l'amoniaque NH_4OH 5% pendant 1min. 2. Nettoyage à l'acétone et à l'alcool, ensuite séchage à l'azote. 3. Déshydratation à 200°C sur plaque chauffante pendant 5 à 10min. 	
<ol style="list-style-type: none"> 4. Dépôt d'une résine optique nLof 2020 v : 3000rpm ; a : 1000rpm/s, t : 20s 5. Recuit pleine plaque à 110°C pendant 1min Epaisseur de résine $2\mu\text{m}$ 	
<ol style="list-style-type: none"> 6. Insolation UV : (I : $7,4\text{mW}/\text{cm}^2$; t : 4,5s) 7. Inversion du masque par un recuit pleine plaque à 110°C pendant 1min 8. Développement dans une solution MF326 pendant 35s ensuite dans EDI pendant 15s Epaisseur de résine $1,9\mu\text{m}$ 	

<p>9. Gravure chimique ($H_3PO_4/H_2O_2/H_2O$) de proportion respective (5/1/20) pendant 3min15s</p> <p>10. Rinçage à l' EDI pendant 5min</p> <p>Vitesse de gravure du GaAs 6nm/s</p>	
<p>Tableau. II. 1 Opérations technologiques détaillées pour la fabrication des guides droits passifs à base de quaternaire GaAsSbN par lithographie optique</p>	



II.5.2.2. Guide actif

II.5.2.2.1. Etapes technologiques

Les étapes technologiques sont sensiblement les mêmes que celles présentées dans le chapitre précédent pour les guides actifs sur InP. Pour des raisons de souplesse et de qualité de réalisation, nous avons utilisé ici la lithographie électronique.

II.5.2.2.2. Spécificités technologiques de la Structure PIN

Comme pour la structure PIN sur InP, la structure PIN sur GaAs comporte un certain nombre d'étapes supplémentaires comparées au guide passif, qui complique sa réalisation. Entre autres, on peut citer les étapes suivantes.

Contact ohmique P⁺

Le contact P⁺ est effectué sur la couche de GaAs P⁺ superficielle, afin de favoriser la réalisation du contact ohmique de type P et l'injection des porteurs dans la région intrinsèque de la diode.

Planarisation

Une étape décisive dans la réalisation de la partie active de nos dispositifs est la planarisation à base de HSQ qui permet le report des électrodes sur un matériau isolant [19]. En effet, cette dernière a pour rôle de rattraper le dénivelé entre le haut des électrodes et le bas du ruban de GaAs ainsi que d'éviter les courants de fuite en surface. Cette planarisation est donc effectuée à l'aide d'un matériau diélectrique, typiquement de la HSQ [19]. La grande difficulté ici concerne le dénivelé important entre le haut de l'arête du guide et le bas de cette arête, dénivelé qui représente environ 1.2µm. En outre, ce diélectrique doit être supprimé au niveau des électrodes, ce qui exige un masque supplémentaire.

Cette planarisation représente une des difficultés majeures du processus technologique à mettre en œuvre.

Reports d'électrodes

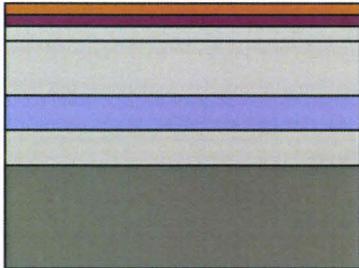
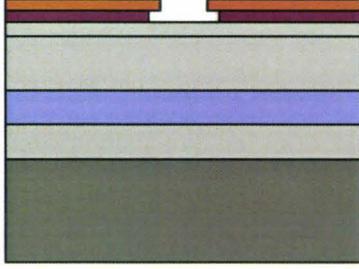
Pour pouvoir injecter un courant dans la structure PIN du guide, il est absolument nécessaire d'ajouter un plot de contact dont les dimensions sont compatibles avec une prise de contact électrique aisée (pointes, microfils soudés,...) [20]. Ces dimensions sont beaucoup plus grandes que la largeur du guide optique et par conséquent, comme indiqué dans le paragraphe précédent, il est nécessaire de procéder à une planarisation qui permettra à la fois de faciliter la connexion métallique avec l'électrode sur le guide, et l'isolation électrique du matériau semiconducteur sous-jacent.

Contact face arrière

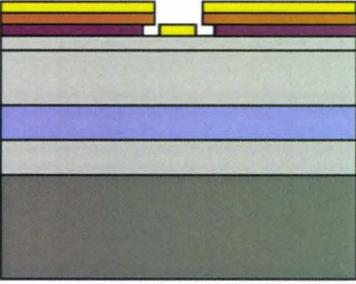
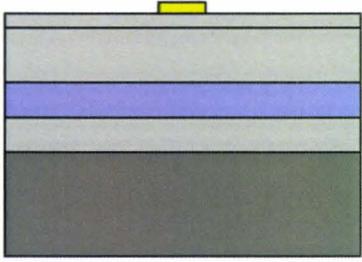
La structure PIN impose la réalisation d'un contact ohmique de type n, que nous avons prévu dans nos dispositifs déposé sur tout le substrat en face arrière.

1.5.2.2.3. Opérations technologiques détaillées

Les différentes étapes technologiques sont représentées de façon détaillée dans le tableau II. 2 suivant :

<p>1. Désoxydation dans NH_3OH /EDI (5/100)</p> <p>2. Nettoyage du substrat à l'acétone et à l'alcool.</p> <p>3. Déshydratation du substrat sur plaque pendant 10 min à 200°C.</p> <p>4. Enduction de EL 13%</p> <p style="padding-left: 40px;">$v = 2900\text{rpm}$, $a = 1000\text{rpm/s}$, $t = 12\text{sec}$.</p> <p>5. Recuit sur plaque chauffante pendant 1mn à 80°C, 10min à 180°C; laisser refroidir à 20°C pendant 2min.</p> <p>6. Enduction PMMA3%</p> <p style="padding-left: 40px;">$V : 3400\text{rpm}$, $a : 1000\text{rpm/s}$, $t : 12\text{s}$</p> <p>7. Recuit sur plaque chauffante pendant 1 min à 80°C ensuite 10 min à 180°C</p>	
<p>8. Lithographie électronique (tension = 50kV, dose = 180$\mu\text{C}/\text{cm}^2$)</p> <p>9. Développement avec la solution : (1/3 MIBK, 2/3 IPA) agitée pendant 2min à 150tr/min, puis avec le substrat pendant 60sec à 100tr/min.</p> <p>10. Rinçage pendant 30sec avec l'alcool isopropylique " IPA".</p>	
<p><i>Tableau II. 2. 1 Description du procédé lithographique du profil en casquette.</i></p>	

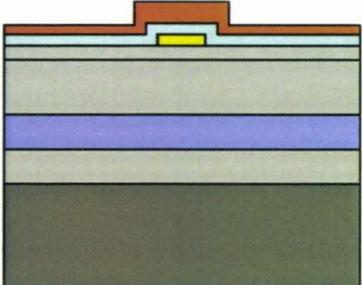
Après la révélation, les métaux sont ensuite évaporés sous vide sur ce substrat révélé. La succession des métaux est Pt/Ti/Pt/Au/Ti suivant les épaisseurs respectives 100Å/300Å/100Å/3000Å/200Å. On continue cette étape par un lift-off en plongeant le substrat dans un bain de Remover Pg à 80°C pendant 2 heures comme représenté dans le tableau II.3

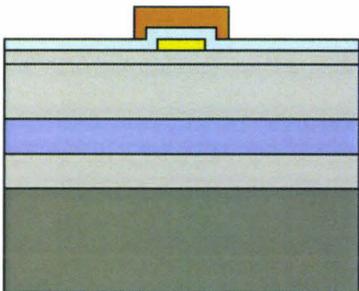
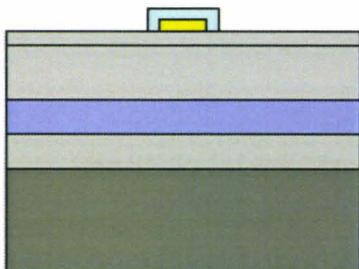
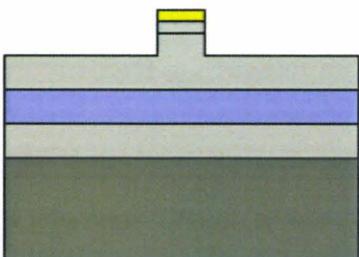
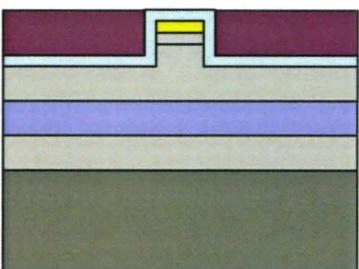
	
Dépôt des métaux Pt/Ti/Pt/Au/Ti (100/300/100/3000/200Å) par évaporation sous vide	Lift-off dans la solution Remover Pg à 80°C pendant 2h
<i>Tableau II. 2. 2 Représentation de la structure de l'échantillon pendant la métallisation et après le lift-off.</i>	

Après le dépôt des électrodes le substrat est soumis à un recuit flash à 400°C pendant 40 secondes qui permet de réduire les résistances de contact P⁺; ce recuit flash suppose une montée de la température de 20°C à 400°C pendant 10 secondes, dans un four approprié ; le substrat reste à cette température pendant 40 secondes puis il sera refroidi en 30 secondes [21-22].

Pour graver le GaAs nous avons utilisé la gravure sèche par ICP. Cette dernière nous permet d'obtenir des flancs et un fond de gravure très propres et lisses. Pendant la gravure de 1.2µm de GaAs, nous avons besoin d'un masque qui résiste et qui protège bien le premier niveau (les électrodes). Nous avons donc utilisé le nitrure d'une épaisseur suffisante (5000Å) pour bien protéger les électrodes pendant la gravure, en reportant le masque de résine sur le nitrure ; le choix d'une écriture électronique et d'une résine ainsi que les détails du procédé technologique sont les mêmes que dans le chapitre précédent.

Ce tableau II. 2. 3 poursuit en détail les différentes opérations technologiques.

<ol style="list-style-type: none"> 1. Dépôt de 5000Å de nitrure par PECVD à une température de 300°C. 2. Recuit pleine plaque à une température de 200°C pendant 5 minutes pour évaporer les solvants résiduels. 3. Dépôt du promoteur d'adhérence HMDS : $v = 3000\text{rpm}$, $a = 1000\text{rpm/s}$, $t = 20\text{sec}$. 4. Enduction de résine électronique SAL 601 ; $v = 1700\text{rpm}$, $a = 1000\text{rpm/s}$, $t = 15\text{sec}$. 5. Recuit pleine plaque à 105°C pendant 3min. 	
--	--

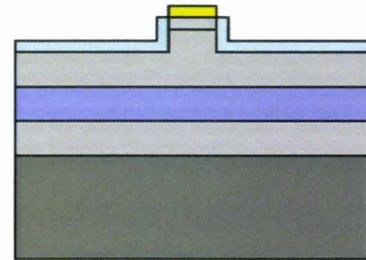
<p>6. Ecriture électronique : tension = 50kV, dose = $4\mu\text{C}/\text{cm}^2$.</p> <p>7. Inversion du masque par un recuit post-écriture pleine plaque à 105°C pendant 3min.</p> <p>8. Développement pendant 10 minutes dans 2 bains de MF 322.</p> <p>9. Rinçage à l'EDI pendant 30 secondes</p>	
<p>10. Gravure du nitrure par plasma (CHF_3/CF_4) ; débits respectifs (20/20) pendant 4min sous pression=50mT, tension=337V, puissance= 180W</p> <p>11. Nettoyage du masque de résine par plasma O_2, 30sccm, 100mT, 100W, 320V pendant 5 minutes.</p>	
<p>12. Gravure ICP du GaAs, débit PCl_3 : 30sccm, puissance respectifs RIE/ICP : (50W/300W), pression = 2mTorr, tension :</p> <p>13. Température/Pression He : 10°C/10Torr.</p> <p>Pompage jusqu'à la pression de base.</p> <p>14. Gravure de nitrure par plasma (CHF_3/CF_4), débit respectifs (20/20) pendant 4min sous pression = 50mT, puissance = 180W, tension = 337V.</p>	
<p>15. Dépôt 80 nm de nitrure à une température de 260°C par PECVD.</p> <p>16. Recuit pleine plaque à une température 200°C pendant 5 minutes pour évaporer les solvants résiduels.</p> <p>17. Enduction de résine électronique EL13% (v : 3400 rpm, a : 1000 rpm/s, t : 12s)</p> <p>18. Recuit pleine plaque à 80°C pendant 1min, ensuite à 180°C pendant 10min</p> <p>19. Ecriture électronique (tension : 50kV, dose : $180\mu\text{C}/\text{cm}^2$)</p>	

20. Développement avec la solution : (1/3 MIBK, 2/3 IPA) agitée pendant 2min à 150tr/min, puis avec le substrat pendant 60sec à 100tr/min.

21. Rinçage pendant 30sec avec l'alcool isopropylique "IPA".

22. Gravure de nitrure au niveau de l'ouverture par plasma (CHF_3/CF_4), débit respectifs (20/20) pendant 2min minutes sous pression = 50mTorr, puissance = 180W, tension = 337V.

23. Retrait des résidus de résine par plasma O_2 , débit 30sccm pendant 5min sous pression = 100mTorr, puissance 100W.



24. Planarisation :

* Nettoyage avec acétone et alcool puis séchage

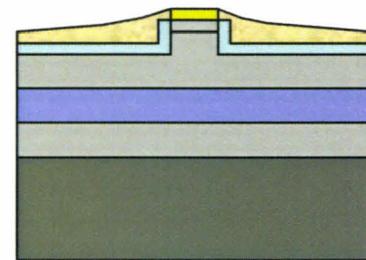
* Déshydratation pleine plaque à une température de 200°C pendant 15 minutes pour évaporer tous les solvants résiduels

* Dépôt de la fox16 (v : 1000rpm, a : 1000rpm/s, t : 30s)

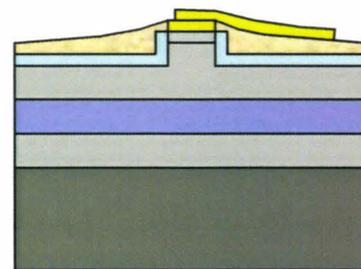
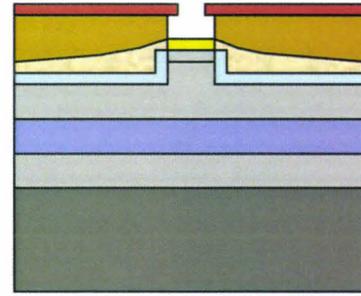
* Recuit pleine plaque à une température de 120°C pendant 10 minutes

*Densification (oxydation) à un débit 50sccm de O_2 , puissance : 290W, pression : 100mTorr, tension : 150W, temps : 30min

25. Ouverture de la HSQ aux niveaux des guides par le plasma en utilisant les gaz CH_3/CF_4 débits respectifs (20/20) sccm, sous pression de 50 mTorr et de puissance de 180W



26. Enduction de ARP : $v = 1500\text{rpm}$, $a = 1000\text{rpm/s}$, $t = 15\text{s}$.
 27. Recuit sur plaque chauffante pendant 1min à 80°C , 10min à 180°C
 28. Enduction de PMMA 3% $v = 3400\text{rpm}$, $a = 1000\text{rpm/s}$, $t = 12\text{s}$
 29. Recuit sur plaque chauffante pendant 1min à 80°C ensuite 10min à 180°C
- L'épaisseur de ARP déposée est $2\mu\text{m}$, tandis que l'épaisseur de PMMA 3% est 630\AA .
30. Lithographie électronique : tension = 50kV , dose = $180\mu\text{C}/\text{cm}^2$.
 31. Développement avec la solution : 1/3MIBK, 2/3IPA agitée pendant 2 min à $150\text{tr}/\text{min}$, puis avec le substrat pendant 2min à $100\text{tr}/\text{min}$.
 32. Rinçage pendant 30 secondes dans l'alcool isopropylique "IPA".
 33. Evaporation par pulvérisation de la couche métallique de Ti/Au : $1000/6000\text{\AA}$.
 34. Lift-off de 2h dans une solution Remover Pg.



35. Dépôt une couche de résine AZ 4562 ($v : 2000\text{rpm}$, $a : 1000\text{rpm/s}$, $t : 40\text{s}$) ensuite recuit à 110°C pendant 3min
36. Collage sur un substrat en verre par la cire OCON-199
37. Amincissement : en utilisant l'alumine $15\mu\text{m}$ pendant 15min ensuite $3\mu\text{m}$ pendant 5min
38. Décollage du substrat dans une solution organique « Non Solvent Cleaning Fluid »
39. Nettoyage dans l'acétone et l'alcool
40. Métallisation face arrière Ti/Au ($100/500\text{\AA}$) par pulvérisation

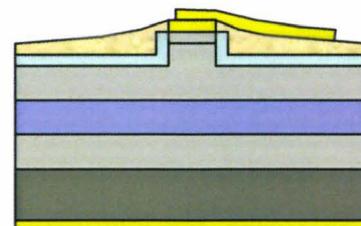
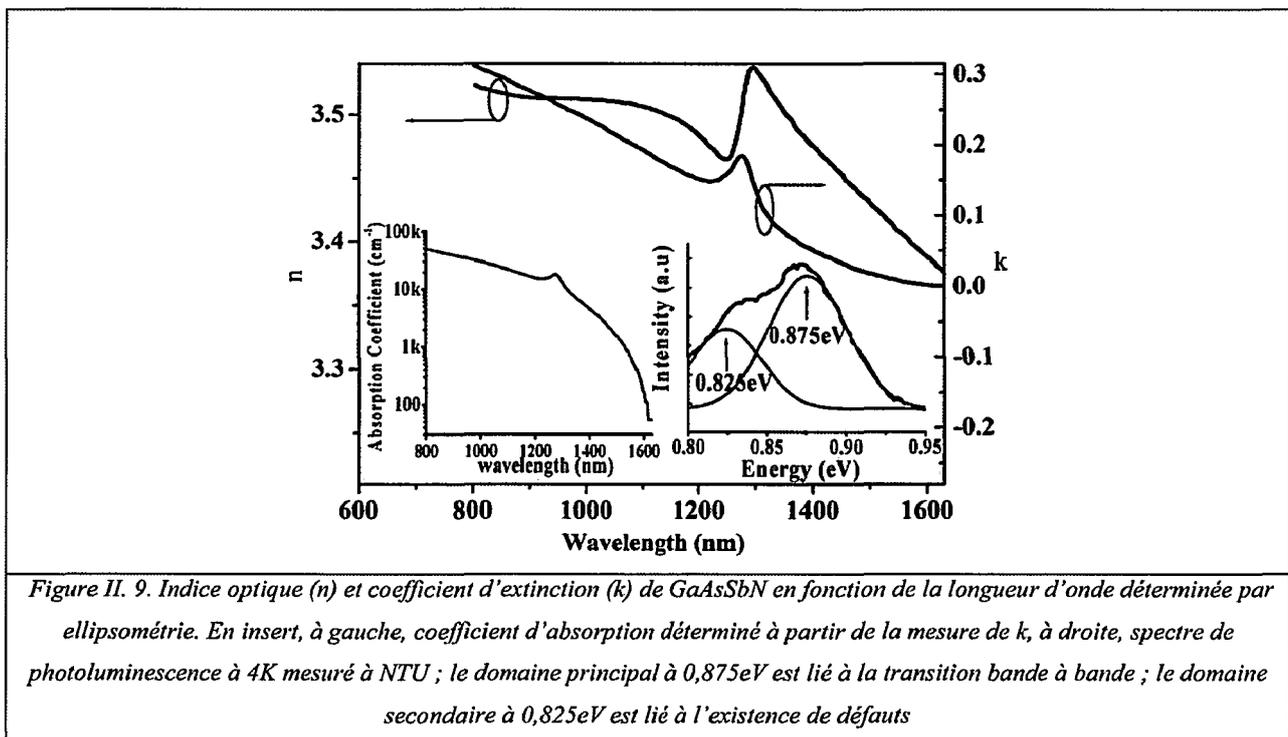


Tableau II. 2. 3. Opérations technologiques détaillées pour la fabrication des guides droits actifs à base de quaternaire GaAsSbN par lithographie électronique

II.5.3. Etude expérimentale

II.5.3.1. Caractérisation optique du GaAsSbN

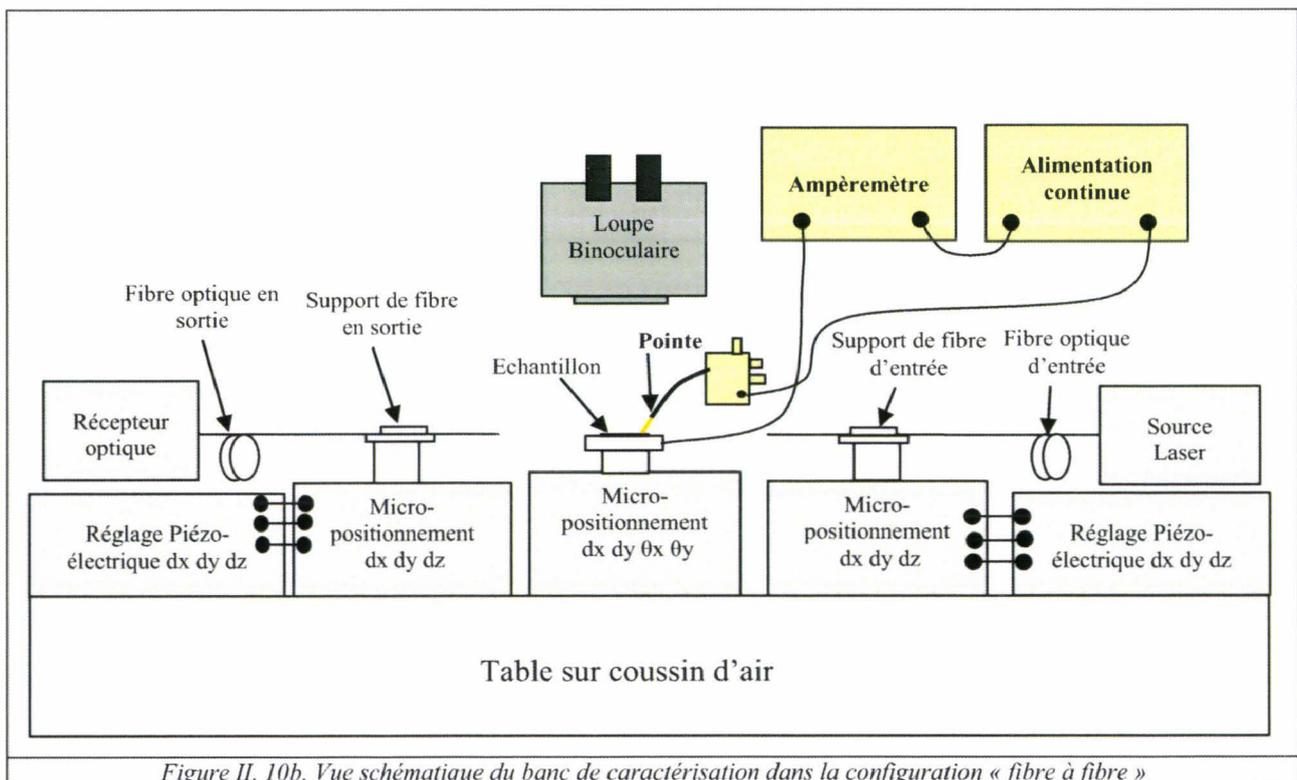
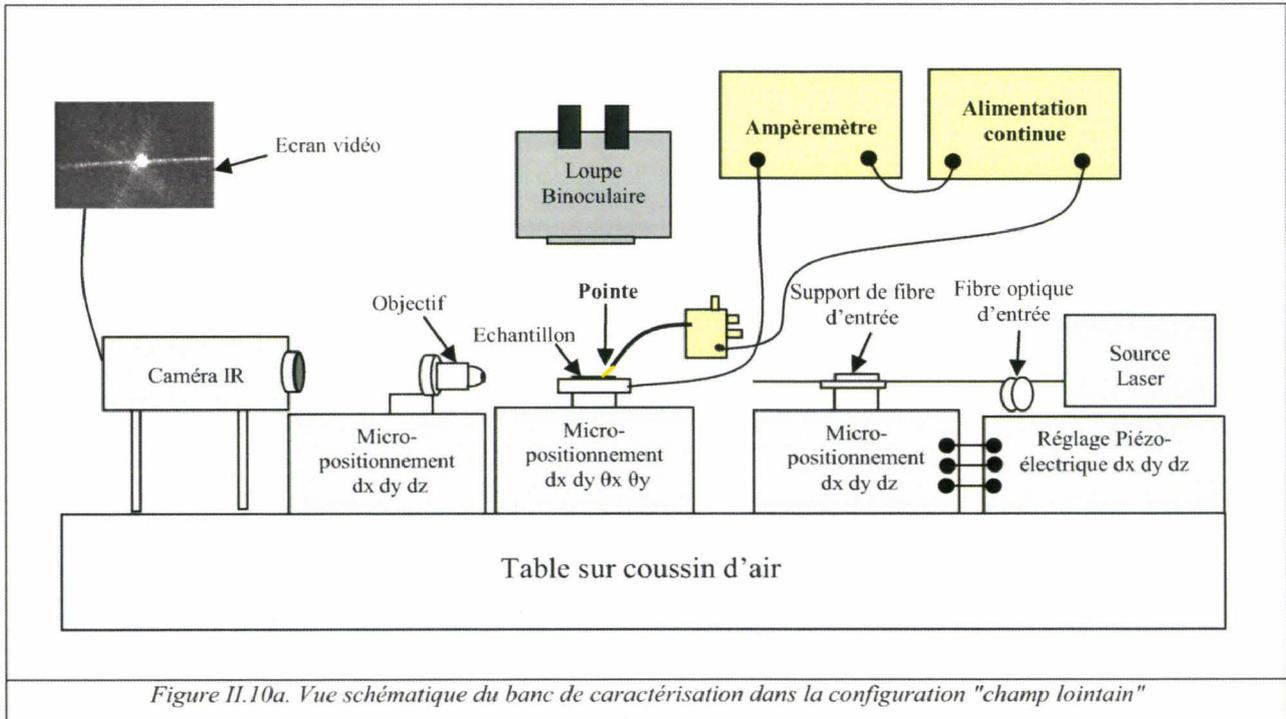
La première caractérisation concerne la mesure de l'indice optique complexe du GaAsSbN. Dans ce but nous avons fait des mesures par ellipsométrie de l'indice optique et du coefficient d'extinction en fonction de la longueur d'onde pour des valeurs comprises entre 600nm et 1600nm, sur la couche de GaAsSbN d'épaisseur 0,5 μ m épitaxiée sur GaAs semi-isolant. Les résultats sont présentés figure II.9. On constate une discontinuité aux environs de 1350nm correspondant à l'énergie de bande interdite du semi-conducteur conformément au spectre de photoluminescence (insert droit figure II.9), avec une diminution de l'indice pour les longueurs d'onde les plus grandes. Le coefficient d'extinction est lui aussi plus faible au-delà de la longueur d'onde de coupure, mais la traduction en coefficient d'absorption (insert gauche de la figure II.9) montre l'existence d'une absorption résiduelle au-delà de l'énergie de bande interdite du semi conducteur. Celle-ci est attribuée par l'équipe de Professeur Yoon Soon Fatt à l'existence d'états dans la bande interdite liés à des défauts, se traduisant par une photoluminescence autour de 0,825eV (figure II.9) [15].

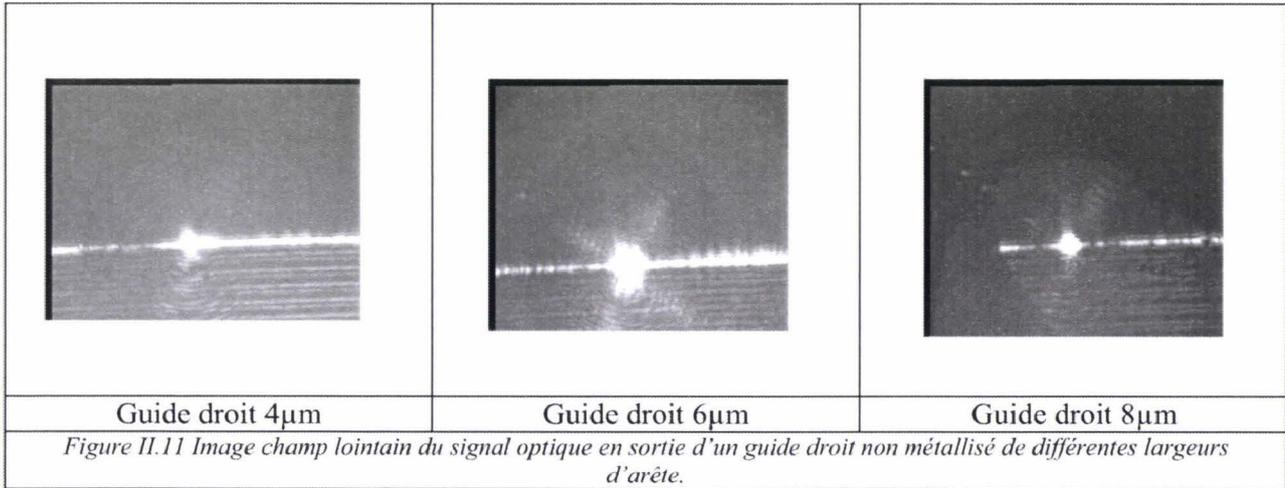


II.5.3.2. Caractérisations statiques des guides passifs et actifs

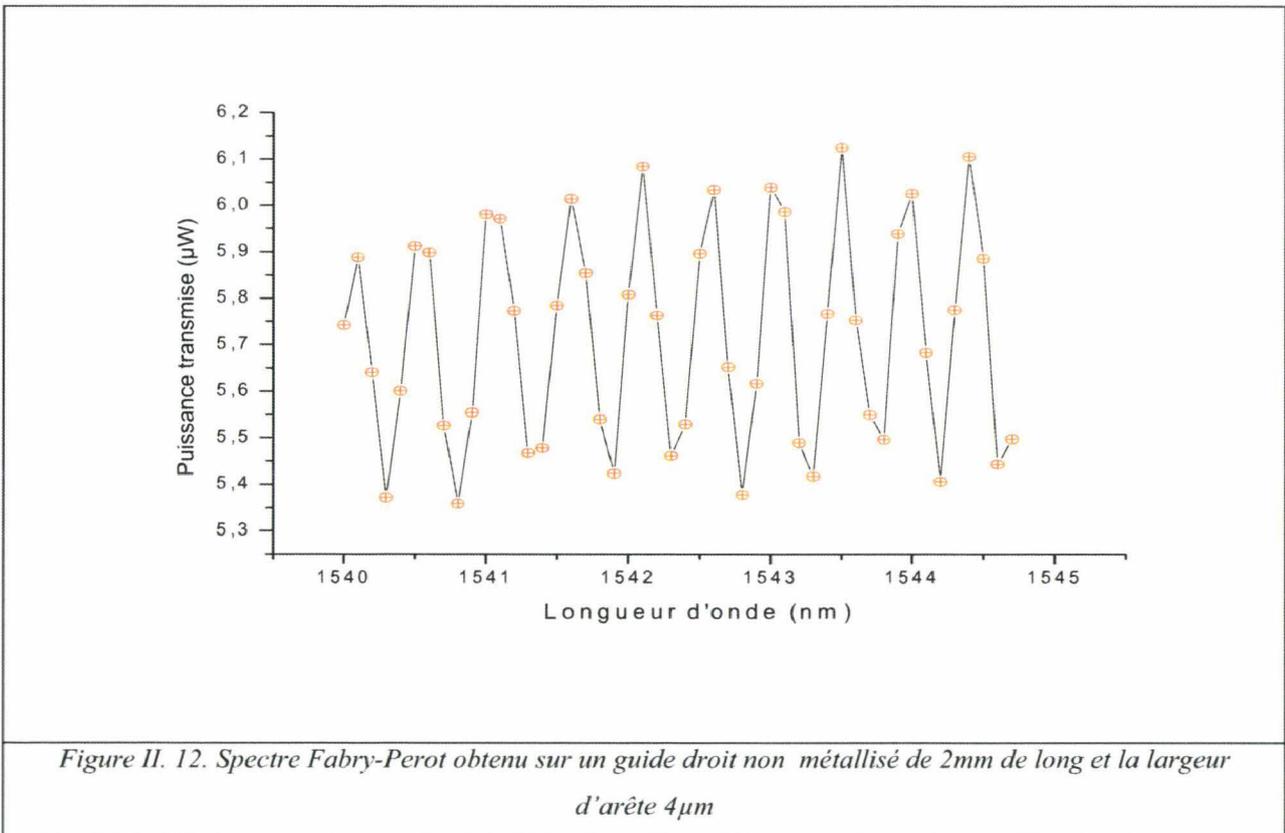
Nous avons ensuite mesuré les pertes de propagation des guides passifs fabriqués à l'aide de l'hétérostructure GaAs/GaAsSbN/GaAs. Le banc utilisé est le même que celui présenté au chapitre précédent, paragraphe I.6.1 [23-24]. Il permet des mesures de champ lointain en sortie du guide optique avec une caméra via un objectif de microscope. La liaison optique entre la source laser et l'échantillon est

effectuée par une fibre lentillée de diamètre de mode de $4,5\mu\text{m}$. En sortie d'échantillon, on place une fibre clivée de diamètre de mode de $9\mu\text{m}$; cette fibre est reliée à un multimètre optique. Les autres équipements utilisés sur ce banc sont présentés figure II.10a et figure II.10b. Nous y rappelons une vue schématique de ce banc de mesures dans la configuration champ lointain et la configuration fibre à fibre respectivement. La longueur d'onde de travail se situe toujours aux environs de $1,55\mu\text{m}$. Les dispositifs caractérisés sont des guides droits passifs avec différentes largeurs de $4\mu\text{m}$, $6\mu\text{m}$, $8\mu\text{m}$.



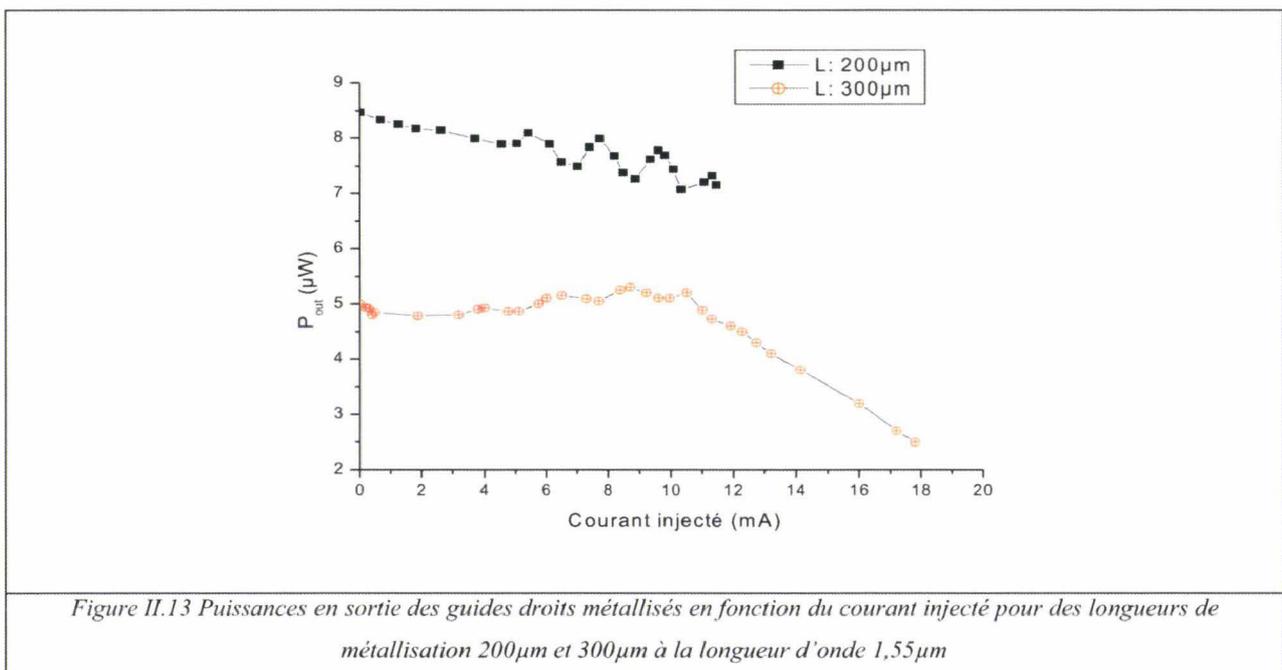


Nous montrons figure II.11 l'image champ lointain du signal optique en sortie de guide droit non métallisé pour les différentes largeurs d'arête. La tâche optique apparaît monomode pour les arêtes les plus étroites et semble bi-mode pour l'arête la plus large (8µm). Nous avons ensuite caractérisé ces guides droits en termes de pertes optiques. Nous avons mesuré les pertes de propagation d'un guide droit non métallisé en utilisant la technique du Fabry-Perot [25-26]. A titre d'exemple, nous donnons les interférences Fabry-Perot d'un guide de longueur 2mm (figure II.12) et de la largeur d'arête 4µm



L'expérience a été menée autour de $1.55\mu\text{m}$ pour une puissance d'entrée d'environ 1mW . Les pertes de propagation déduites de la relation $\alpha_p = \frac{10}{L} \text{Log}_{10} \left[\frac{1}{R} \frac{\sqrt{c}-1}{\sqrt{c}+1} \right]$, [27] dans les trois guides de différentes largeurs, se situent aux environs de $4,5\text{dB/mm}$.

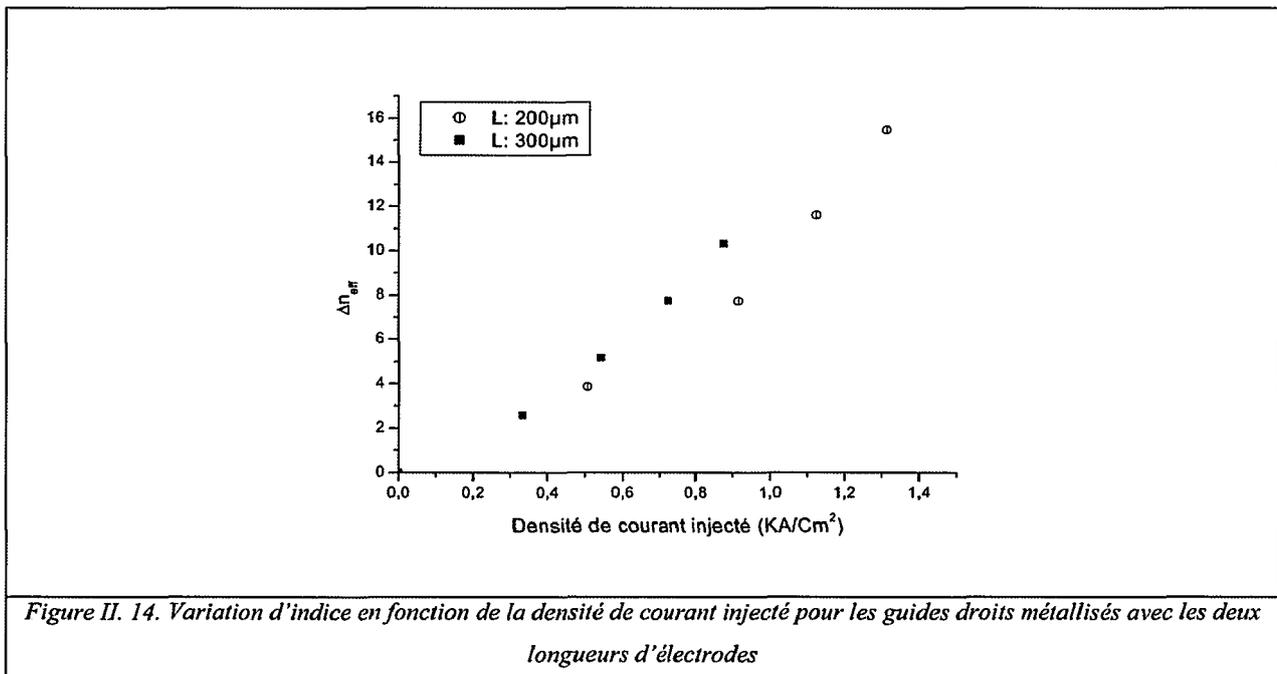
Nous avons effectué le même genre d'expériences pour les guides actifs métallisés de longueur totale $1,1\text{mm}$ et $2,4\text{mm}$, avec une longueur d'électrode de $200\mu\text{m}$. Les pertes d'insertion s'élève à $28,5\text{dB}$ pour les dispositifs de $2,4\text{mm}$ de long et $20,8\text{dB}$ pour celui de $1,1\text{mm}$ de long. Les mesures par Fabry Perot donnent des pertes de propagation qui se situent aux environs de 7dB/mm . Par comparaison avec les guides passifs, nous en déduisons des pertes dues à la métallisation de l'ordre 2dB/mm . La comparaison des pertes de propagations avec les pertes d'insertion donne aussi les pertes de couplage, qui sont typiquement de 6dB par face. Ces pertes de couplage importantes s'expliquent par la forte désadaptation entre le mode optique de la fibre et celui du guide. Notamment, le mode de la fibre est circulaire, alors que celui du guide est très ellipsoïdal.



Nous avons ensuite mesuré les variations d'indice consécutives à l'injection d'un courant dans les guides actifs métallisés. Différentes longueurs d'électrode ont été utilisées. Le banc de caractérisation est celui prévu pour les composants actifs. Il est présenté figure II.10b.

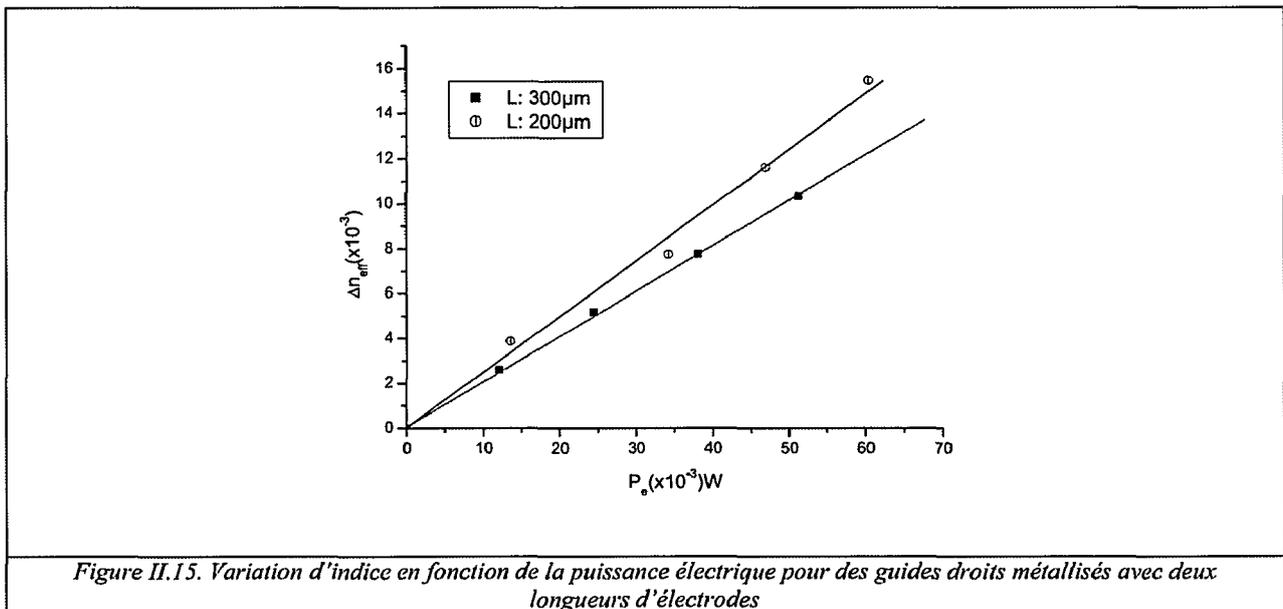
Les résultats sont présentés figure II.13 pour deux longueurs de métallisation, $200\mu\text{m}$ et $300\mu\text{m}$. Il s'agit de la mesure de la puissance optique de sortie en fonction du courant injecté dans le guide d'onde à l'aide de la structure PIN. La longueur d'onde de travail est évidemment 1550nm . On constate l'existence

d'oscillations de faible amplitude au fur et à mesure de l'injection du courant électrique. Ces oscillations traduisent l'existence de franges d'interférences dans la cavité Perot-Fabry, et par conséquent d'une variation d'indice du matériau consécutive à l'injection du courant électrique. Il aurait été intéressant de déterminer si cette variation est positive ou négative lorsqu'on augmente le courant électrique. Cependant les oscillations étant très faibles, cette expérience s'est avérée délicate à mettre en œuvre, compte tenu de l'instabilité mécanique qui accompagne cette mesure. Il est donc impossible d'utiliser cette expérience pour connaître si la variation d'indice est consécutive à un effet d'injection de porteurs comme dans les structures PIN à base d'InP, ou d'un effet thermique comme dans les structures InP à contact Schottky. De même il nous est impossible, au cours de cette expérience de savoir si les variations des niveaux moyens de la puissance de sortie sont une conséquence des effets d'injection de porteurs ou s'il s'agit d'une simple instabilité mécanique. Les données expérimentales sont par conséquent délicates à traiter, puisque ces guides sont caractérisés par beaucoup de pertes de propagation qui expliquent les faibles oscillations de l'effet Perot-Fabry. Malgré ces difficultés expérimentales, nous avons cherché à déterminer la variation d'indice consécutive à l'injection d'un courant en fonction du courant injecté. La méthode utilisée est celle présentée au chapitre 1 paragraphe I.6.2.1.1. La figure II.14 présente cette variation d'indice en fonction de la densité de courant injectée dans chacun des deux échantillons. On note une assez bonne superposition de ces deux courbes qui tendrait à vérifier la justesse des valeurs annoncées sur ces graphes. On note également une variation d'indice qui semble suivre une loi plutôt en puissance ou parabolique en fonction de la densité de courant injectée. Ce comportement fait penser à celui obtenu avec nos dispositifs en InP à contact Schottky présentés au chapitre précédent. Autrement dit, on pourrait soupçonner une variation d'indice consécutive à un effet thermique.



C'est pourquoi, en suivant la même idée que celle présente au premier chapitre, nous avons tracé figure II.15 cette variation d'indice en fonction de la puissance électrique appliquée au guide actif. La variation est tout à fait linéaire et semble confirmer l'hypothèse d'un effet thermique. La pente de ces droites n'est pas tout à fait dans les rapports des longueurs d'électrodes ce qui pourrait être dû à l'échauffement des guides à l'extrémité des électrodes, sachant que celles-ci sont relativement courtes.

L'existence d'un effet thermique, alors que nous avons une structure PIN, pourrait être une conséquence d'une métallisation d'électrode de 350nm, et d'une couche GaAsSbN à très fort dopage résiduel qui masquerait toute injection de porteurs.

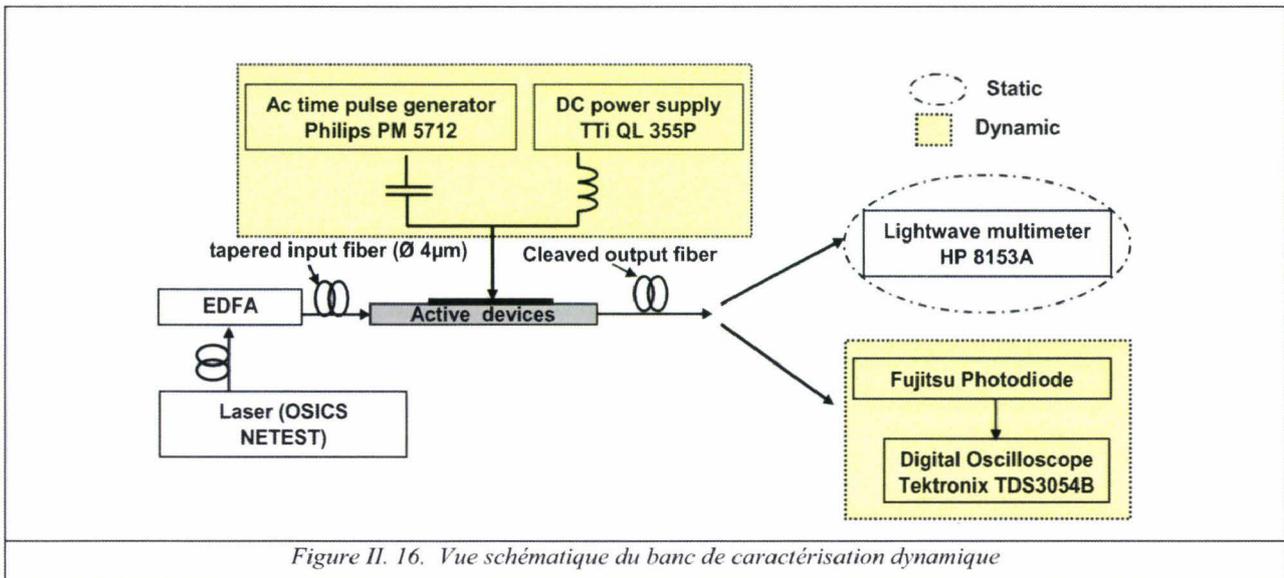


II.5.3.3. Caractérisation dynamique des guides actifs

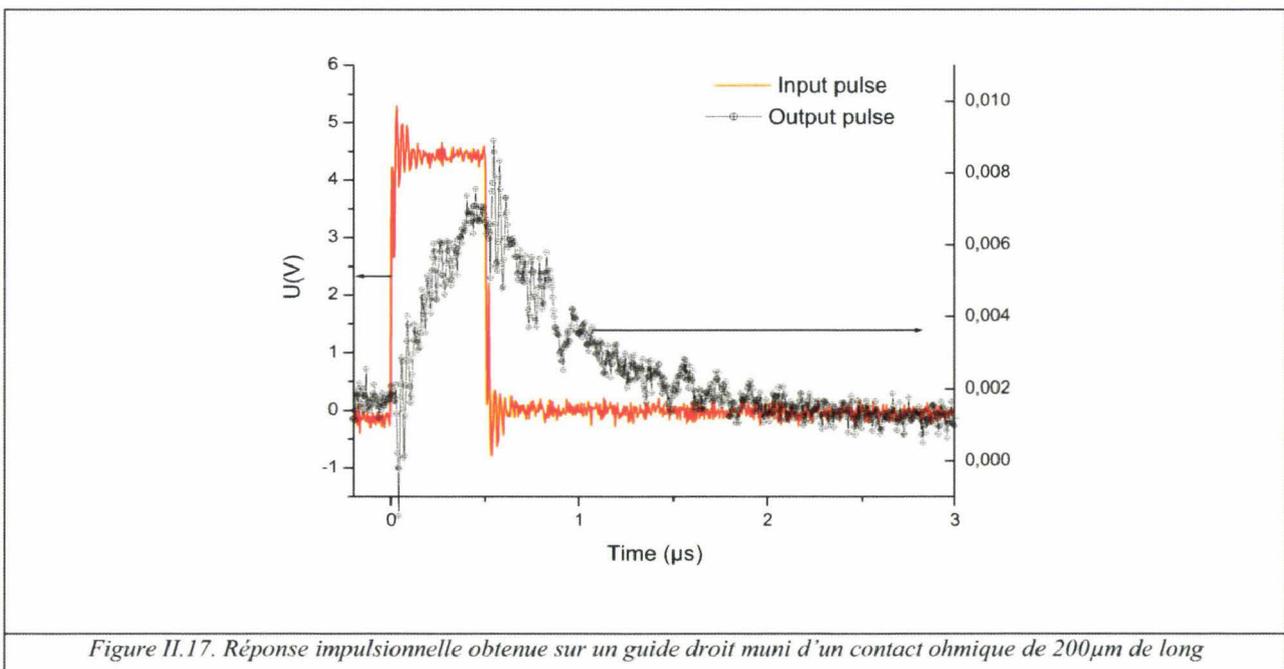
Pour préciser l'origine physique de la variation d'indice il nous a semblé opportun d'effectuer une caractérisation dynamique, comme celle que nous avons mise en œuvre au premier chapitre paragraphe I.6.4. Notamment, nous avons noté lors de la caractérisation de la variation d'indice dans des structures guide d'onde InP à contact Schottky, que les temps de réponses pour un effet thermique se situent environs de la microseconde [28]. Il est bien connu que ces temps de réponses se réduisent à quelques nanosecondes pour des variations d'indice consécutives aux effets de porteurs libres [29].

Cette caractérisation dynamique se présente donc, à notre avis, comme un autre moyen, complémentaire de ceux déjà utilisés, pour comprendre l'origine physique de ces variations d'indice.

L'expérience que nous avons menée utilise le banc de mesure que nous avons déjà présenté au chapitre I, paragraphe I.6.4. Il est rappelé figure II.16.



Comme pour les structures sur InP, nous injectons une impulsion de $0,5\mu\text{s}$ de largeur répétée toutes les millisecondes ; le signal électrique issu de la photodiode représente le temps de passage entre un état sans courant électrique injecté et avec courant électrique injecté. Cette réponse impulsionnelle est la traduction du temps que met le dispositif pour passer d'un indice optique donné à une autre valeur d'indice optique. On constate figure II.17, que le temps de montée est sensiblement de l'ordre de $0,5\mu\text{s}$ et le temps de descente de l'ordre de la microseconde. Autrement dit, le temps de réponse de ce dispositif à une sollicitation électrique qui change la valeur de l'indice optique est tout à fait comparable à ce que nous avons obtenu pour les structures InP à contact Schottky. Les temps de réponses assez longs (une microseconde) ainsi obtenus semblent donc confirmer, l'interprétation d'une variation d'indice en termes d'effet thermique.



I.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exploré les potentialités d'une nouvelle filière de matériaux, le GaAsSbN faiblement nitruré et antimonié, dont la croissance est effectuée par jets moléculaires assistés plasma RF en accord de maille sur substrat GaAs, pour des applications en guide d'onde passif et actif. Nous avons tout d'abord montré que ces matériaux ont, à la longueur d'onde 1550nm, un indice optique supérieur à celui de GaAs. Il en résulte qu'il est possible d'utiliser ces matériaux en double hétérostructure GaAs/GaAsSbN/GaAs, de façon analogue à la filière InP, pour la réalisation de guides optiques. Cette façon de procéder évite l'introduction d'une couche d'isolation optique traditionnellement indispensable en filière GaAs, puisque le matériau d'indice plus élevé était jusqu'à présent le GaAs qui est aussi le matériau du substrat. Nous avons déterminé les pertes de propagation dans des guides d'onde en arête. Celles-ci sont très importantes et sont compatibles avec les pertes liées à une absorption résiduelle dans ces matériaux, pour des longueurs d'ondes optiques supérieures à la longueur d'onde de coupure de l'énergie de bande interdite de ce semi-conducteur. Cette absorption résiduelle a été interprétée, à la suite des travaux de l'équipe du Professeur Yoon Soon Fatt, en termes de défauts dans le matériau. Nous avons ensuite étudié les variations d'indice consécutives à l'injection d'un courant électrique dans une structure PIN à base de cette hétérostructure. Malgré la difficulté expérimentale rencontrée, il semble bien que les variations mises en évidence résultent d'un effet thermique, bien que la structure soit en principe PIN. Il est possible qu'un dopage résiduel important dans la couche de cœur en GaAsSbN, masque les effets d'injection de porteurs, et donc seul l'effet thermique serait ainsi perceptible. L'amélioration des performances de ces guides passifs et actifs devrait donc s'inscrire dans une optimisation des conditions de croissances adaptées à l'optique intégrée.

I.7. Références

- [1] A. J. N. HOUGHTON, D. A. ANDREWS, G. J. DAVIES, and S. RICHIE
Low-Loss optical waveguides in MBE-grown GaAs/GaAlAs heterostructures
Opt Commun, Vol. 46, N°3-4. pp. 164-166, 1983
- [2] H. INOUE, K. HIRUMA, K. ISHIDA, T. ASAI, and H. MATSUMURA
Low-Loss GaAs optical waveguides
J. Lightwave Technol. T-3, 1270, 1985
- [3] H. HIRUMA, H. INOUE, K. ISHIDA, and H. MATSUMURA
Low Loss GaAs optical waveguides grown by the metalorganic chemical vapour deposition method
Appl. Phys. Lett. 47, 186, 1985
- [4] E. KAPON, R. BHAT
Low-Loss single-mode GaAs/AlGaAs optical waveguides grown by organometallic vapour phase epitaxy
Appl. Phys. Lett. 50, 1628, 1987
- [5] M. SETO, A. SHAHAR, R. J. DERI, W. J. TOMLINSON, and A. YI-YAN
GaAs/AlGaAs Single-mode optical waveguides with low propagation loss and strong optical confinement
Appl. Phys. Lett. 56, 990, 1990
- [6] R. J. DERI, E. KAPON
Low-Loss III-V semiconductor optical waveguides
IEEE J. Quantum Electron. Vol. 27, N°. 3? PP. 626-640, 1991
- [7] S. WICAKSONO, S. F. YOON, W. K. LOKE, K. H. TAN, and B. K. Ng
Effect of growth temperature on closely lattice-matched GaAsSbN intrinsic layer for GaAs-based 1.3 μ m p-i-n photodetector.
J. Appl. Phys. 99, 104502, 2006
- [8] K. H. TAN, S. F. YOON, W. K. LOKE, S. WICAKSONO, K. L. LEW, A. STOHR, O. ECIN, A. POLOCZEK, A. MALLOCI, and D. JAGER
High-speed picosecond pulse response GaNAsSb p-i-n photodetectors grown by RF plasma-assisted nitrogen molecular beam epitaxy
Appl. Phys. Lett. Vol. 90, N°. 18, pp. 183515-1_183516-3, 2007
- [9] W. K. LOKE, S. F. YOON, K. H. TAN, S. WICAKSONO, and W. J. FAN
Improvement of GaInNAs p-i-n photodetector responsivity by antimony incorporation
Appl. Phys. Lett, 101, 033122, 2007
- [10] Y. X. DANG, W. J. FAN, S. T. Ng, S. WICAKSONO, S. F. YOON and D. H. ZHANG
Study of interdiffusion in GaAsSbN/GaAs quantum well structure by ten-band K.p method
J. Appl. Phys. 98. 026102, 2005

- [11] S. WICAKSONO, S. F. YOON, K. H. TAN, and W. K. LOKE
Characterization of small-mismatch GaAsSbN on GaAs grown by solid source molecular beam epitaxy
 J. Vac. Sci. Technol. B, Microelectron Process. Phenom, Vol. 23, n° 3? PP. 1054- 1059, may 2005
- [12] S. WICAKSONO, S. F. YOON, W. J. FAN, and W. K. LOKE
Proceedings of the 2005 International Conference on Indium Phosphate and Related Materials Glogow, Scotland
 IEEE, pp. 421-423, New York, 2005
- [13] S. WICAKSONO, S. F. YOON, W. K. LOKE, K. H. TAN, K. L. LEW, M. ZEGAUI, J. P. VILCOT, D. DECOSTER, and J. CHAZELAS
“Effect of growth temperature on defect states of GaAsSbN intrinsic layer in GaAs/GaAsSbN/GaAs photodiode for 1.3µm application”
 J. Appl. Phys, 102, 044505, 2007
- [14] W. K. LOKE, S. F. YOON, S. WICAKSONO, K. H. TAN, and K. L. LEW
“Defect-induced trap-assisted tunnelling current in GaInAsN grown on GaAs substrate”
 J. Appl. Phys, Vol. 102, n° 5, pp. 05501-1-054501-6, sep 2007
- [15] K. H. TAN, S. F. YOON, W. K. LOKE, S. WICAKSONO, Z. XU, T. K. Ng, K. L. LEW, N. SAADSAOUD, M. ZEGAUI, D. DECOSTER and J. CHAZELAS
1.55µm GaAs/GaAsSbN/GaAs optical waveguides grown by radio frequency nitrogen plasma-assisted molecular beam epitaxy
 Appl. Phys. Lett. 92. 113513, 2008
- [16] X. ZU, S. F. YOON, W. K. LOKE, C. Y. NG, K. H. TAN, S. WICAKSONO, N. SAADSAOUD, D.DECOSTER, M. ZEGAUI and J. CHAZELAS
Design considerations for 1.3µm GaAsSbN-GaAs high speed and high quantum efficiency waveguide photodetectors
 J. Lightw. Technol, Vol. 27, n°. 13, pp. 2518-2524, Jul. 2009
- [17] A. R. CLAWSON
Guide to references on III-V semiconductor chemical etching
 Materials Science and Engineering, Vol.31, Issues 1-6, pp. 1-438, 2001
- [18] G. C. DESALVO, W. F. TSENG, J. COMAS
Etch and selectivities of citric acid/hydrogen peroxide on GaAs/AlGaAs/InGaAs/InAlAs, and InP
 Journal Electrochemical Soc, Vol. 139, n°3, pp. 831, 1992
- [19] M.ZEGAUI, N.CHOUEIB, P. TILMANT, M. FRANCOIS, C. LEGRAND, J.CHAZELAS, D.DECOSTER
A novel bondpad report process for III-V semiconductor devices using full HSQ properties
 Microelectronic Engineering 86, pp. 68-71,2009
- [20] K. BLARY
Matrices de commutation optiques sur InP
 Thèse, Université de Lille 1, 05 décembre 2003
- [21] K. JANG, K. LEE, J. KIM, S. HWANG, J.LEE, S.K. DHUNGEL, S. JUNG, J. YI

Effect of rapid thermal annealing of sputtered aluminium nitride film in an oxygen ambient

Materials Science in Semiconductor, Vol. 9, pp. 1137-1141, 2006.

[22] A. KADOUN, D. BARBIER

Compared rapid thermal annealing procedures of InP

Materials Science in Semiconductor B90, Vol. 9, pp. 110-113, 2002

[23] M. ZEGAOU

Commutation électro-optique à haute diaphotie sur InP

Thèse, Université de Lille 1, 27 Mai 2005

[24] N. CHOUËIB

Matrices de commutation par effets d'injection de porteurs sur InP

Thèse, Université de Lille 1, 14 Février 2008

[25] A. BEURAIN, S. DUPONT, H. W. LI, J.P. VILCOT, C. LEGRAND, J. HARARI, M. CONSTANT, D. DECOSTER

Characterization and fabrication of InGaAsP/InP deep-etched micro-waveguides

Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 40, n° 3, pp. 216-218, 2004

[26] T. FEUCHTER, C. THIRSTRUP

High precision planar waveguide propagation loss measurement technique using a Fabry-Perot cavity

IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 6, n° 10, pp. 1244-1247, 1994

[27] SCHRAND, G. MULLER, L. STOLL, U. WOLFF

Simple measurement of carrier-induced refractive index change in InGaAsP pin ridge waveguide structures

Electronics Letters, Vol.27, n°4, pp.297, 1991

[28] N. SAADSAOUD, M. ZEGAOU, D. DECOSTER, E. DOGHECHE, X. WALLART, J. CHAZELAS

High thermally induced index variations with short response time in InP/GaInAsP/InP waveguide Schottky diodes

Electronics Letters, Vol.45, n°15, 2009

[29] M. ZEGAOU, J. HARARI, J.P; VILCOT, F. MOLLOT, D. DECOSTER, H.W. LI, J. CHAZELAS

Determination of carrier-induced optical index and loss variation in GaInAsP/InP heterostructures from static and dynamic Mach-Zehnder interferometer measurements

Electronics Letters, Vol. 41, n° 16, pp. 1019-1020, August 2004

Chapitre III : Photodiode de puissance sur InP couplée monolithiquement à un guide d'onde multimode dilué

III.1. Motivations pour la photodiode de puissance

Les photodiodes de puissance à fréquences élevées à la longueur d'onde $\lambda=1,55\mu\text{m}$ représentent un besoin aussi bien pour les télécommunications optiques haut débit que pour le développement des antennes à balayage électronique alimentées optiquement. Ce besoin s'exprime pour les futurs systèmes hyperfréquences de Thales, et l'un des composants à réaliser dans le Plan d'Etude Amont ORGE de la DGA est une photodiode dont la fréquence de coupure excède 20 GHz, le coefficient de réponse atteint 0,9A/W, et qui soit capable de délivrer des photocourants dynamiques atteignant 50 mA.

Ces objectifs représentent un véritable challenge aussi bien du point de vue de la physique des semiconducteurs et des composants, que de point vu de la technologie à mettre en œuvre. Depuis les travaux sur les diodes à un seul type des porteurs, dites photodiode à transport unipolaire UTC (Uni Travelling Carrier) [1], et depuis les travaux menés conjointement avec le 3-5 Lab dans le projet RNRT Popeye, on sait que l'association monolithique d'un guide d'onde optique multimode dilué couplé de façon évanescente à une photodiode UTC en filière InP, permet d'atteindre des performances sensiblement équivalentes ; le 3-5 Lab a ainsi démontré, avec l'IEMN, des photodiodes capables de délivrer un photocourant de 22 mA à la fréquence de 50 GHz [2].

Dans ce chapitre, nous explorons une nouvelle structure de photodiode guide d'onde multimode dilué à couplage évanescent, pour répondre au besoin défini dans le PEA ORGE. Ce composant représente une alternative à une autre photodiode UTC éclairée par le dessus et réalisée par le 3-5 Lab pour le PEA ORGE.

La photodiode que nous proposons a la particularité d'être une UTC modifiée, pour éviter un brevet NTT, selon un procédé déjà proposé par ailleurs [3]. Nous étudions dans ce chapitre un premier prototype, qui n'est pas le composant final du PEA ORGE, dans le but d'évaluer ses performances en termes de fréquence de coupure et de photocourant sous faible et forte puissance optique. Il s'agit notamment de vérifier si la structure proposée a les potentialités pour répondre aux besoins en performances élevées du PEA ORGE, et donc sera le bon marche-pied pour la définition du composant final.

III.2. Structure de la photodiode de puissance InP

Il est bien connu que les photodiodes à transport unipolaire sont bien adaptées aux fortes puissances et aux fréquences élevées [4]. Les effets d'écrantage par les photoporteurs dans la zone intrinsèque d'une photodiode PIN traditionnelle, qui apparaissent dès lors que la puissance optique est importante, sont très fortement annihilés dans la photodiode à transport unipolaire ou UTC (Uni Travelling Carrier) [5] (figure III.1) ; la raison en est que dans l'UTC, la couche absorbante est dopée de type P. Il en résulte que les

porteurs minoritaires photocr ees, c'est-à-dire ici les électrons, se déplacent par un mécanisme de diffusion. Leur mouvement est donc peu sensible à l'effet du champ électrique, qui est d'ailleurs quasiment absent dans cette couche absorbante dopée. Nous invitons le lecteur, pour plus de précision sur le fonctionnement d'une UTC, à se reporter à la thèse de Mourad Chtioui [6]. La contre-partie de ce mécanisme de diffusion, est que cette couche doit être suffisamment mince devant la longueur de diffusion des électrons [7]. Autrement dit, une UTC est une PIN pour lequel la couche absorbante est de type P, avec une couche absorbante en principe fine.

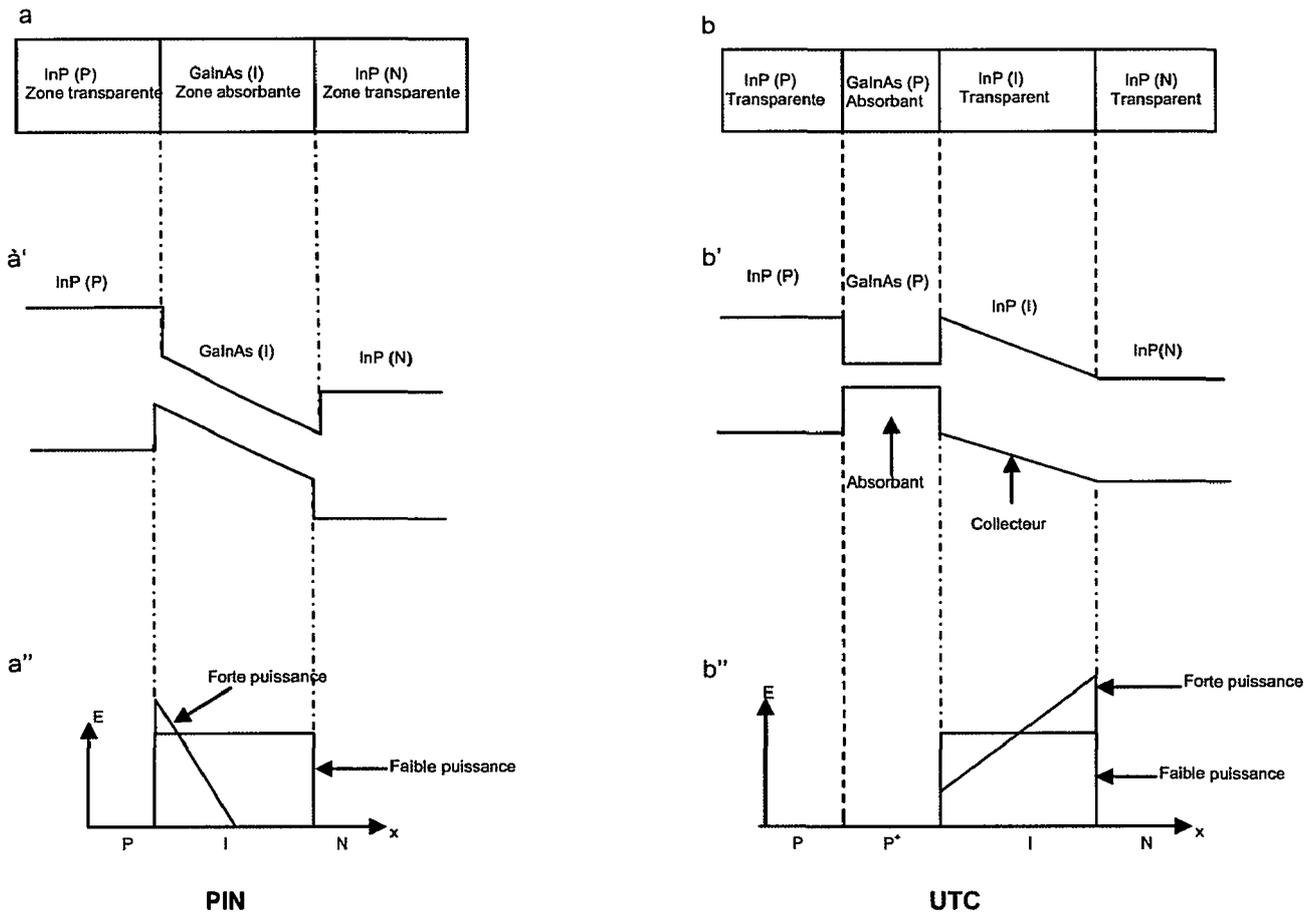
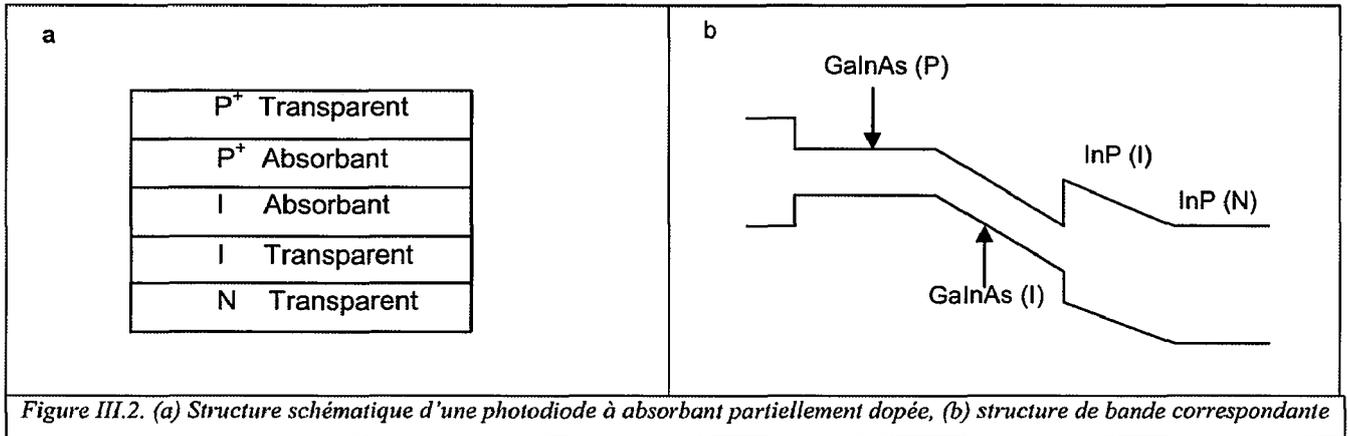


Figure III.1 Structure schématique d'une photodiode PIN (a) et UTC (b), structures de bande correspondantes (a' et b') et champs électriques sous faible et forte puissance optique (a'' et b'').

Cette couche absorbante fine implique qu'un éclairement par le dessus se traduit forcément par un rendement quantique faible ; on peut chercher à augmenter le rendement quantique en augmentant l'épaisseur de la couche absorbante, mais au détriment de la fréquence de coupure. Pour un fonctionnement jusqu'à 20GHz avec un fort rendement quantique, cette solution est difficilement réalisable ; la solution alternative est d'avoir recours à un guide optique. Les études effectuées dans le projet RNRT POPEYE, ont montré que l'intégration monolithique de la photodiode avec un guide dilué multimode permet d'obtenir un rendement quantique externe correct sans nuire à la bande passante [2]. C'est donc sur ce principe que nous avons envisagé initialement la structure du photodétecteur. Cependant

les impératifs industriels liés à l'existence d'un brevet pris par NTT, nous ont conduit à proposer une structure de photodiode qui évite ce brevet.

Les indications trouvées dans la littérature conduisent à une structure de photodiode PIN pour lequel une partie de la couche absorbante est de type P⁺, alors que l'autre est non dopée (figure III.2). C'est une PIN très voisine d'une UTC, ou une UTC modifiée [8].



Le fonctionnement est alors très voisin de celui d'une UTC, avec un champ électrique n'apparaissant que dans une toute petite partie de la couche absorbante. Si cette couche absorbante non dopée est très mince, le transit des porteurs dans cette région est suffisamment court pour que l'effet d'écrantage du champ électrique n'ait pas lieu ou soit très réduit [3]. On a donc ainsi une structure PIN qui fonctionne quasiment comme une UTC, mais qui n'est plus une UTC.

Nous avons présenté figure III.3a, la structure schématique de cette photodiode de puissance complète, avec son guide amorce pour le couplage avec la fibre optique. Pour précision, la structure présentée ici est prévue pour un couplage avec un mode optique de diamètre 2,5 μm . On notera pour le guide multimode dilué, la succession des couches InP/Quaternaire qui sont agencées de façon à créer l'équivalent d'une lentille à gradient indice. L'ensemble du dispositif a été entièrement modélisé par Vincent Magnin et Joseph Harari en utilisant des logiciels optiques (BPM) et électriques (dérive-diffusion) pour être compatible avec les performances recherchées : coefficient de réponse de 0,9A/W, bande passante de 20 GHz et photocourant maximal de 50 mA.

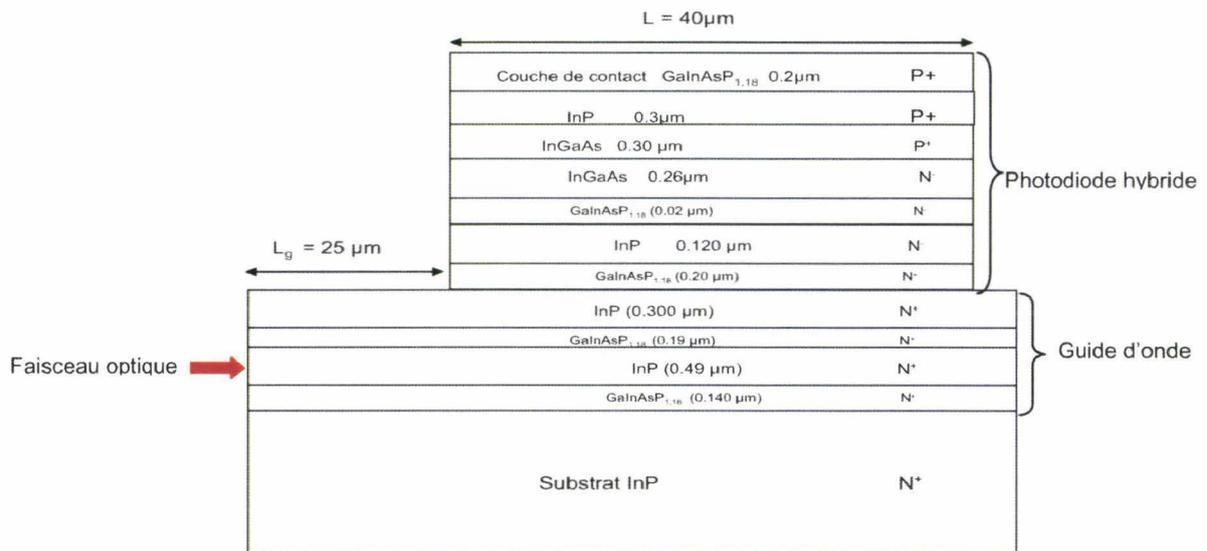


Figure III.3a. Structure schématique de la photodiode de puissance à couplage latéral par guide d'onde multimode dilué

A titre d'illustration nous montrons figure III.3b les résultats de modélisation optique par BPM, entreprise par Vincent Magnin, qui montre le couplage évanescent avec le faisceau optique montant dans la partie photodiode et absorbé dans cette région. On peut constater une bonne repartition de l'onde optique tout le long de la photodiode, ce qui devrait être favorable à un bon comportement sous forte puissance optique. Comme dans les chapitres précédents, un dépôt d'électrode face arrière, et un dépôt face avant associé à une planarisation pour le report du plot de contact, sont effectués.

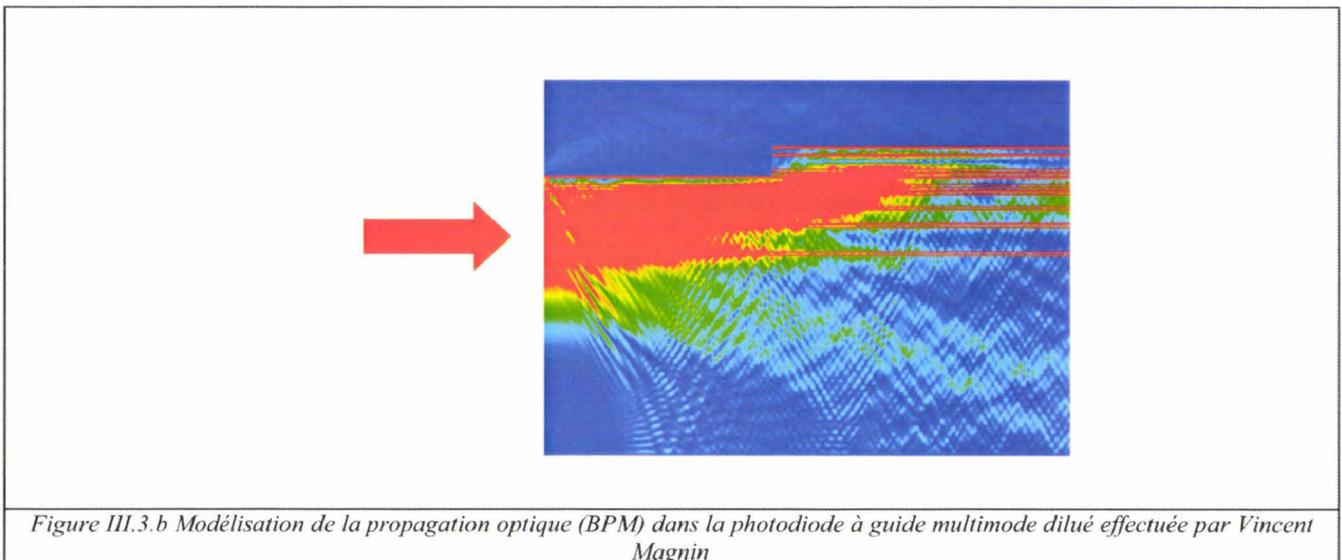
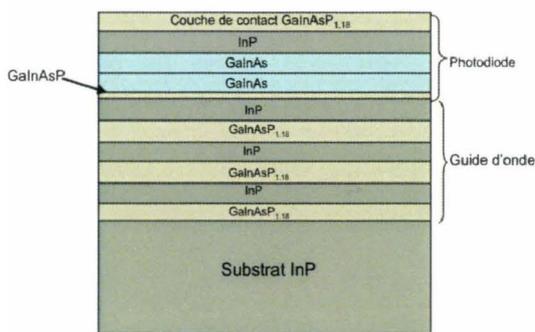


Figure III.3.b Modélisation de la propagation optique (BPM) dans la photodiode à guide multimode dilué effectuée par Vincent Magnin

III.3. Epitaxie

La croissance épitaxiale de cette structure a été réalisée par Christophe Coinon de l'équipe épitaxie à l'IEMN, dirigée par Xavier Wallart, sur un substrat de deux pouces de diamètre, dans un bati d'épitaxie par jets moléculaires sources gaz. Les structures sont celles de la figure III.4. La croissance a été effectuée sur un substrat InP N^+ . La couche guidante est constituée d'un quaternaire en GaInAsP et d'InP ; elle est dopée de type N^+ ; la composition du quaternaire est adaptée à la longueur d'onde 1,18 μ m accordé en maille sur InP, pour un fonctionnement à la longueur d'onde optique de 1,55 μ m. Ce quaternaire a un indice optique plus élevé que celui d'InP. Ce guide dilué multimode, mis en point par Vincent Magnin à l'aide d'une modélisation BPM, est constitué d'une succession de couches d'InP et GaInAsP. On notera que les couches d'InP constituant le guide diminuent en épaisseur vers la surface de l'épitaxie de façon à favoriser le couplage de la lumière avec la photodiode ; tout ce passe comme si l'indice « moyen » augmentait en s'approchant de la partie supérieure du guide optique ; cet accroissement d'indice est naturellement favorable à une montée de la lumière vers le haut de guide. La structure de la photodiode est constituée d'une couche de InGaAs partiellement dopée de type P^+ et d'une couche de contact à base de quaternaire GaInAsP. Des couches d'InP respectivement dopées P^+ et non dopées situées de part et d'autre du GaInAs absorbant sont équivalente à l'émetteur et au collecteur d'une photodiode UTC. Rappelons que le fait de doper partiellement la couche absorbante en GaInAs évite un brevet NTT sur les photodiodes UTC pour lesquelles la couche absorbante est entièrement de type P^+ . Ce procédé est proposé, par exemple, par J. C. Campbell aux Etats-Unis [3], [8].



Matériaux	Type	Epaisseur	Dopage
GaInAsP	P^+	0,2	8.10^{18}
InP	P^+	0,3	8.10^{18}
GaInAs	P^+	0,3	8.10^{18}
GaInAs	N^-	0,26	5.10^{15}
InGaAsP	N^-	0,02	5.10^{15}
InP	N^-	0,14	5.10^{15}
InGaAsP	N^+	0,20	2.10^{18}
InP	N^+	0,3	2.10^{18}
InGaAsP	N^+	0,19	2.10^{18}
InP	N^+	0,49	2.10^{18}
InGaAsP	N^+	0,14	2.10^{18}
InP substrat	N^+	#400	2.10^{18}

Figure III.4. Structure épitaxiale utilisée pour la fabrication des photodiodes de puissance

III.4. Etapes technologiques de fabrication des dispositifs d'essai

Nous présentons dans ce paragraphe les différentes étapes technologiques qui nous ont permis la réalisation technologique de ces photodiodes. Le schéma principe de la photodiode est donné figure III.5.

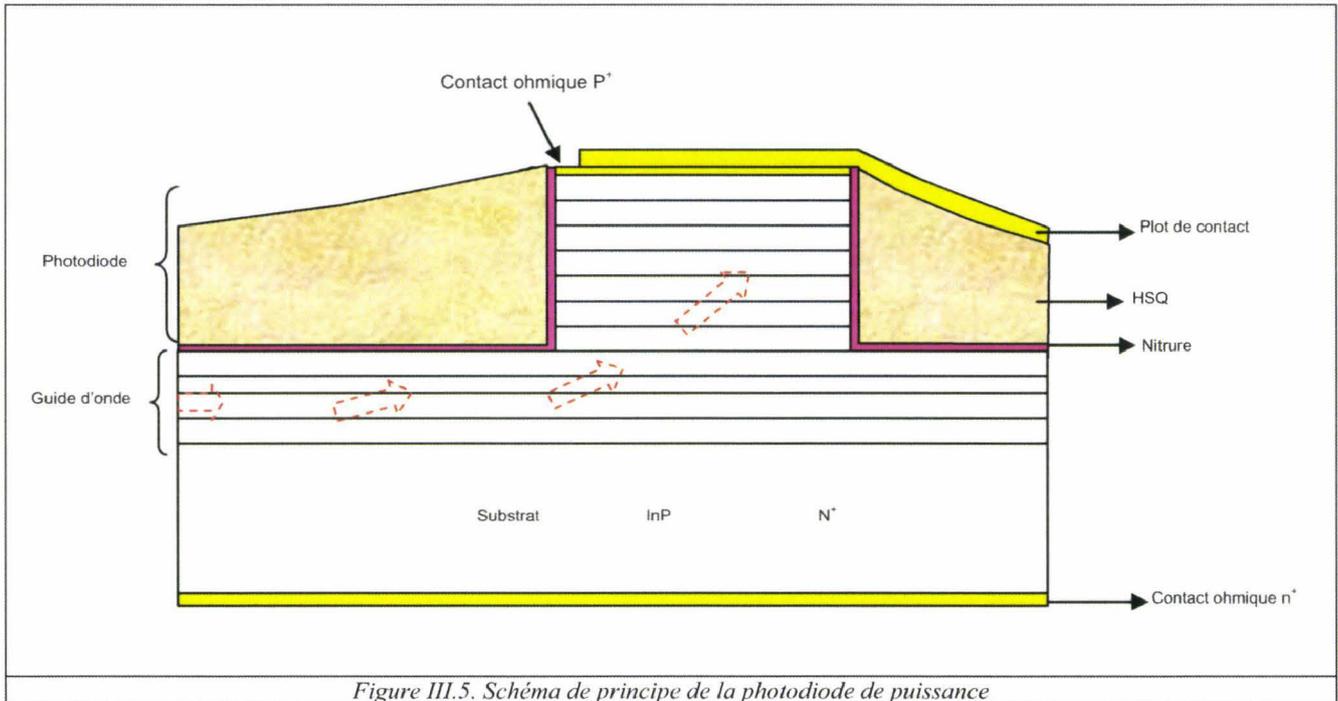


Figure III.5. Schéma de principe de la photodiode de puissance

La structure électrique est de type PIN microruban, avec un contact face avant et un contact face arrière sur le substrat.

Dans la suite de ce paragraphe nous présentons tout d'abord les principales étapes du processus technologique, puis dans un deuxième temps, une description détaillée de ce processus. Pour des raisons liées à la souplesse et la précision obtenue, nous avons choisi de fabriquer ces dispositifs à l'aide d'une lithographie électronique.

III.4.1. Principales étapes du processus technologique

III.4.1.1. Dépôt des électrodes

Nous utilisons un bicouche de résines électroniques positives (EL13% /PMMA3%) pour obtenir une forme casquette lors de la révélation (figure III.6).

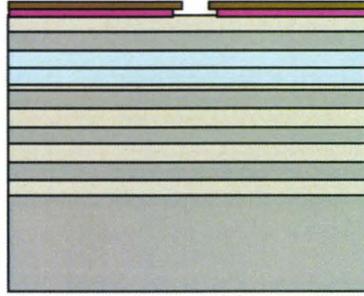


Figure III. 6. Coupe schématique de la plaque avec la résine électronique après révélation

Le dépôt des contacts ohmiques (figure III.7) est effectué par évaporation sous vide. Il est constitué de la séquence suivante de métaux : Pt/Ti/Pt/Au, suivie par un lift-off puis un recuit flash. Cette étape permet d'obtenir de meilleures résistances de contact, en faisant diffuser les métaux non alliés à la surface du matériau semiconducteur [9-10] ; ce recuit flash suppose une montée de la température de 20°C à 400°C pendant 10 secondes, dans un four appropriés ; l'échantillon reste à cette température pendant 40 secondes puis il sera refroidi en 30 secondes.

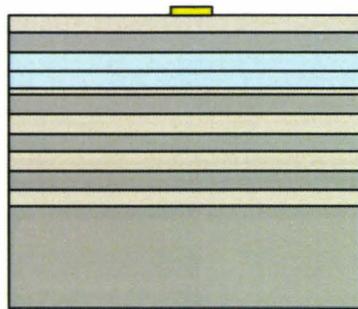


Figure III.7. Dépôt de contact ohmique

III.4.1.2. Gravure

La gravure de la partie active de la photodiode étant relativement profonde, nous utilisons un masque de résine électronique négative réversible qui sera transféré sur un masque de nitrure (figure III. 8).

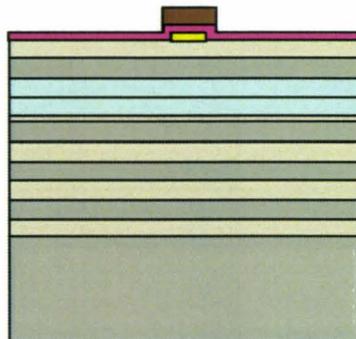


Figure III.8. Transfert du masque de résine sur Nitrure.

Lors de cette étape on utilise la gravure sèche « RIE » (figure III.9) ; nous invitons le lecteur à se reporter au chapitre I paragraphe I.4.1.1 pour s’informer sur les détails de cette gravure [11-15].

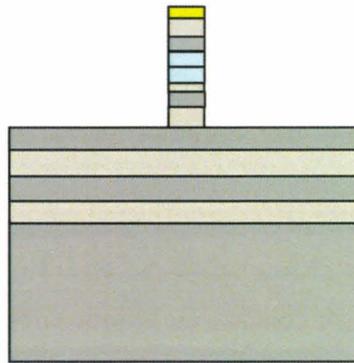


Figure III.9. Gravure des rubans « photodiode »

III.4.1.3. Planarisation

Nous utilisons une planarisation par HSQ (figure III.10). Cette technique a déjà été détaillée au paragraphe I.4.2.2 [16-17].

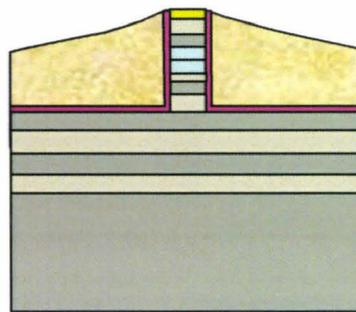


Figure III.10. Planarisation par HSQ

III.4.1.4. Report des électrodes

A ce stade de la réalisation du composant, une lithographie électronique et un dépôt d’une couche métallique (Titane/Or, 1000Å/6000Å) sont nécessaires pour réaliser les reports d’électrode qui permettront de récupérer le photocourant issu de la structure (figure III.11).

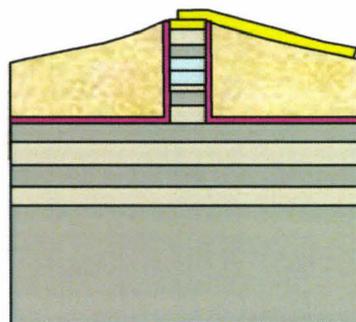


Figure III.11. Dépôt des plots d'épaissement

III.4.1.5. Contact N

Rappelons (voir chapitre précédent) que l'amincissement est une étape nécessaire avant de métalliser la face arrière pour faciliter le clivage. Cette technique a également été détaillée au chapitre I paragraphe I.4.2.3. Suit une métallisation face arrière Ti/Au par pulvérisation (figure III.12).

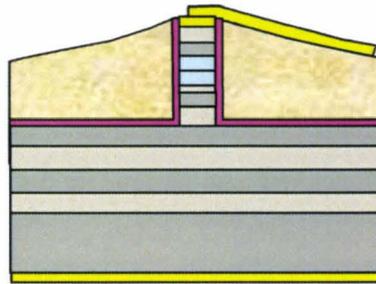


Figure III.12. Métallisation face arrière

III.4.2. Description détaillée du processus technologique

III.4.2.1. Composants réalisés

Etant données les dimensions auxquelles nous sommes confrontés, nous avons utilisé un masquage électronique en écriture directe. Les masques sont conçus à l'aide du logiciel Wavemaker®.

Nous présentons figure III.13 les masques correspondant aux quatre étapes principales pour la réalisation technologique : (dépôt d'électrodes, gravure, planarisation, report) ainsi qu'en figure III.14, la superposition de ces quatre masques ; cette superposition donne une idée de la géométrie du composant terminé.

	
1 ^{er} niveau : Dépôt d'électrode	2 ^{ème} niveau : Gravure
	
3 ^{ème} niveau : planarisation	4 ^{ème} niveau : Plots de contact
Figure III.13. Les différents niveaux de masques	

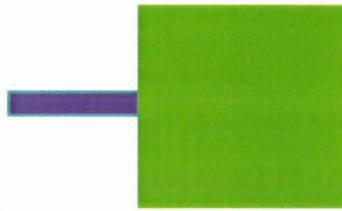


Figure III.14. Superposition des quatre niveaux de masques

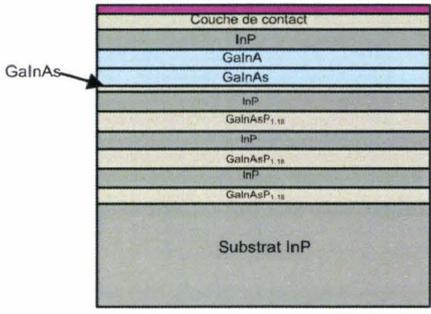
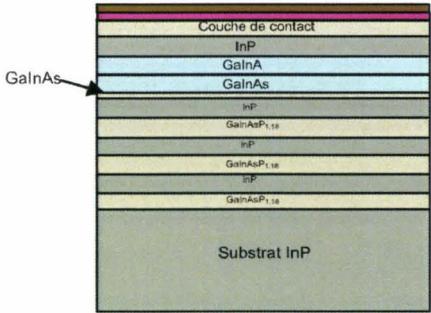
Nous donnons également une vue de la superposition de ces quatre masques pour l'ensemble des photodiodes à réaliser figure III.15. La rangée supérieure correspond à une longueur de diode de $30\mu\text{m}$. La deuxième rangée correspond à une diode de $40\mu\text{m}$ et la troisième rangée correspond à une diode de $50\mu\text{m}$. Rappelons que les photodiodes ont une largeur de $5\mu\text{m}$ compatible avec un guide d'onde. Pour chacune de ces rangées, nous avons répété la même configuration de photodiode qui comprend des longueurs de guide amorce différentes. Les différentes longueurs prévues s'échelonnent de $5\mu\text{m}$ à $50\mu\text{m}$ par pas de $5\mu\text{m}$. La longueur optimale, prévue par la modélisation, est de $25\mu\text{m}$. Cependant cette longueur est calculée en supposant tous les paramètres technologiques idéaux. Dans la réalité, ceux-ci sont donnés avec une certaine imprécision (épaisseur des couches, composition, profondeur de gravure...); cette imprécision peut se traduire par une modification de la longueur optimale du guide amorce. C'est pourquoi nous avons prévu une distribution de ces longueurs, pour compenser les éventuelles imprécisions technologiques. On peut également noter en haut et en bas de la vue d'ensemble du masque complet, les motifs d'alignement qui se présentent sous forme de carrés de dimension $8\mu\text{m} \times 8\mu\text{m}$.

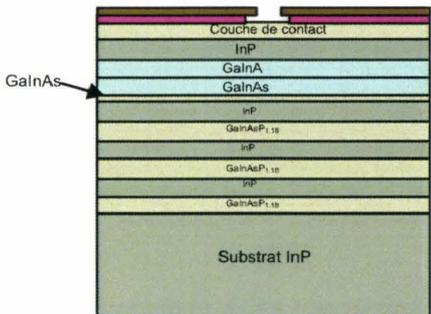


Figure III.15. Représentation du masque complet des photodiodes de puissances à réaliser

III.4.2.2. Détail des opérations technologiques

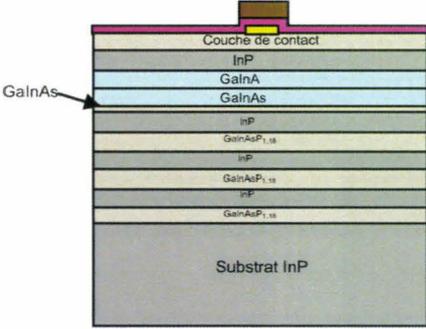
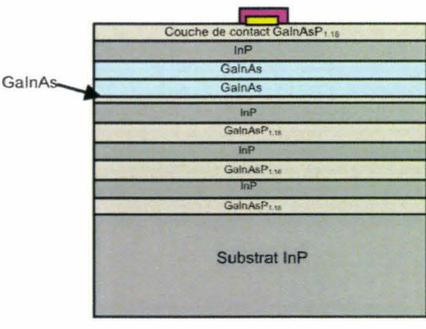
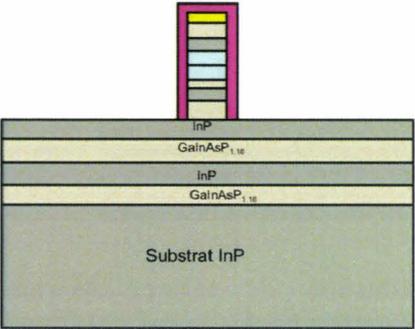
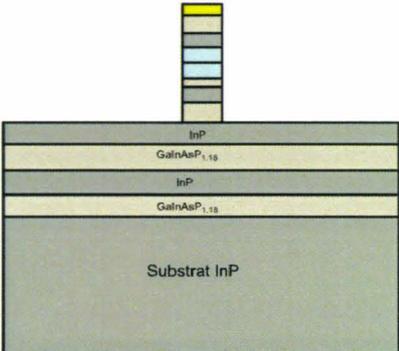
Les différentes opérations technologiques sont présentées de façon détaillée dans les tableaux suivants :

<ol style="list-style-type: none"> 1. Nettoyage du substrat à l'acétone et à l'alcool. 2. Déshydratation du substrat sur plaque chauffante pendant 10min à 200°C. 3. Enduction de EL 13% $v = 2900\text{rpm}$, $a = 1000\text{rpm/s}$, $t = 12\text{sec}$. <p>Recuit sur plaque chauffante pendant 1mn à 80°C, 10min à 180°C sur plaque chauffante</p>	
<ol style="list-style-type: none"> 4. Enduction de PMMA 3% $v = 3400\text{rpm}$, $a = 1000\text{rpm/s}$, $t = 12\text{s}$. 5. Recuit sur plaque chauffante pendant 1mn à 80°C, 10min à 180°C <p>L'épaisseur de EL 3% déposée est de 6680Å, tandis que l'épaisseur de PMMA 3% est de 630Å.</p>	
<p align="center"><i>Tableau III. 1. Description de l'enduction d'une bicouche de résines.</i></p>	

<ol style="list-style-type: none"> 6. Lithographie électronique tension = 50kV, dose = 180μC/cm² 7. Développement avec la solution : (1/3 MIBK, 2/3 IPA) agitée pendant 2min à 150tr/min, puis avec le substrat pendant 60sec à 100tr/min. 8. Rinçage pendant 30sec avec l'alcool isopropylique " IPA". 	
<p align="center"><i>Tableau III. 2. Description du procédé lithographique du profil en casquette.</i></p>	

<p>9. Métallisation par évaporation Pt/Ti/Pt/Au/Ti (100/300/100/3000/200Å)</p>	<p>10. Lift-off dans le remover Pg à 80°C pendant 3h 11. Recuit flash à 400°C pendant 35s</p>
<p><i>Tableau III.3. Représentation de la structure de l'échantillon pendant la métallisation et après le lift-off.</i></p>	

<p>1. Dépôt de 2000Å de nitrure par PECVD à la température de 260°C. 2. Recuit pleine plaque de 5 minutes à 200°C pour évaporer les solvants résiduels.</p>	<p>3. Pré-dépôt du promoteur d'adhérence HMDS : $v = 3000\text{rpm}$, $a = 1000\text{rpm/s}$, $t = 20\text{sec}$ 4. Enduction de résine électronique SAL 601 ; $v = 2000\text{rpm}$, $a = 1000\text{rpm/s}$, $t = 15\text{sec}$ 5. Recuit pleine plaque de 3 minutes à 105°C pour évaporer les solvants résiduels.</p>
<p><i>Tableau III.4. Procédé du dépôt de nitrure et de la résine</i></p>	

	
<p>6. Ecriture électronique : tension = 50kV, dose = $4\mu\text{C}/\text{cm}^2$.</p> <p>7. Inversion du masque par un recuit post-écriture pleine plaque à 115°C pendant 3min.</p> <p>8. Développement pendant 10 minutes dans 2 bains de MF 322.</p> <p>Rinçage à l'EDI pendant 30 secondes</p>	<p>9. Gravure du nitrure par plasma (CHF_3/CF_4) ; débits respectifs (20/20) sccm pendant 2min30s sous pression=50mT, puissance=185W,</p> <p>10. Nettoyage du masque de résine par plasma O_2, Débit : 20sccm, pression : 100mT, puissance : 100W et la tension : 320V pendant 5 minutes</p>
<p>Tableau III.5. Procédé de transfert de masque de résine sur le nitrure</p>	
	
<p>14. Gravure RIE d'InP, débits respectifs de (CH_4/H_2) débit respectifs (20/80)sccm, pression=30mT, puissance = 150W, tension = 35V.</p> <p>15. Plasma $\text{O}_2/100\text{sccm}$, pression =90mT, puissance = 100W, tension = 320V.</p>	<p>16. Gravure de nitrure par plasma (CHF_3/CF_4), débit respectifs (20/20)sccm pendant 2min minutes sous pression = 50mT, puissance = 180W, tension = 337V.</p>
<p>Tableau III.6. Procédé de gravure RIE, de l'InP, GaInAsP, InGaAs et du nettoyage du nitrure</p>	

La figure III.16 présente quelques photographies prises au Microscope Electronique à Balayage (MEB) lors de la gravure



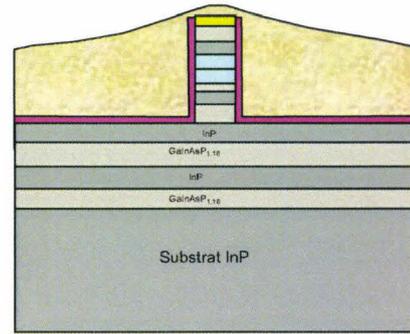
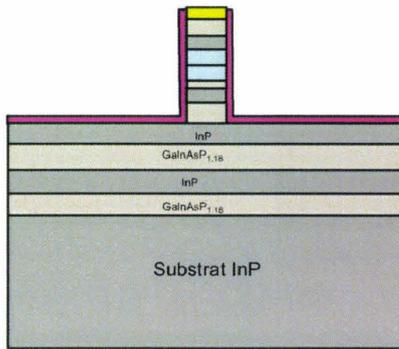
Figure III.16. Photographies de la gravure prises au Microscope Electronique à Balayage

A la fin de cette gravure, nous avons remarqué que la vitesse de gravure de l'InGaAs est très longue comparé à l'InP. La durée de la gravure totale est de l'ordre de 8nm/min.

	<ol style="list-style-type: none"> 1. Dépôt 80 nm de nitrure à une température de 260°C par PECVD. 2. Recuit en pleine plaque à une température 200°C pendant 5 minutes pour évaporer les solvants résiduels
	<ol style="list-style-type: none"> 3. Enduction de résine électronique EL13% v : 3400 rpm, a : 1000 rpm/s, t : 12s 4. Recuit en pleine plaque à 80°C pendant 1min ensuite à 180°C pendant 10min 5. Ecriture électronique (tension : 50kV, dose : 180μC/cm²) 6. Développement avec la solution : 1/3 MIBK, 2/3 IPA, agitée pendant 2min à 150tr/min, puis avec le substrat pendant 60sec à 100tr/min. 7. Rinçage pendant 30sec avec l'alcool isopropylique "IPA".

Tableau III.7. Procédé du dépôt de nitrure pour la planarisation





8. Gravure du nitrure au niveau de l'ouverture par plasma (CHF_3/CF_4), débits respectifs (20/20) pendant 2min minutes sous pression = 50mTorr, puissance = 180W, tension = 337V.

9. Retrait des résidus de résine par plasma O_2 , débit 30sccm pendant 5min sous pression = 100mTorr, puissance 100W.

10. Recuit flash à 360°C pendant 35s

11. Dépôt du promoteur d'adhérence HMDS :
 $v = 3000\text{rpm}$, $a = 1000\text{rpm/s}$, $t = 20\text{sec}$

12. Dépôt HSQ : $v = 1000\text{rpm}$, $a = 1000\text{rpm/s}$, $t = 30\text{s}$

13. Recuit en pleine plaque à une température 120°C pendant 10 minutes

14. Densification par plasma O_2 débits 50sccm, tension : 290W, pression : 100mTorr.

Tableau III.8 Procédé de planarisation par HSQ

15. Ouverture de la HSQ au dessus des électrodes des guides droits métallisés par RIE (CHF_3/CF_4), débits respectifs (20/20) sccm sous pression = 50 mTorr, puissance = 180W.

La vitesse de gravure est de 24nm/min

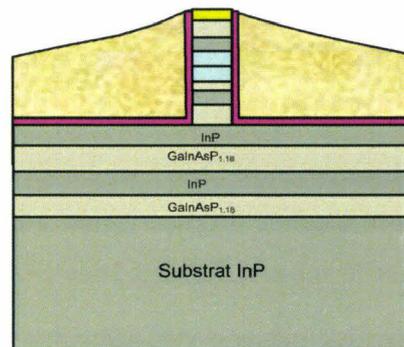


Tableau III.9. Procédé de gravure de la HSQ pour la planarisation.

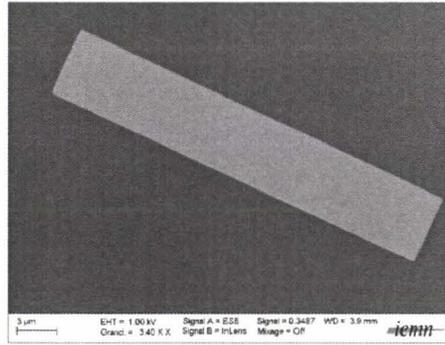
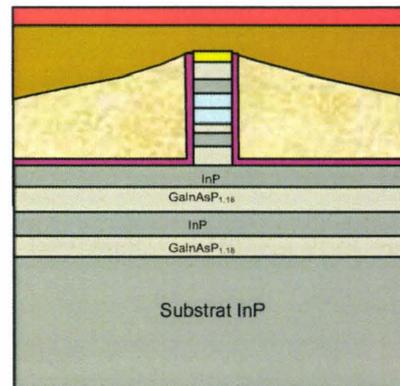


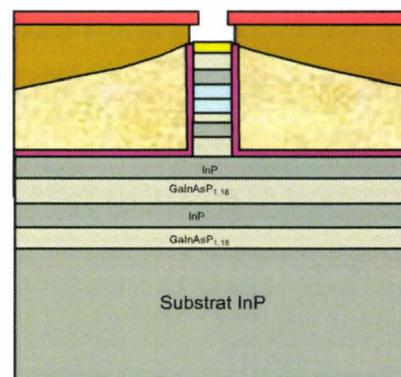
Figure III.17. Photographie de l'ouverture lors de la planarisation prise au Microscope Electronique à Balayage

1. Enduction de ARP : $v = 1500\text{rpm}$, $a = 1000\text{rpm/s}$, $t = 15\text{s}$.
2. Recuit sur plaque chauffante pendant 1min à 80°C , 10min à 180°C
3. Enduction de PMMA 3% ($v = 3400\text{rpm}$, $a = 1000\text{rpm/s}$, $t = 12\text{s}$)
4. Recuit sur plaque chauffante pendant 1min à 80°C ensuite 10min à 180°C

L'épaisseur de ARP déposée est $2\mu\text{m}$, tandis que l'épaisseur de PMMA 3% est 630\AA .



5. Lithographie électronique : tension = 50kV , dose = $180\mu\text{C}/\text{cm}^2$.
6. Développement avec la solution : 1/3MIBK, 2/3IPA agitée pendant 2 min à $150\text{tr}/\text{min}$, puis avec le substrat pendant 2min à $100\text{tr}/\text{min}$.
7. Rinçage pendant 30 secondes avec l'alcool isopropylique " IPA ".



8. Evaporation par pulvérisation de la couche métallique de Ti/Au : 1000 /6000Å.
9. Lift-off de 2h dans une solution Remover Pg à 80°C.

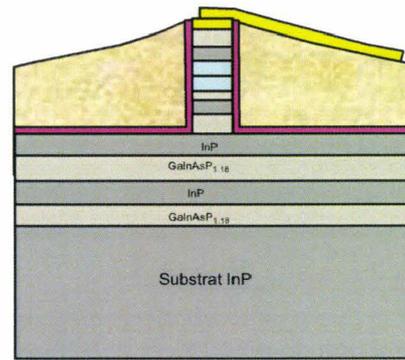
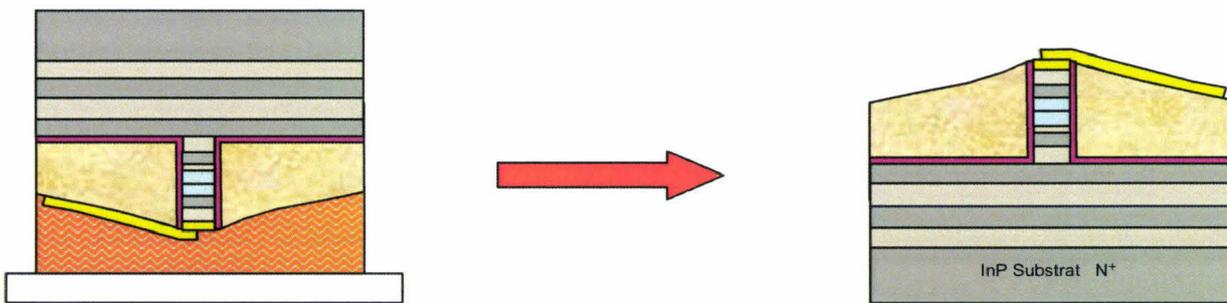


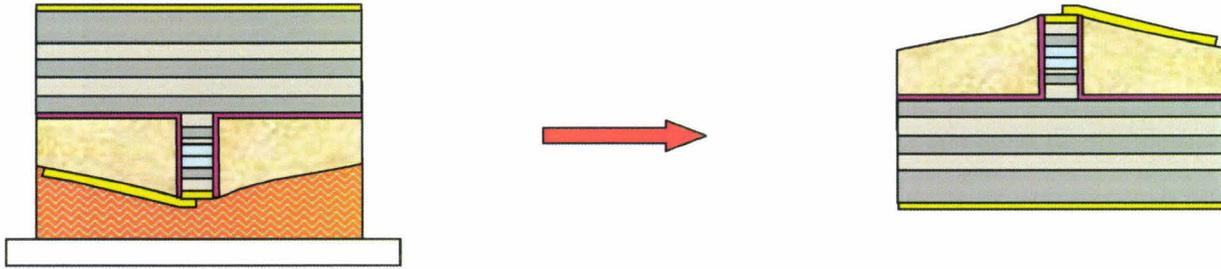
Tableau III.10. Procédé de dépôt des plots de contact

Amincissement :



7. Enduction de AZ4562 ($v = 2000\text{rpm}$, $a = 1000\text{rpm/s}$, $t = 40\text{s}$).
 8. Recuit sur plaque chauffante pendant 3min à 110°C, l'épaisseur de résine déposée est de 6000Å.
 9. Chauffage du support en verre à 80°C et étalement d'une noisette de cire (OCON-199).
 10. Collage dans une machine (LOGITECH) de collage pour assurer la planéité nécessaire.
 11. Amincissement avec de l'alumine de grains 15 μm pendant 10min et de l'alumine de grains 3 μm pendant 5min, avec une vitesse de rotation du plateau de 25rpm .
 12. Polissage pendant 3min sous pression maximale de 2Kg et avec la vitesse de rotation maximale 70rpm.
- Décollage par dissolution de la cire dans une solution « *Non Solvent Cleaning Fluid* », puis le substrat est plongé dans une solution d'acétone pour dissoudre la couche de résine.

Tableau III.11. Procédé d'amincissement



13. Enduction de AZ6245 ($v = 2000\text{rpm}$, $a = 1000\text{rpm/s}$, $t = 40\text{s}$) face avant

14. Recuit sur plaque chauffante pendant 3min à 110°C , l'épaisseur de résine déposée est $5\mu\text{m}$.

15. Dépôt par pulvérisation face arrière Ti/Au ($100/500$) Å

16. Nettoyage la résine AZ6245 avec l'acétone et alcool

Tableau III.12. Procédé de métallisation face arrière

Le clivage :

La dernière étape de ce processus technologique est le clivage. Nous rappelons que cette étape, qui est essentielle pour des structures photoniques à injection latérale, s'avère en pratique assez délicate. Pour faciliter l'opération, le substrat hôte est aminci jusqu'à une centaine de micromètres. Le but de clivage est d'obtenir des faces d'injection de bonne qualité.

La mise en œuvre du clivage s'effectue en deux étapes : dans un premier temps, une amorce est faite à l'aide d'une pointe diamant sur le bord du substrat, puis elle est propagée à l'aide d'une lame. Dans notre cas, nous utilisons une cliveuse automatique qui permet une précision de clivage de l'ordre de la dizaine de microns.

Nous montrons figure III.18 la photographie d'une photodiode micro-ruban terminée, prise au Microscopie Electronique à Balayage.

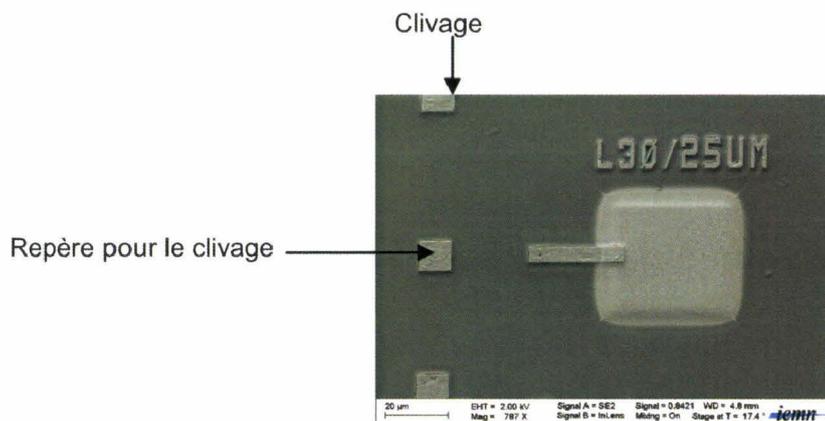


Figure III.18. Photographie prise au Microscopie Electronique à Balayage pour une photodiode finale

III.5. Caractérisation des photodiodes de puissance

III.5.1. Banc de mesure

Les photodiodes ont été montées dans un boîtier microonde comportant une ligne hyperfréquence 50Ω microruban sur une céramique. La photodiode est connectée à une extrémité de cette ligne par un fil de connexion aussi court que possible, et la ligne hyperfréquence est connectée à un connecteur K. Nous donnons figure III. 19 quelques photographies de ce montage.

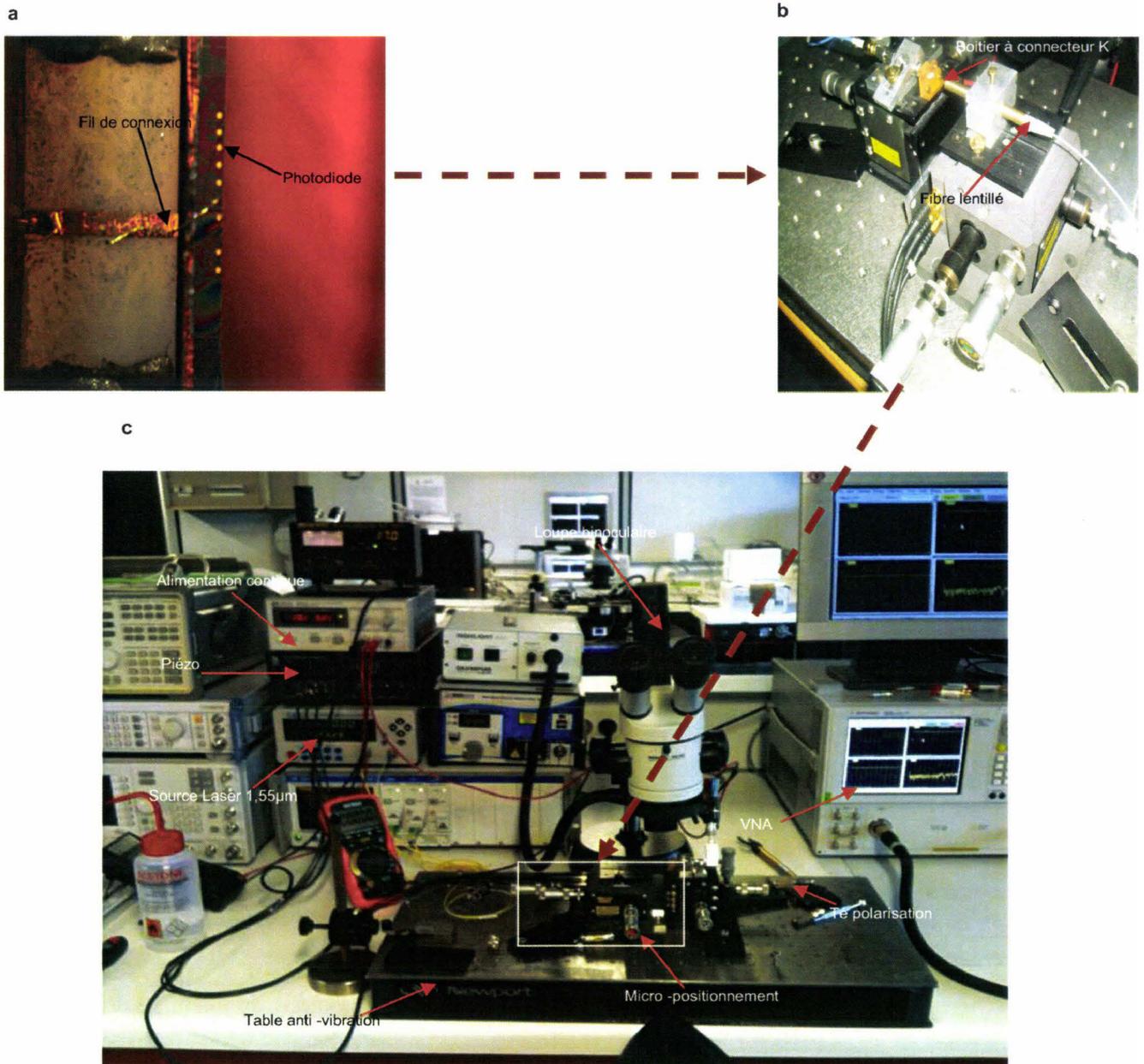
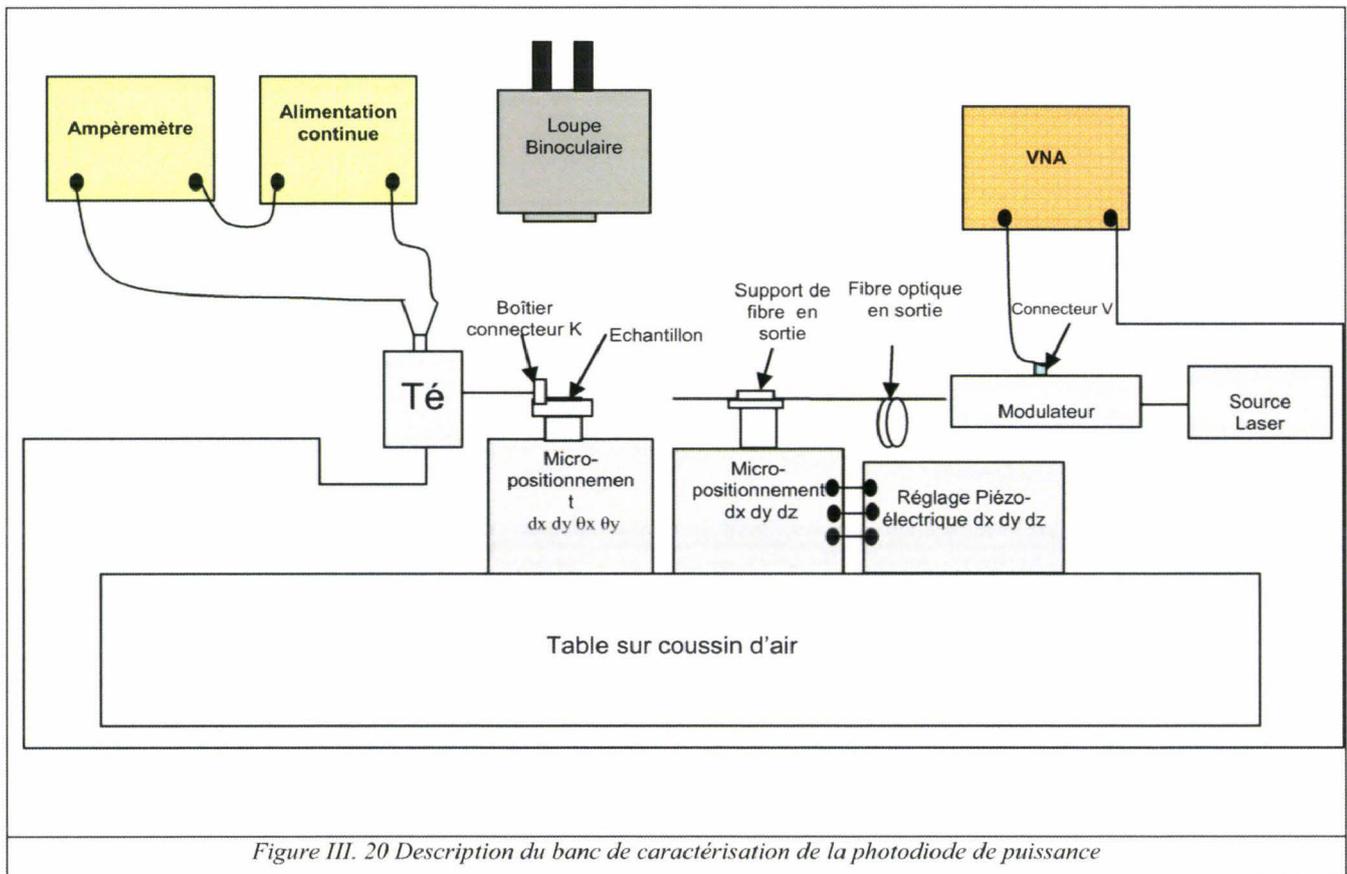


Figure III. 19. (a) Photographie d'une photodiode dans son boîtier hyperfréquence comportant un connecteur K, (b) Vue du boîtier hyperfréquence comportant un connecteur K dans son système d'alignement, (c) Vue globale du banc de caractérisation

Ce boîtier ne comporte pas de fibre optique. Celle-ci est amenée et alignée à l'aide d'un système de micro positionnement X,Y,Z comme le montre la photographie de la figure III. 20 b et le schéma du banc de mesure de la figure III. 20. Le boîtier comportant la photodiode est monté lui aussi sur un système de micropositionnement X,Y,Z qui a en plus deux degrés de liberté en orientation. Un contrôle visuel à l'aide d'une loupe binoculaire est effectué au cours de l'expérience pour aider à l'alignement. Le banc complet comporte une source laser, un modulateur externe, une fibre optique lentillée pour injecter le signal optique dans la photodiode. Cette photodiode est connectée à un Té de polarisation permettant la polarisation électrique de la photodiode. Les caractérisations dynamiques ont été effectuées à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel (N 5242A PNA-X Network Analyser) de fréquence maximale d'utilisation 26GHz. L'ensemble est assemblé sur une table antivibration (figure III. 19 c et III.20).



III.5.2. Résultats expérimentaux

Nous présentons figure III. 21 la caractérisation I-V de notre photodiode de longueur d'électrode $40\mu\text{m}$. Le guide amorce fait ici $20\mu\text{m}$. On note un courant inverse faible (typiquement de l'ordre de $1\mu\text{A}$ à 3V), et un courant direct qui devient important ($>1\text{mA}$) au-delà de $0,5\text{V}$. La pente de cette caractéristique conduit à une résistance de contact de 30Ω . Nous avons ensuite mesuré le coefficient de réponse (ou responsivity en terminologie anglo-saxonne), lorsque la photodiode est éclairée par un signal optique

continu. La comparaison du photocourant issu de la mesure en sortie de la photodiode, et de la puissance optique incidente, conduit à ce coefficient de réponse.

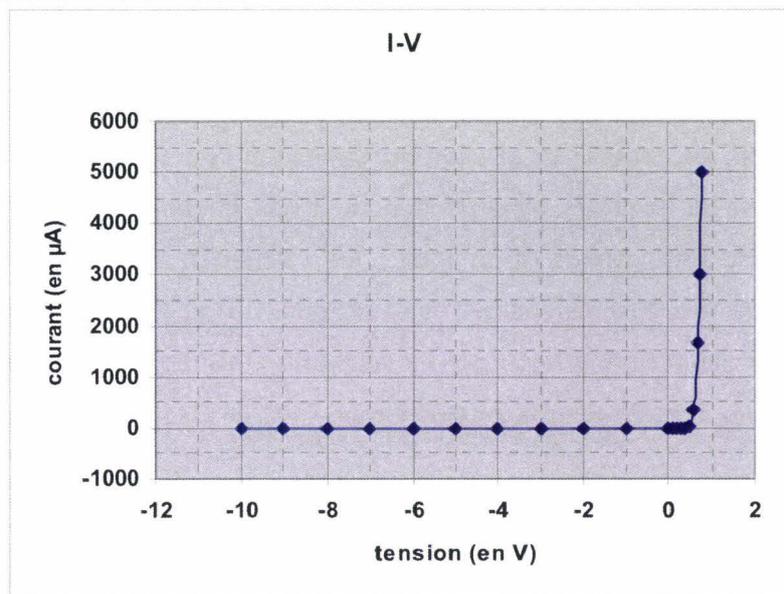


Figure III. 21 Caractérisation $I(V)$ d'une photodiode en régime d'obscurité

La figure III. 22 représente la mesure de ce coefficient de réponse en fonction de la puissance optique incidente pour trois tensions de polarisation inverse. On note que ce coefficient de réponse est quasiment indépendant de la valeur de la puissance optique qui augmente légèrement lorsque l'on passe d'une tension de polarisation de -3V à -8V et que sa valeur maximale se situe aux environs de 0,53A/W. Ces expériences ont été menées sans traitement anti-réfléchissant de la face d'entrée de la photodiode. On peut donc espérer d'augmenter de 30% cette valeur. Par ailleurs nos mesures ont été faites avec une fibre lentillée de diamètre de mode 4,5µm, alors que cette structure a été optimisée pour un mode de diamètre 2,5µm. On peut donc penser augmenter le coefficient de réponse en choisissant judicieusement la fibre lentillée.

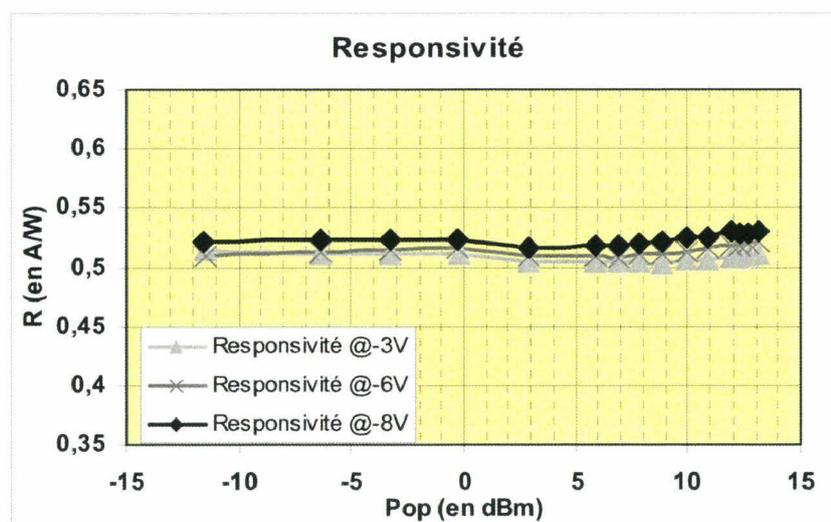


Figure III. 22. Coefficient de réponse (ou responsivity) de la photodiode en fonction de la puissance optique incidente pour trois tensions de polarisation

La réponse fréquentielle de la photodiode est présentée figure III.24 pour différents photocourants à une tension de polarisation de -8V. Rappelons que ces mesures ont été effectuées à l'aide d'un analyseur de réseaux vectoriel et d'un modulateur électrooptique. L'ensemble du système est considéré comme un quadripôle hyperfréquence, dont le port d'entrée est le modulateur électrooptique, et le port de sortie la photodiode. Dans ces conditions la mesure du paramètre S_{12} en fonction de la fréquence donne directement la réponse en fréquence de la photodiode. Nous donnons cette réponse figure III. 23, où les résultats en amplitude sont donnés en décibels ; les valeurs en basse fréquence sont prises comme références à 0 dB. On note que les courbes obtenues pour différentes puissances optiques sont presque toutes équivalentes et donnent une fréquence de coupure à 3dB de 20GHz comme nous l'avions prévu, essentiellement liée à la capacité de cette photodiode.

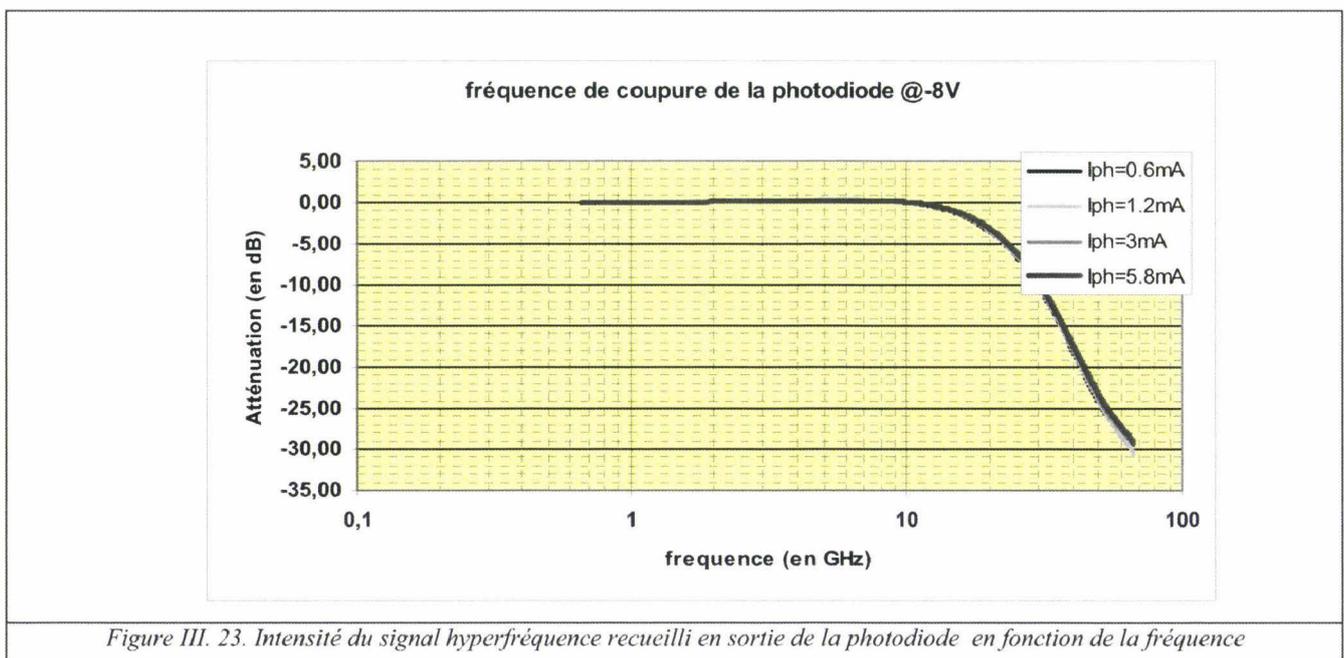


Figure III. 23. Intensité du signal hyperfréquence recueilli en sortie de la photodiode en fonction de la fréquence

III.6. Conclusion

Nous avons fabriqué une photodiode sur InP conçue à l'IEMN par Vincent Magnin et Joseph Harari, pour atteindre les objectifs suivants : Coefficient de réponse voisin de 0,9A/W, fréquence de coupure de 20GHz et photocourant maximal de 50mA. Cette photodiode est constituée d'un guide multimode dilué comportant un succession de couches d'InP et de fines couches de quaternaire GaInAsP de composition 1,18 μm . La photodiode elle-même est intégrée monolithiquement à ce guide d'onde. La structure du guide d'onde est conçue de manière à repousser la lumière vers la photodiode. La photodiode elle même a une structure de type UTC (Uni travelling carrier), c'est-à-dire à un seul type de porteur, modifiée. La structure UTC consiste essentiellement à avoir une couche absorbante dopée de type P⁺, de façon à éviter l'effet d'écrantage du champ électrique sous forte puissance optique. Dans ces conditions le transport des

porteurs minoritaires, ici les électrons, se fait par diffusion. Dans la photodiode que nous avons fabriquée, la couche absorbante n'est que partiellement dopée, pour éviter un brevet de NTT. La photodiode que nous avons réalisée et présentée ici est de type microruban. Nos caractérisations ont montré que cette photodiode remplit le cahier des charges pour les coefficients de réponses, pourvu que sa face d'entrée soit traitée antiréfléchissant et qu'elle soit couplée à une fibre lentillée de diamètre de mode $2,5\mu\text{m}$. Du point de vue du photocourant maximal, les expériences ont été délicates pour les puissances élevées (de l'ordre de 100mW optique focalisée sur la surface clivée de la photodiode) qui semble t-il dégradent la face d'entrée de la photodiode ; nous avons néanmoins mesuré des photocourants atteignant 35mA ; il reste un effort à faire pour atteindre l'objectif en forte puissance, en modifiant la structure de la partie active de la photodiode. Nous envisageons de travailler la structure épitaxiale de façon à réduire les résistances de contact trop élevées (30Ω) qui dépolarisent la diode quand elle délivre un fort photocourant.

Nous tenons à signaler que dans le cadre du PEA ORGE, nous avons fabriqué une deuxième photodiode à accès hyperfréquence coplanaire, de façon à être compatible avec les boîtiers réalisés au 3-5 lab. Cette photodiode est mise en boîtier par le 3-5 lab pour le PEA ORGE. Cette diode a aussi été modifiée du point de vue du guide d'onde pour être compatible avec une fibre lentillée de diamètre de mode $4,5\mu\text{m}$, utilisée dans les boîtiers 3-5 lab. Nos caractérisations ont montré que cette photodiode atteint sans antiréfléchissant un coefficient de réponse de $0,85\text{A/W}$, une fréquence de coupure de 23GHz et un photocourant à la saturation de 30mA . Nous n'avons donné aucun élément sur cette photodiode dans ce mémoire, compte tenu des aspects confidentiels qui nous lient contractuellement. La technologie est beaucoup plus compliquée et fastidieuse que celle de la photodiode présentée ici. Notamment, elle requiert une épitaxie plus sophistiquée, une gravure plus profonde de $2,4\mu\text{m}$ et une double planarisation à cause de la gravure profonde. Néanmoins, nos résultats prouvent le succès de notre technologie. Ici également, il faudra modifier légèrement la structure de la photodiode, pour atteindre les 50mA du cahier des charges. Bien que nos résultats soient légèrement en-dessous des objectifs visés, nos photodiodes sont néanmoins performantes et sont à l'état de l'art international.

III.7. Références

- [1] T. ISHIBASHI, T. FURURA, H. FUSHIMI, S. KODAMA, H. ITO, T. NAGATSUMA, N. SHIMIZU, and Y. MIYAMATO
InP/InGaAs Uni-Traveling Carrier photodiodes
IEICE Trans. Electron, Vol. E83-C, n° 6, pp. 938-949, June 2000
- [2] IEMN, Opto+, PICOGIGA, THOMSON-LCR
Photoréception optique sans préamplification Electrique
Projet RNRT (POPEYE), (Projet exploratoire)
- [3] X. LI, N. LI, X. ZHENG, S. DEMIGUEL, J. C. CAMPBELL, D. A. TULCHINSKY, and K. J. WILLIAMS
High-saturation-current InP/InGaAs photodiode with partially depleted absorber
IEEE Photonics Technology Letters, vol. 15, n°9, pp. 1276-1276, September 2003
- [4] H. ITO, S. KODOMA, Y. MURAMOTO, T. FURUTA, T. NAGATSUMA, and T. ISHIBASHI
High-speed and high-output InP-GaInAs Uni-Traveling-Carrier photodiodes
IEEE Journal of selected Topics in Quantum Electronic, Vol. 10, n° 4, PP. 709-727, 2004
- [5] K. J. WILLIAMS, R. D. ESMAN
Design considerations for high-current photodetectors
Journal of Lightwave Technology, Vol. 17, n°8, pp. 1443-1454, August 1999
- [6] M. CHTIOUI
Photodiodes UTC de puissance pour les liaisons optiques/hyperfréquences et summation de signaux hyperfréquences par voie optique
Thèse de doctorat de l'Université des Scniences te Technologies de Lille, Décembre 2008
- [7] N. LI, X. LI, S. DEMIGUEL, X. ZHENG, J. C. CAMPBELL, D. A. TULCHINSKY, K. J. WILLIAMS, T. D. ISSHIKI, G. S. KINSEY, and R. SUDHARSANSAN
High-saturation-current charge compensated InGaAs/InP Uni-Traveling-Carrier photodiode
IEEE Photonics Technology Letters, Vol.16, n°3, pp. 864-866, March 2004
- [8] X. WANG, N. DUAN, H. CHEN, and J. C. CAMPBELL
InGaAs/InP Photodiodes with high responsivity and high saturation power
IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 19, n°.16, pp.1272-1274, August 2007
- [9] K. JANG, K. LEE, J. KIM, S. HWANG, J. LEE, S. K. DHUNGEL, S. JUNG, J. YI
Effect of rapid thermal annealing of sputtered alumunium nitride film in an oxygen ambient
Materials Science in semiconductor Vol. 9, pp. 1137-1141, 2006

[10] A. KADOUN, D. BARBIER

Compared rapid thermal annealing procedures of InP

Materials Science in Semiconductor B90, Vol. 9, pp. 110-113, 2002

[11] J. W. MCNABB, H. G. GRAIGHEAD

Anisotropic reactive ion etching of InP in methane/hydrogen based plasma

Journal of Vacuum Sciences and Technology, B9, pp.3535, 1991

[12] J. E. SCHRAMM, D. I. BABIC, E. L. HU, J. E. BOWERS, J. L. MERZ

Anisotropy control in the reactive ion etching of InP using oxygen in methane/hydrogen/argon

Journal of vacuum Sciences and Technology, pp. 383-386, 1993

[13] B. CAKMAK

Fabrication and characterization of dry and wet etched InGaAs/InGaAsP/InP low wavelength semiconductor laser

Optics Express, Vol. 10, n° 13, 2002

[14] C. CARDINAUD, M. C. PEIGNON, P. Y. TESSIER

Plasma etching: principales, mechanisms, application to micro and nano-technologies

Applied surface Science, Vol. 164, pp. 72-83, 2000

[15] J. SINGH, I. HENNING, M. HARLOW, S. COLE

Single-mode Low-Loss buried optical waveguide bends in InGaAsP/InP fabricated by dry etching

Electronics Letters, Vol. 25, n° 14, pp. 889-900, 1989

[16] M. ZEGAOU, J. HARARI, N. CHOUEIB, V. MAGNIN, D.DECOSTER

Quick planarisation based on Hydrogen Silsesquioxane (HSQ) for deep etched InP based structures

Electronics Letters, Vol. 43, n° 22, 2007

[17] M.ZEGAOU, N.CHOUEIB, P. TILMANT, M. FRANCOIS, C. LEGRAND, J.CHAZELAS, D.DECOSTER

A novel bondpad report process for III-V semiconductor devices using full HSQ properties

Microelectronic Engineering 86, pp. 68-71, 2009

Chapitre IV : Photodiode PIN-guide 1.3 μ m sur GaAs

IV.1. Motivation de la photodiode PIN-guide sur GaAs

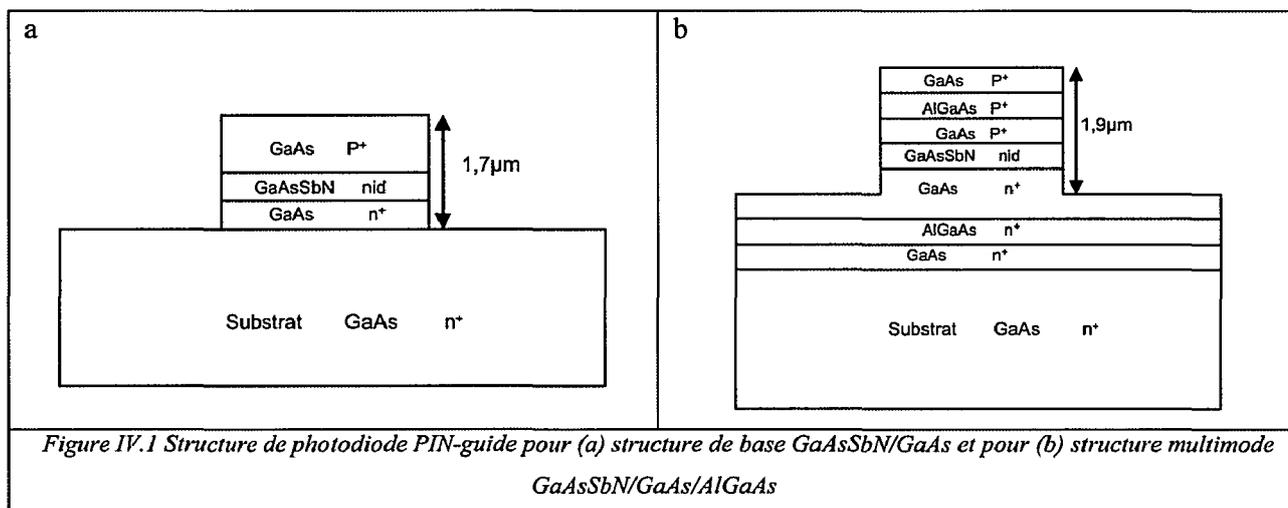
Depuis quelques années se sont engagées des collaborations fortes avec l'équipe du Professeur Yoon Soon Fatt de la Nanyang Technological University (NTU) de Singapour pour l'évaluation d'une nouvelle filière de matériaux en filière GaAs à énergie de bande interdite suffisamment petite pour assurer la photodétection aux longueurs d'onde Télécom 1,3 μm et 1,55 μm . Cette collaboration s'est concrétisée par le soutien d'un projet MERLION de l'Ambassade de France à Singapour, et de Thales au travers d'un financement de thèse codirigée NTU/IEMN. Elle a été en partie à la genèse de CINTRA, (CNRS-International-NTU-Thales-Research-Alliance), l'Unité Mixte Internationale (UMI) CNRS / THALES / NTU créée en octobre 2009 et située dans NTU de Singapour. Dans ce projet commun, l'équipe du Professeur Yoon a démontré la croissance, par MBE, de quaternaires GaAsSbN faiblement nitrurés et antimoniés en couche épaisse (supérieure à 0,3 μm) et en accord de maille sur GaAs, dont la bande interdite est plus petite que celle du GaAs. Notamment les premiers travaux de NTU ont montré la possibilité de réaliser des photodiodes PIN capables de détecter à la longueur d'onde 1,3 μm [1], [2], [3].

Cependant, la géométrie envisagée, dans les premières photodiodes de NTU, est une photodiode PIN à éclairage par le dessus de forte section qui possède des désavantages : rendement quantique faible et bande passante limitée par la capacité de la photodiode. La discussion avec le Professeur Yoon Soon Fatt a conduit à la fabrication de photodiodes guide d'onde à éclairage par la tranche pour surmonter ces deux limitations. Le travail est traité dans ce chapitre conjointement avec une partie de la thèse de Xu Zhe, Doctorant à Singapour. Notamment Xu Zhe a modélisé et optimisé ces structures en vue d'obtenir un bon rendement quantique à la longueur d'onde 1,3 μm [4]. Nous présentons donc, dans ce chapitre, les structures adoptées, la technologie que nous avons réalisée à l'IEMN et les performances statiques et dynamiques de ces dispositifs à la longueur d'onde 1,3 μm .

IV.2. Structure de la photodiode PIN-guide sur GaAs

Les premiers travaux en interaction avec le groupe du Professeur Yoon Soon Fatt à l'Université Technologique de Nanyang (NTU) de Singapour, avaient pour but de démontrer la possibilité d'utiliser les matériaux de la filière GaAs faiblement nitruré et antimonié (GaAsSbN) pour la photodétection aux longueurs d'ondes des télécommunications optiques. Cette action a été positive avec des résultats intéressants qui ont démontré des photodiodes PIN méso à éclairage par le dessus [2], [3], [5]. Cependant ces photodiodes possèdent un diamètre assez important d'au moins 100 μm , et pour des raisons liées essentiellement à la capacité des photodétecteurs, elles étaient limitées en fréquence. Par ailleurs le rendement quantique reste petit, à cause de la faible épaisseur de la zone absorbante.

Dans le chapitre II, ces mêmes matériaux ont été utilisés pour réaliser des guides d'onde optique. Nous avons ainsi démontré, expérimentalement, la possibilité d'utiliser le GaAsSbN comme matériau de cœur d'un guide optique, son indice étant plus important que celui de GaAs [6]. La suite toute logique consiste à combiner l'effet guide d'onde et l'effet photodétection, pour réaliser une photodiode PIN-guide. Les avantages sont bien connus. Ils ont été démontrés depuis de nombreuses années en filière InP. La photodiode PIN-guide concilie capacité très faible, temps de transit très court et rendement quantique élevé [7]. Sa structure est simple. Pour le pin-guide conventionnel, c'est un guide d'onde à cœur absorbant en quaternaire GaAsSbN non intentionnellement dopé (nid) encadré des couches de confinements en GaAs dopées respectivement P et N. La structure de ce photodétecteur est représentée figure IV1a et figure IV1b. La structure de base est celle donnée figure IV1a. Dans ce cas, le guide d'onde



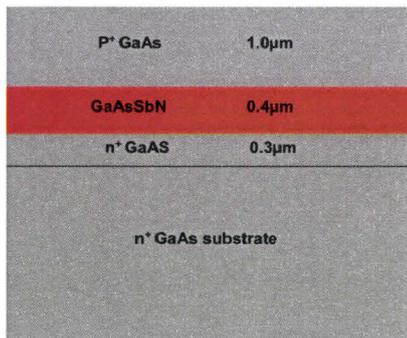
absorbant est constitué d'une couche de cœur GaAsSbN et les deux couches de confinement sont en GaAs. La gravure des couches supérieures induit le guidage latéral de la lumière. On note que la gravure est effectuée au travers de la jonction afin de réduire la capacité du photodétecteur. L'éclairage des photodétecteurs se fait sur la tranche en illuminant la face clivée du PIN-guide.

Il a été montré par Kato qu'une structure multimode améliore le couplage à la fibre et le rendement quantique externe de la photodiode [8]. C'est à partir d'une idée équivalente que Xu Zhe a montré par modélisation qu'une structure multimode constituée d'un cœur en quaternaire entouré de part et d'autre d'une couche ternaire en AlGaAs, puis des couches de GaAs, améliore sensiblement le rendement quantique externe de la photodiode [3]. C'est la raison pour laquelle nous avons également réalisé technologiquement une deuxième structure, qui comportera une couche de ternaire en AlGaAs entre la couche de cœur en GaAsSbN et la couche de confinement en GaAs. La structure épitaxiale correspondante est représentée figure. IV 2b

IV.3. Epitaxie

La croissance épitaxiale des deux structures a été réalisée dans le groupe du Professeur Yoon Soon Fatt à NTU sur un substrat GaAs de deux pouces de diamètre, dans un bati d'épitaxie par jets moléculaires, qui a été modifié pour introduire l'azote comme élément susceptible de participer à la croissance épitaxiale.

Les structures sont présentées figure IV. 2a et IV. 2b. La croissance a été effectuée sur un substrat GaAs dopée n^+ . Pour la première structure, elle est constituée d'une première couche de GaAs n^+ de $0,3\mu\text{m}$ d'épaisseur et $5.10^{18} \text{ cm}^{-3}$ de dopage qui sert de couche de confinement optique inférieur, une couche en GaAsSbN qui est à la fois le matériau absorbant pour la photodetection, et la couche de cœur du guide optique d'épaisseur $0,4\mu\text{m}$ non intentionnellement dopée (nid) et une couche supérieure en GaAs P^+ de $1\mu\text{m}$ d'épaisseur et $4.10^{19} \text{ cm}^{-3}$ de dopage qui sert de couche de confinement optique supérieur, sur laquelle est réalisé le contact ohmique de type P. Rappelons que le contact ohmique de type n est déposé sur le substrat aminci.



Matériaux	Type	Epaisseur (μm)	Dopage (cm^{-3})
GaAs	P^+	1	4.10^{19}
GaAsSbN	nid	0,4	
GaAs	N^+	0,3	5.10^{18}
Substrat GaAs	N^+	400	5.10^{18}

Figure IV. 2a. Structure épitaxiale utilisée pour la fabrication des photodiodes pin-guides à base de GaAs/GaAsSbN/GaAs

La deuxième structure comporte en plus des couches de AlGaAs respectivement de type n^+ et p^+ . La couche d'AlGaAs n^+ est placée entre la couche tampon de démarrage de l'épitaxie en GaAs n^+ et la couche absorbante en GaAsSbN. La couche d'AlGaAs p^+ est située en surface entre la couche de confinement en GaAs P^+ et la couche absorbante. La couche superficielle en GaAs P^+ de $0,05\mu\text{m}$ d'épaisseur et $4.10^{19} \text{ cm}^{-3}$ de dopage favorise la qualité du contact ohmique et protège l'épitaxie contre l'oxydation de l'Aluminium. Ainsi que nous l'avons déjà mentionné au paragraphe précédent, l'introduction d'AlGaAs rend le guide absorbant multimode et améliore le couplage à la fibre optique.

P ⁺ GaAs	0.05μm
P ⁺ AlGaAs	0.46μm
P ⁺ GaAs	0.5μm
GaAsSbN	0.4μm
n ⁺ GaAs	0.5μm
n ⁺ AlGaAs	0.46μm
n ⁺ GaAs	0.1μm
n+ GaAs substrate	

Matériaux	Type	Epaisseur (μm)	Dopage (cm ⁻³)
GaAs	P ⁺	0,05	4.10 ¹⁹
AlGaAs	P ⁺	0,46	4.10 ¹⁹
GaAs	P ⁺	0,5	4.10 ¹⁹
GaAsSbN	Nid	0,4	
GaAs	N ⁺	0,5	5.10 ¹⁸
AlGaAs	N ⁺	0,46	5.10 ¹⁸
GaAs	N ⁺	0,1	5.10 ¹⁸
Substrat GaAs	N ⁺	400	5.10 ¹⁸

Figure IV. 2b. Structure épitaxiale utilisée pour la fabrication des pin- guides à base de GaAs/AlGaAs/GaAsSbN

Le rendement quantique de la photodiode se trouve ainsi naturellement amélioré. Cette technique avait été introduite pour la première fois par Kato en filière InP dans les années 90 [8-9]. Par analogie, elle s'applique à la filière GaAs, dans la mesure où le quaternaire GaAsSbN est comparable au GaInAs de la filière InP, et le couple AlGaAs/GaAs est comparable au couple InP/GaAsInP. Cette analogie est utilisée dans le travail de thèse de Xu Zhe qui a démontré par le calcul le bien-fait des couches d'AlGaAs pour améliorer le couplage à la fibre, et donc le rendement quantique de la photodiode [3].

IV.4. Etapes technologiques de fabrication des dispositifs d'essai

Comme dans le chapitre précédent, nous présentons dans ce paragraphe les différentes étapes technologiques qui nous ont permis la réalisation de ces photodiodes. Le schéma de principe de cette photodiode est donné figure IV. 3. Il s'agit d'un guide d'onde de largeur 4 μm, avec différentes longueurs L. Une métallisation de type contact ohmique P est effectuée sur le haut de l'arête et un contact ohmique de type N face arrière est déposé sur un substrat aminci pour permettre le clivage de la face d'entrée du photodétecteur. Une planarisation à base de HSQ est effectuée pour permettre le report d'un plot de contact épais.

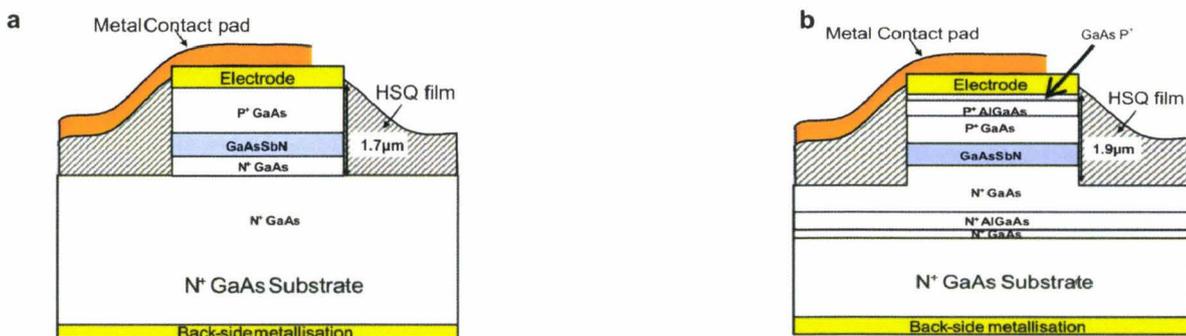


Figure IV. 3. Schéma de principe des photodiodes PIN-guide 1,3μm sur GaAs à éclairage à latéral direct
a : couche de confinement purement GaAs, b : couche de confinement GaAs/AlGaAs

Nous présentons ensuite, dans un premier temps, les principales étapes du processus technologique, puis, dans deuxième temps, une description détaillée de ce processus. Pour des raisons liées à la souplesse et la précision obtenues, nous avons fabriqué nos dispositifs en utilisant la lithographie électronique.

IV.4.1. Principales étapes du processus technologique

Nous avons utilisé pour les deux structures les mêmes étapes du processus technologique que celles présentées au chapitre 3, paragraphe IV.1. Nous rappelons ces étapes.

IV.4.1.1. Dépôt des électrodes

Nous utilisons un bicouche de résines électroniques positives (EL13% /PMMA3%) pour obtenir une forme casquette lors de la révélation (figure IV.4).

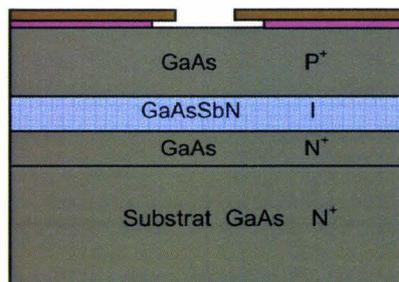


Figure IV. 4. Coupe schématique de la plaque avec la résine électronique après révélation

Le dépôt des contacts (figure IV. 5) est effectué par évaporation sous vide. Il est constitué de la séquence suivante de métaux : Pt/Ti/Pt/Au, suivie par un lift-off puis un recuit flash à une température de 430°C [10-11].

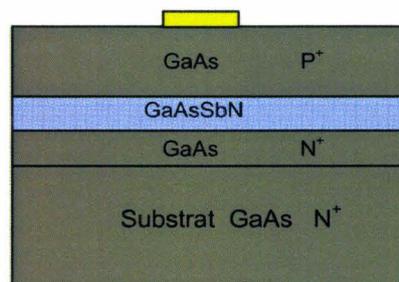


Figure IV.5. Dépôt de contact ohmique

IV.4.1.2. Gravure

Nous utilisons un masque de résine électronique négative réversible qui sera transféré sur un masque de nitrure pour une gravure de la partie active de la photodiode. Nous avons opté pour une gravure ionique réactive (ICP) par voie chlorée BCl_3 , qui permet de graver les alliages de matériaux à base de GaAs et GaAsSbN avec des vitesses relativement différentes mais très rapides.

Cette gravure a été réalisée dans le Bati OXFORD 80 à l'IEMN (figure IV.6).

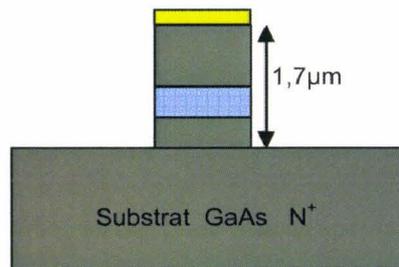


Figure IV. 6. Gravure des rubans « photodiode »

IV.4.1.3. Planarisation

Nous utilisons une planarisation par HSQ figure IV.7. Nous invitons le lecteur à se rapprocher du chapitre I paragraphe I.5.2.2 pour s'informer des détails de cette technique de planarisation [12].

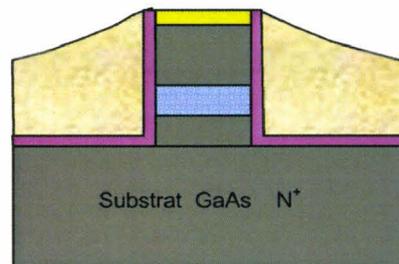


Figure IV. 7. Planarisation par HSQ

IV.4.1.4. Report des électrodes

L'étape finale du traitement de la face avant est le dépôt du report de l'électrode P. A ce stade de la réalisation du composant, une lithographie électronique et un dépôt d'une couche métallique (Titane/Or, 1000/9000Å) sont nécessaires pour réaliser les reports d'électrodes qui permettront l'injection du courant dans la structure figure IV. 8 [13].

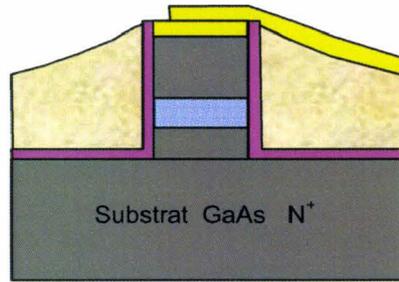


Figure IV. 8. Dépôt des plots d'épaissement

IV.4.1.5. Contact N

Rappelons (voir chapitre I paragraphe I.5.1.5) que l'amincissement est une étape nécessaire avant de métalliser la face arrière pour faciliter le clivage. Nous invitons le lecteur à consulter le chapitre I paragraphe I.5.1.5 pour plus de détails. Suit une métallisation face arrière Ti/Au par pulvérisation (figure IV.9).

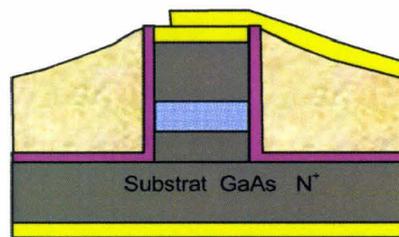


Figure IV.9. Métallisation face arrière

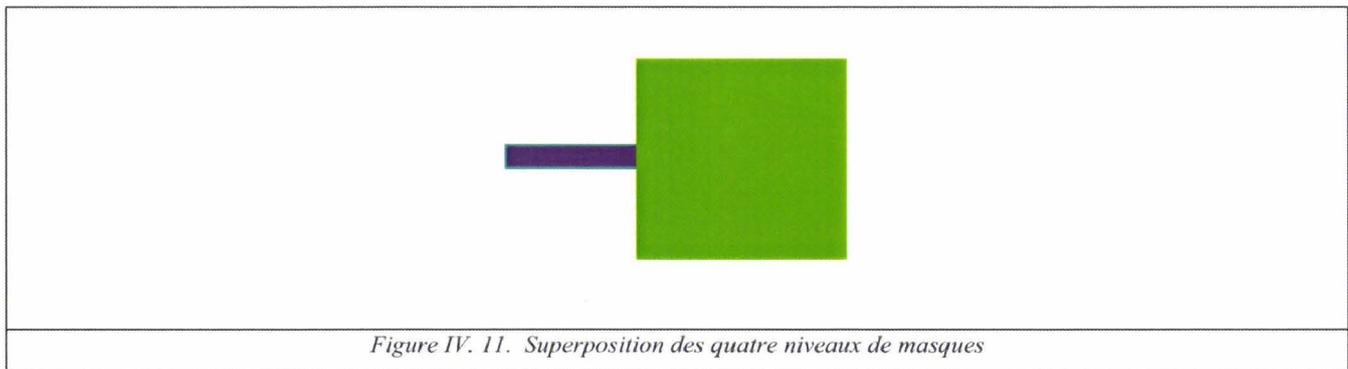
IV.4.2. Description détaillée du processus technologique

IV.4.2.1. Composants réalisés

Nous avons utilisé un masquage électronique en écriture directe. Les masques sont conçus à l'aide du logiciel Wavemaker®.

Nous présentons figure IV.10 les masques correspondant aux quatre étapes principales pour la réalisation technologique : dépôt d'électrodes, gravure, planarisation, reports ainsi qu'en figure IV.11, la superposition de ces quatre masques ; cette superposition donne une idée de la géométrie du composant terminé.

	
1 ^{er} niveau : Dépôt d'électrode	2 ^{eme} niveau : Gravure
	
3 ^{eme} niveau : planarisation	4 ^{eme} niveau : Plots de contact
<i>Figure IV.10. Les différents niveaux de masques</i>	



Nous donnons également une vue de la superposition de ces quatre masques pour l'ensemble des photodiodes à réaliser figure IV. 12. La rangée supérieure correspond à une largeur de diode de 4 μm , la deuxième rangée correspond à une diode de 6 μm , la troisième rangée correspond une diode de 8 μm et la quatrième rangée correspond à une diode de 10 μm . Pour chacune de ces rangées, nous avons répété la même configuration de photodiode qui comprend des longueurs de guide différentes. Les différentes longueurs prévues sont de 20 μm , 50 μm , 100 μm , 200 μm et 500 μm , pour la photodiode unique, soit le double, pour le masque donné figure IV. 12, puisque c'est le clivage qui sépare en deux diodes en principe équivalentes.

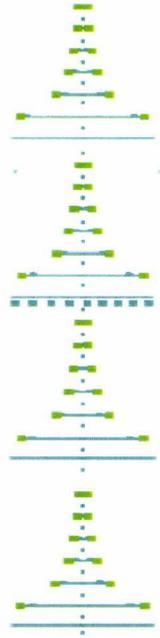


Figure IV.12. Représentation de la superposition globale des masques de photodiode pin-guide

IV.4.2.2. Détail des opérations technologiques

Les différentes opérations technologiques sont présentées de façon détaillée dans le tableau IV suivant :

9. Désoxydation du substrat dans la solution d'Amoniaque 5%.

10. Enduction de EL 13%

$v = 2900\text{rpm}$, $a = 1000\text{rpm/s}$, $t = 12\text{sec}$.

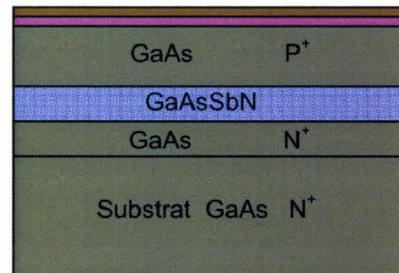
Recuit sur plaque chauffante pendant 1mn à 80°C , 10min à 180°C sur plaque chauffante

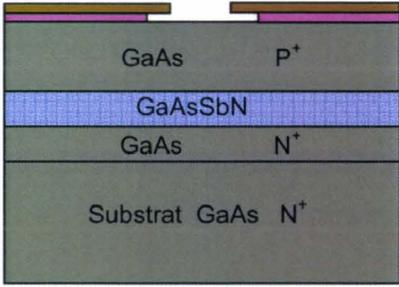
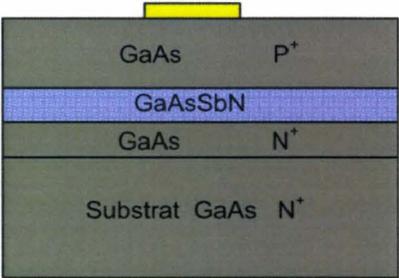
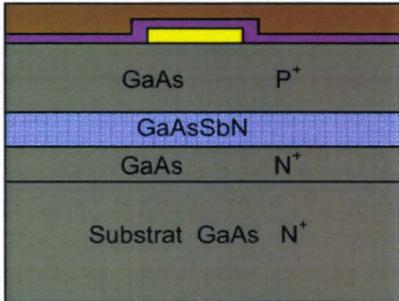
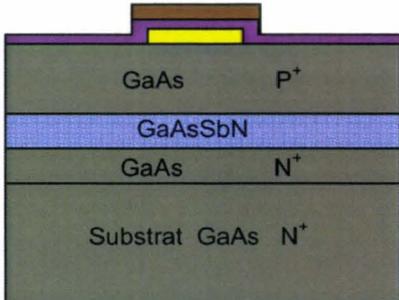
11. Enduction de PMMA 3%

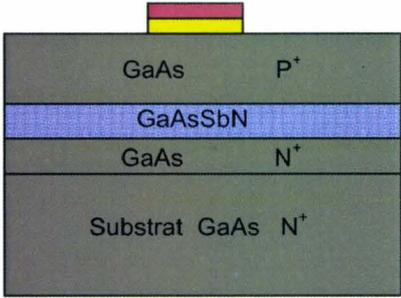
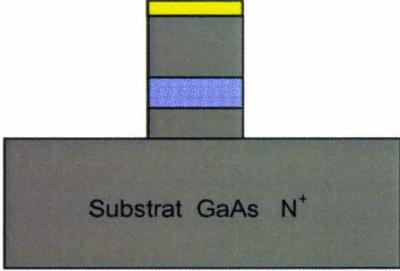
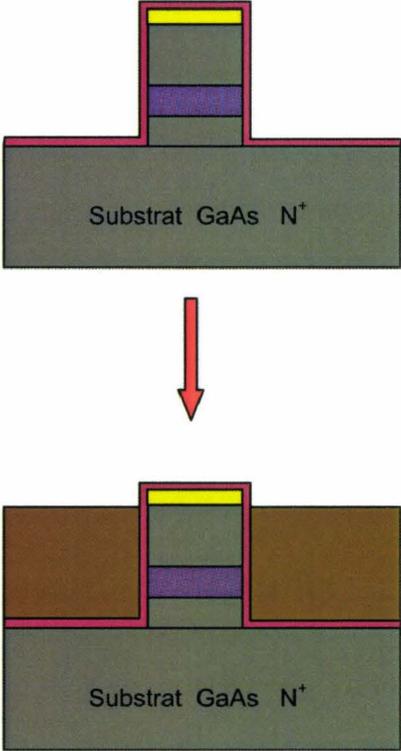
$v = 3400\text{ rpm}$, $a = 1000\text{rpm/s}$, $t = 12\text{s}$.

12. Recuit sur plaque chauffante pendant 1mn à 80°C , 10min à 180°C

L'épaisseur de EL 3% déposée est de 6680\AA , tandis que l'épaisseur de PMMA 3% est de 630\AA .



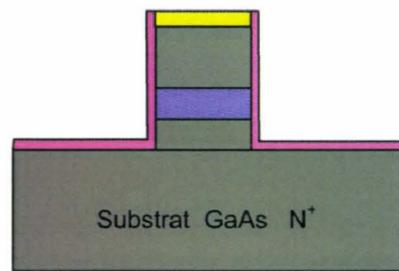
<p>13. Lithographie électronique tension = 50kV, dose = 180μC/cm²</p> <p>14. Développement avec la solution: (1/3 MIBK, 2/3 IPA) agitée pendant 2min à 150tr/min, puis avec le substrat pendant 60sec à 100tr/min.</p> <p>15. Rinçage pendant 30sec avec l'alcool isopropylique "IPA".</p>	
<p>16. Métallisation par évaporation Pt/Ti/Pt/Au/Ti (100/300/100/3000/200Å)</p> <p>17. Lift-off dans le remover Pg à 80°C pendant 3h</p> <p>18. Recuit flash à 400°C pendant 35s</p>	
<p>11. Dépôt de 5000Å de nitrure par PECVD à la température de 260°C.</p> <p>12. Recuit pleine plaque de 5 minutes à 200°C pour évaporer les solvants résiduels.</p> <p>13. Pré-dépôt du promoteur d'adhérence HMDS : v = 3000rpm, a = 1000rpm/s, t = 20sec</p> <p>14. Enduction de résine électronique SAL 601 ; (v = 2000rpm, a = 1000rpm/s, t = 15sec).</p> <p>15. Recuit pleine plaque de 3 minutes à 105°C pour évaporer les solvants résiduels.</p>	
<p>16. Ecriture électronique : tension = 50kV, dose = 4μC/cm².</p> <p>17. Inversion du masque par un recuit post-écriture pleine plaque à 115°C pendant 3min.</p> <p>18. Développement pendant 10 minutes dans 2 bains de MF 322.</p> <p>Rinçage à l'EDI pendant 30 secondes</p>	

<p>19. Gravure du nitrure par plasma (CHF_3/CF_4) ; débits respectifs (20/20) pendant 2min30s sous pression=50mT, puissance=185W.</p> <p>20. Nettoyage du masque de résine par plasma O_2, 20sccm, 100mT, 100W, 320V pendant 5 minutes</p>	
<p>21. Gravure ICP du GaAs, débit PCl_3 :30sccm, puissance respectifs RIE/ICP : (50W/300W), Pression = 2mTorr tension</p> <p>22. Température/Pression He : 10°C/10Torr. Pompage jusqu'à la pression de base.</p> <p>23. Gravure de nitrure par plasma (CHF_3/CF_4), débit respectifs (20/20) pendant 4min sous pression = 50mT, puissance = 180W, tension = 337V.</p>	
<p>24. Dépôt 80 nm de nitrure à une température de 260°C par 25PECVD.</p> <p>25. Recuit en pleine plaque à une température 200°C pendant 5 minutes pour évaporer les solvants résiduels.</p> <p>26. Enduction de résine électronique EL13% (v : 3400 rpm, a : 1000 rpm/s, t : 12s).</p> <p>27. Recuit en pleine plaque à 80°C pendant 1min ensuite à 180°C pendant 10min.</p> <p>28. Ecriture électronique (tension : 50kV, dose : $180\mu\text{C}/\text{cm}^2$).</p> <p>29. Développement avec la solution : 1/3 MIBK, 2/3 IPA, agitée pendant 2min à 150tr/min, puis avec le substrat pendant 60sec à 100tr/min.</p> <p>30. Rinçage pendant 30sec avec l'alcool isopropylique "IPA".</p>	

31. Gravure du nitrure au niveau de l'ouverture par plasma (CHF_3/CF_4), débit respectifs (20/20) pendant 2min minutes sous pression = 50mTorr, puissance = 180W, tension = 337V.

32. Retrait des résidus de résine par plasma O_2 , débit 30sccm pendant 5min sous pression = 100mTorr, puissance 100W.

33. Recuit flash à 360°C pendant 35s.



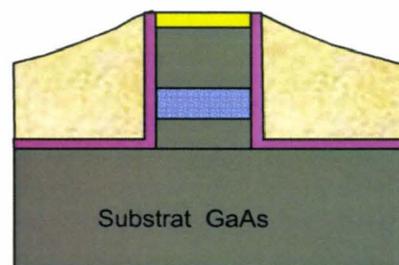
34. Dépôt du promoteur d'adhérence HMDS :
($v = 3000\text{rpm}$, $a = 1000\text{rpm}^2$, $t = 20\text{sec}$)

35. Dépôt HSQ : ($v = 1000\text{rpm}$, $a = 1000\text{rpm/s}$,
 $t = 30\text{s}$).

36. Recuit en pleine plaque à une température 120°C pendant 10 minutes.

37. Densification par plasma O_2 débits 50sccm,
tension : 290W, pression : 100mTorr.

38. Ouverture de la HSQ au dessus des électrodes de guides droits métallisés par RIE (CHF_3/CF_4), débit respectifs (20/20) sccm sous pression = 50 mTorr, puissance = 180W.

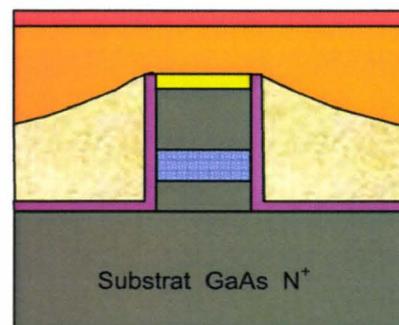


39. Enduction de ARP : ($v = 1500\text{rpm}$, $a = 1000\text{rpm/s}$, $t = 15\text{s}$).

40. Recuit sur plaque chauffante pendant 1min à 80°C, 10min à 180°C.

41. Enduction de PMMA 3% ($v = 3400\text{rpm}$, $a = 1000\text{rpm/s}$, $t = 12\text{s}$).

42. Recuit sur plaque chauffante pendant 1min à 80°C ensuite 10min à 180°C.



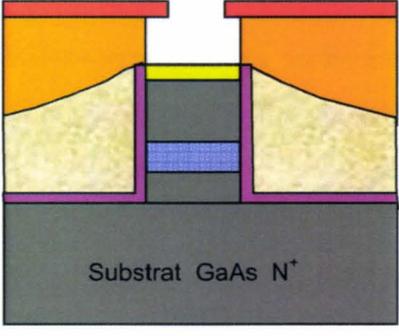
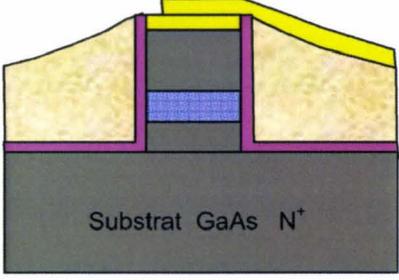
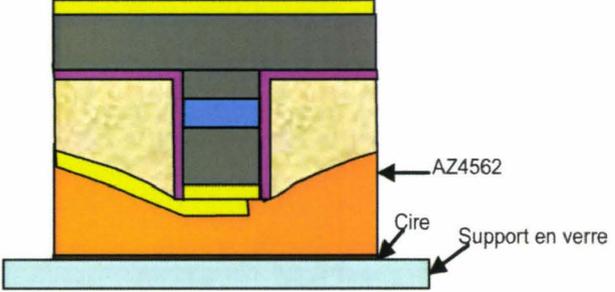
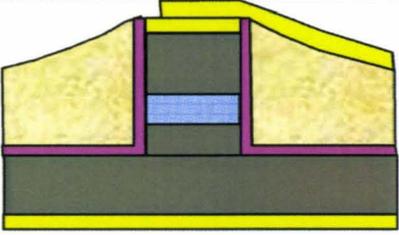
<p>43. Lithographie électronique : tension = 50kV, dose = 180 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$.</p> <p>44. Développement avec la solution : 1/3MIBK, 2/3IPA agitée pendant 2 min à 150tr/min, puis avec le substrat pendant 2min à 100tr/min.</p> <p>45. Rinçage pendant 30 secondes avec l'alcool isopropylique "IPA".</p>	
<p>46. Evaporation par pulvérisation de la couche métallique de Ti/Au : 1000 /7000Å.</p> <p>47. Lift-off de 2h dans une solution remover Pg à 80°C.</p>	
<p>48. Enduction de AZ4562 ($v= 2000\text{rpm}$, $a= 1000\text{rpm/s}$, $t=40\text{s}$).</p> <p>49. Recuit sur plaque chauffante pendant 3min à 110°C, l'épaisseur de résine déposée est de 6000Å.</p> <p>50. Collage sur un support en verre par une cire (OCON-199).</p> <p>51. Amincissement à 130μm avec de l'alumine de grains 15μm pendant 10min et de l'alumine de grains 3μm pendant 5min, avec une vitesse de rotation du plateau de 25rpm.</p> <p>52. Polissage pendant 3min avec la vitesse de rotation maximale 70rpm.</p>	
<p>53. Métallisation face arrière pleine plaque Ti/Au (100Å/500Å) par pulvérisation.</p> <p>54. Un nettoyage par acétone est nécessaire pour enlever la résine optique AZ4562.</p>	

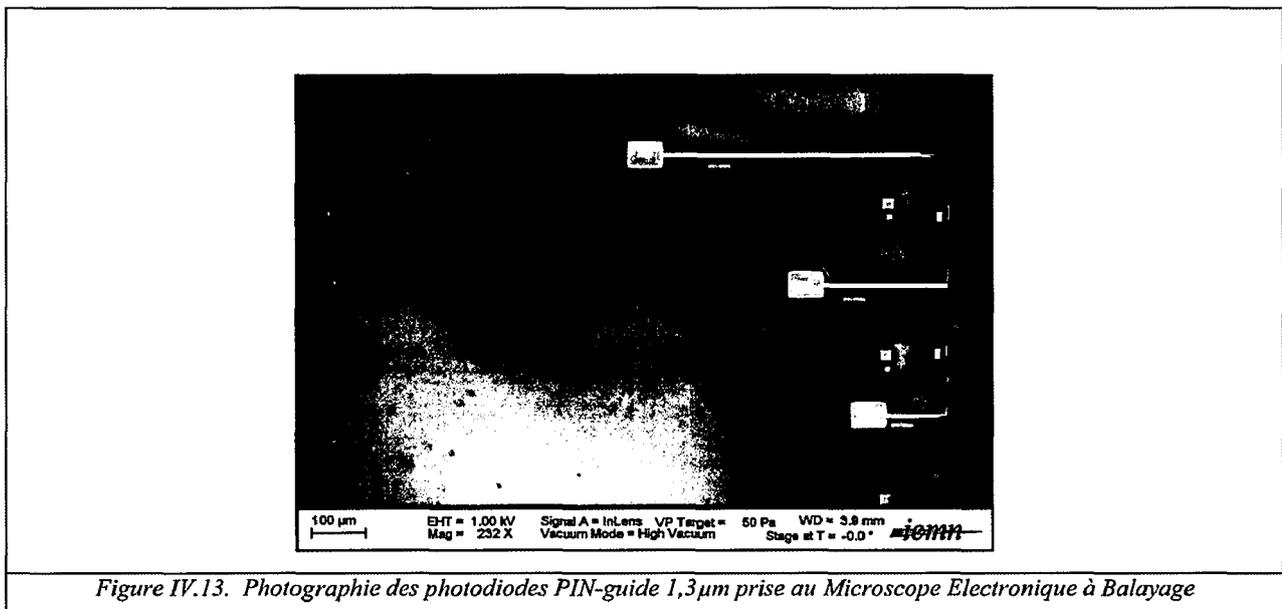
Tableau. IV. Opérations technologiques détaillées pour la fabrication d'une photodiode PIN-guide 1,3 μm sur GaAs

Le clivage :

La dernière étape de ce processus technologique est le clivage. Nous rappelons que cette étape est essentielle pour des structures photoniques à injection latérale ; elle s'avère en pratique assez délicate. Pour faciliter, le substrat est aminci jusqu'à une centaine de micromètres. Le but du clivage est d'obtenir des faces d'injection de bonne qualité.

La mise en œuvre du clivage s'effectue en deux étapes : dans un premier temps, une amorce est faite à l'aide d'une pointe diamant sur le bord du substrat, puis elle est propagée à l'aide d'une lame. Dans notre cas, nous utilisons une cliveuse automatique qui permet une précision du clivage de l'ordre de la dizaine de microns.

Nous montrons figure IV.13 une photographie des photodiodes PIN-guide terminées prises au Microscopie Electronique à Balayage.



IV.5. Caractérisation des dispositifs

Comme les photodiodes sur InP, nous avons monté la photodiode dans un boîtier hyperfréquence comportant un connecteur K (voir photographie donnée figure IV.14a).

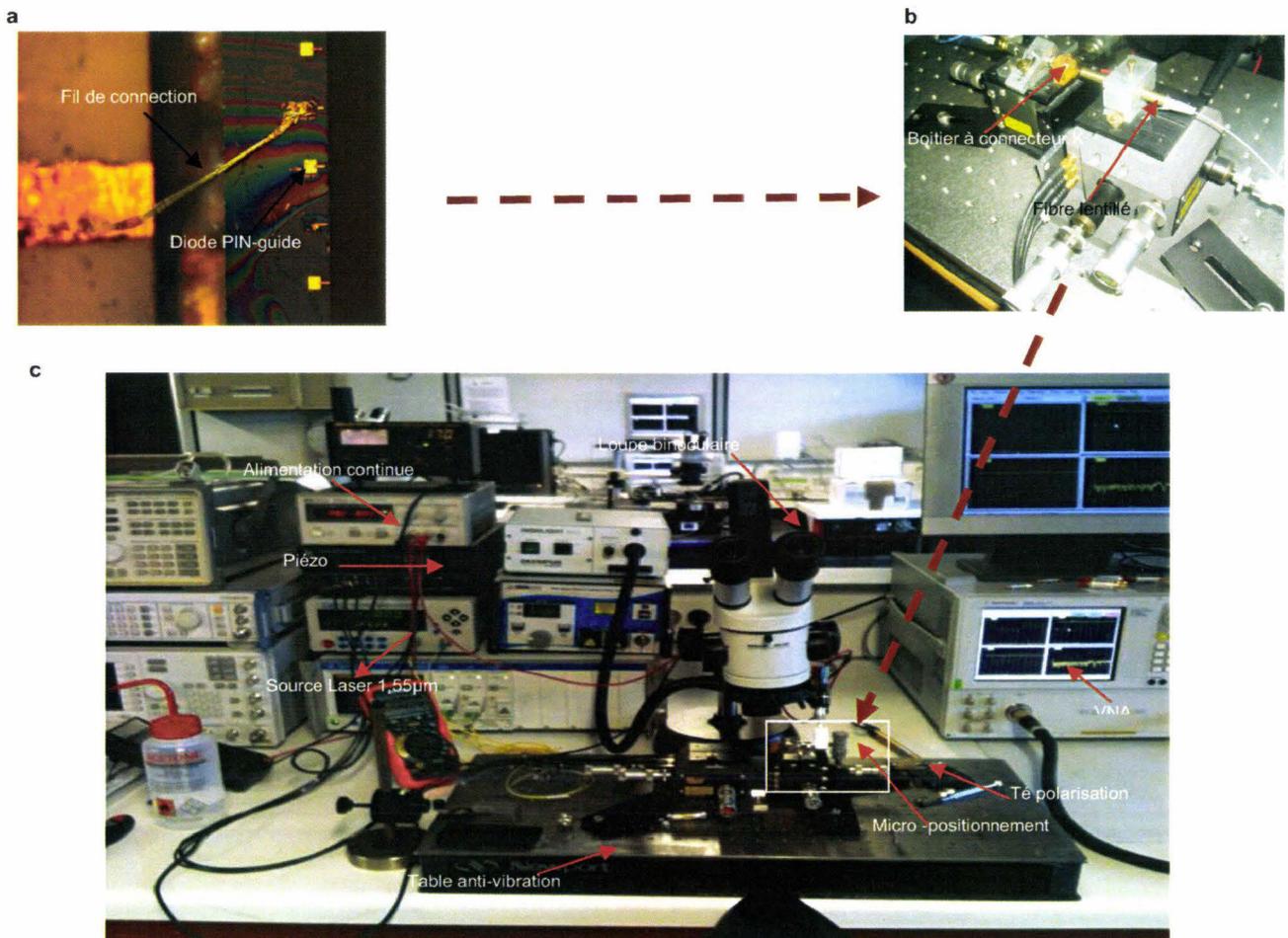


Figure IV.14. (a) Photographie d'une photodiode dans son boîtier comportant un connecteur K, (b) Vue du boîtier hyperfréquence comportant un connecteur K dans son système d'alignement, (c) Vue globale du banc de caractérisation

Ce boîtier ne comporte pas de fibre montée, ce qui suppose que la fibre amenant le signal optique soit alignée devant la face clivée de notre photodiode. Le banc de mesure qui permet cet alignement est celui qui a déjà été présenté au chapitre 3, figure III.21. Nous le représentons à nouveau, figure IV.15, afin de faciliter la lecture de notre document. Un système de microdéplacements xyz permet d'aligner la fibre devant la photodiode. La photodiode elle-même est montée sur un système à microdéplacements xyz.

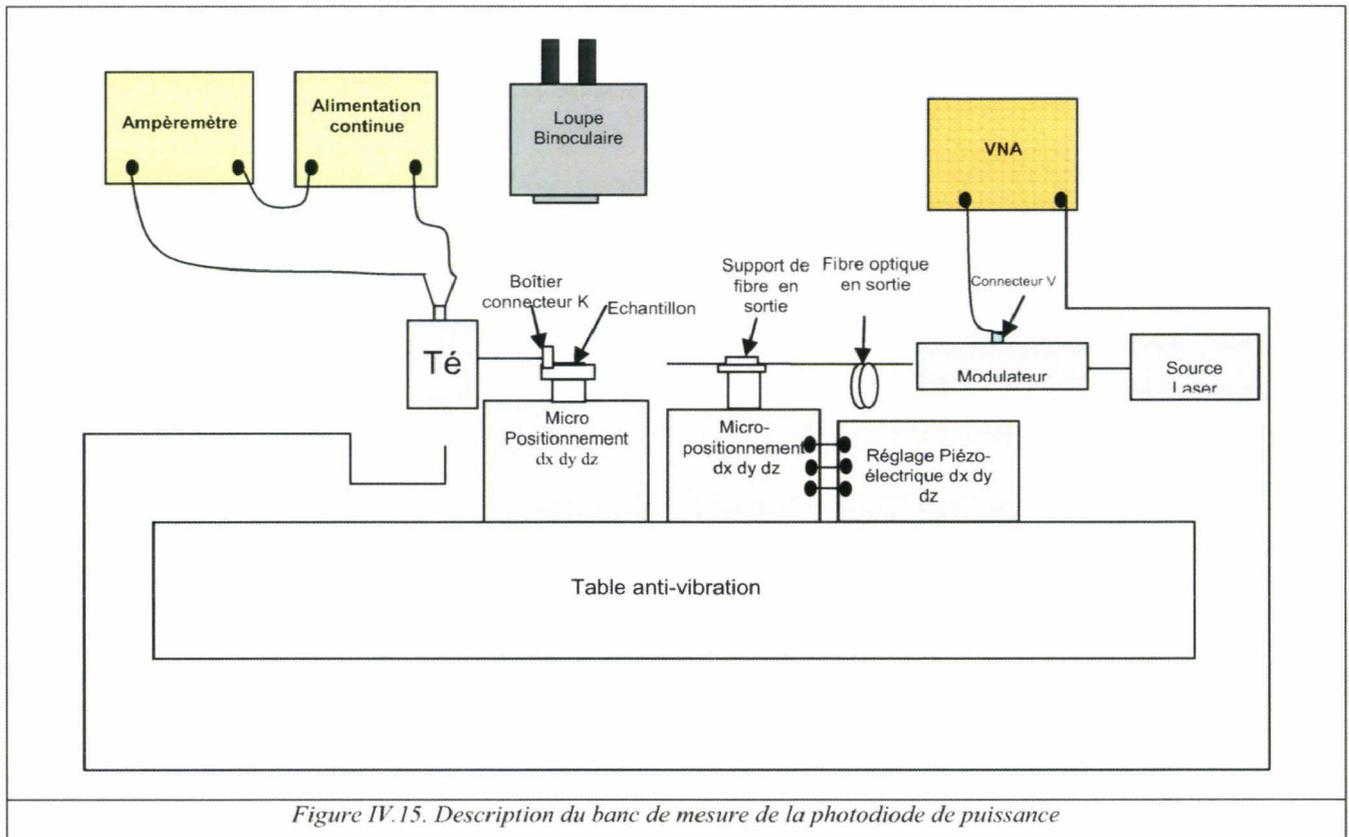


Figure IV.15. Description du banc de mesure de la photodiode de puissance

La fibre lentillée a un diamètre de mode de $4,5\mu\text{m}$. Une source laser et un modulateur externe permet de disposer d'une source modulée jusqu'à la fréquence de 20GHz. En sortie de la photodiode, un Té de polarisation permet de la polariser et de récupérer le signal hyperfréquence issu de la photodiode. L'intensité de ce signal est mesurée, soit à l'aide d'un analyseur de spectre hyperfréquence, soit à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel. Dans ce cas, le modulateur électrooptique se comporte comme l'entrée du quadripôle analysé, alors que la sortie de la photodiode représente le port de sortie de ce quadripôle hyperfréquence. Ce montage permet d'effectuer à la fois des mesures statiques, et des mesures dynamiques.

IV.5.1. Mesures statiques

Nous présentons tout d'abord les caractéristiques I - V de deux photodiodes, l'une à couche de confinement de GaAs et l'autre à couche de confinement GaAs et AlGaAs. Pour ces deux photodiodes le courant de polarisation en direct devient significative ($>1\text{mA}$) pour des tensions de polarisation supérieure à 1,5V (figure IV.16).

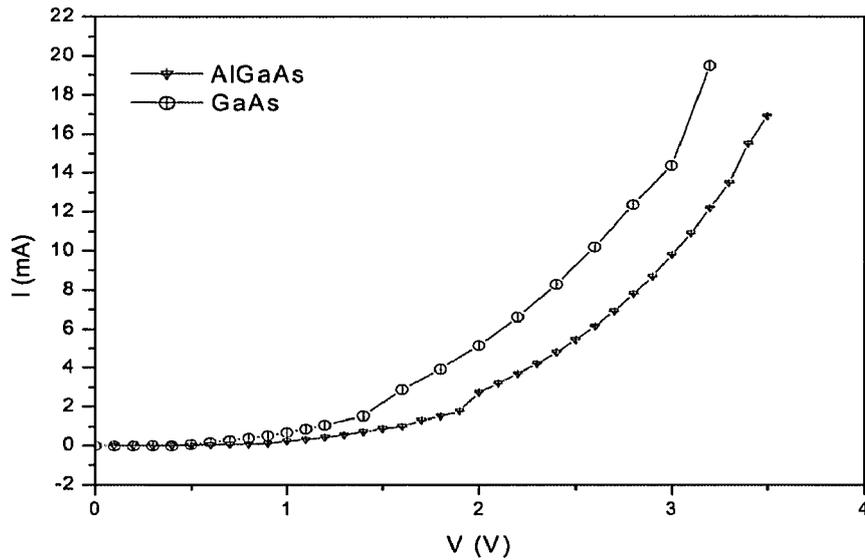


Figure IV.16 Caractérisation I-V d'une photodiode PIN-guide en obscurité

La pente de cette caractéristique en direct, mesurée pour des tensions au-delà de 2V, conduit à des résistances d'accès série parasite de l'ordre de 70Ω pour la photodiode purement GaAs et de 113Ω pour la photodiode comportant de l'AlGaAs. En inverse, le courant d'obscurité est faible, il atteint environ $5\mu\text{A}$ pour une tension de la polarisation de -5V et $12\mu\text{A}$ pour une tension de polarisation de -10V, avec une tension de claquage qui se situe environs de -12V. Ces valeurs sont typiques, aussi bien pour la photodiode GaAs que pour la photodiode comportant de l'AlGaAs.

Nous présentons ensuite nos mesures de coefficient réponse statique (responsivity en terminologie anglo-saxonne). Dans ce but, nous présentons tout d'abord figure IV.17, les photocourants récupérés en sortie d'une photodiode GaAs de longueur du guide $20\mu\text{m}$ et de largeur $6\mu\text{m}$, en fonction de la tension de la polarisation en inverse, pour une puissance optique en sortie de la fibre de 1mW.

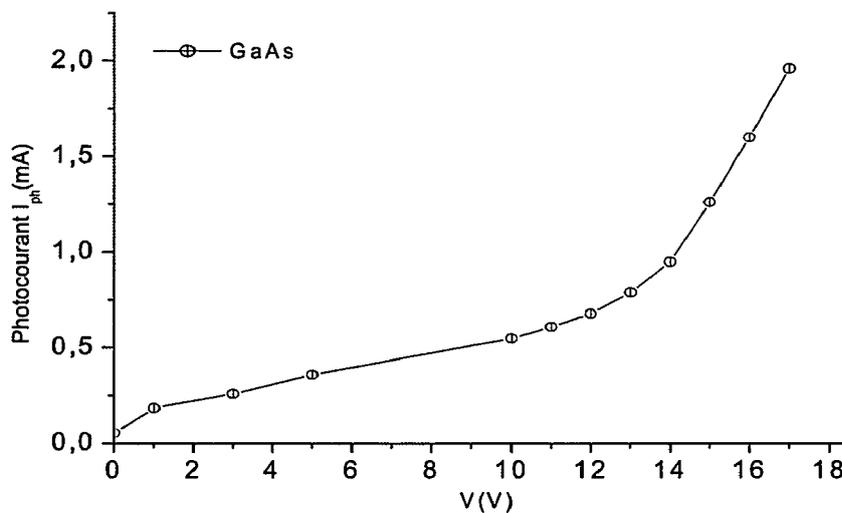


Figure IV.17. Photocourant d'une photodiode GaAs en fonction de la tension de la polarisation en inverse pour une puissance optique en sortie de 1mW

On constate une augmentation continue du photocourant jusqu'à des valeurs voisines de 0,6mA pour des tensions comprise entre -10V et -12V. Au-delà, pour les tensions inférieures à -12V, on constate une augmentation rapide du photocourant. L'augmentation continue du photocourant jusqu'à une tension de -10V, est très probablement lié à la désertion progressive de la couche active absorbante qui est le cœur du PIN-guide en quaternaire GaAsSbN. Elle traduit l'existence d'un dopage résiduel significatif. Au-delà de -12V, l'augmentation rapide du photocourant traduit l'existence du phénomène d'avalanche dans la couche active de GaAsSbN, qui correspond au claquage de la caractéristique I-V à la polarisation inverse remarquée pour des tensions inférieures à -12V. Sur la figure IV.18, nous comparons le photocourant obtenu avec la photodiode purement GaAs à une photodiode équivalente, c'est-à-dire de même dimension, mais comportant de l'AlGaAs. Nous avons limité dans cette expérience nos tensions à -10V, afin d'éviter tout claquage prématuré qui pourrait intervenir aux tensions plus élevées.

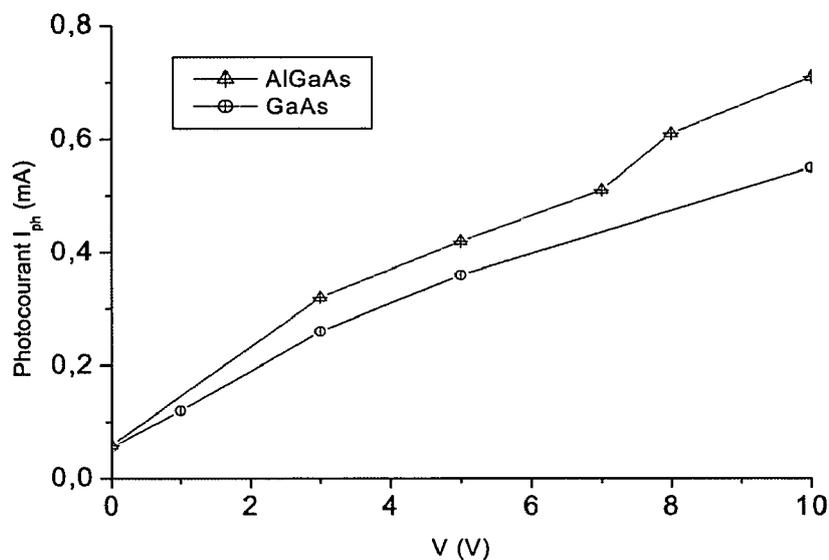


Figure IV.18. Photocourant d'une photodiode micro-ruban d'AlGaAs et GaAs en fonction de la tension de la polarisation en inverse pour une puissance optique en sortie de 1mW.

L'allure des courbes est sensiblement équivalente pour les deux photocourants, les expériences étant menées ici aussi pour une puissance optique en sortie de fibre de 1mW. Notamment, pour les deux photodiodes, on constate une augmentation progressive du photocourant au fur à mesure que la tension appliquée augmente avec cependant un photocourant nettement supérieur pour la photodiode AlGaAs comparé à la photodiode GaAs. Cette évolution du photocourant en fonction de la tension appliquée, peut s'expliquer dans les deux cas par l'existence d'un dopage résiduel dans la couche active de cœur GaAsSbN, qui est en principe non intentionnellement dopée. Ce dopage résiduel est probablement une conséquence de la nature même du matériau GaAsSbN, et pourrait s'interpréter, en suivant les travaux de nos amis de Singapour, comme étant lié à l'introduction de l'azote dans cette couche active. Néanmoins, les valeurs du coefficient de réponse de ces deux photodiodes sont assez bonnes, avec comme l'avait prévu Xu Zhe dans son travail de thèse, des valeurs supérieures pour les photodiodes AlGaAs. C'est ainsi que la photodiode GaAs atteint à un coefficient de réponse de 0,55A/W à -10V à la longueur d'onde de

1300nm. Les meilleurs valeurs sont obtenues avec la photodiode AlGaAs avec un coefficient de réponse 0,72A/W à la longueur d'onde de 1300nm à une tension de polarisation de -10V [13]. Ces résultats sont bien sûr obtenus sans traitement antiréfléchissant, et pourraient donc être améliorés de près de 30% ce qui conduirait à un coefficient de réponse voisin de 0,95A/W pour une photodiode AlGaAs à -10V traitée antiréfléchissant. Ce résultat est tout à fait honorable pour une photodiode PIN-guide fabriquée avec un nouveau matériau de la filière GaAs ; il est à l'état de l'art des photodiodes InP. Il représente la première photodiode sur substrat GaAs possédant un niveau de coefficient de réponse aussi élevé pour un fonctionnement à la longueur d'onde télécom de 1,3 μ m.

Nous avons complété l'expérience par une mesure de la linéarité du photocourant en fonction de la puissance optique injectée, pour différentes tensions de polarisation comprises entre 0 et -5V. Les expériences ont été menées avec la photodiode GaAs. Quelle que soit la tension de polarisation appliquée, comprise entre 0 et -5V, le photocourant suit une loi quasiment linéaire avec la puissance optique injectée, pour des puissances optiques comprises entre 0 et 8mW (figure IV.19).

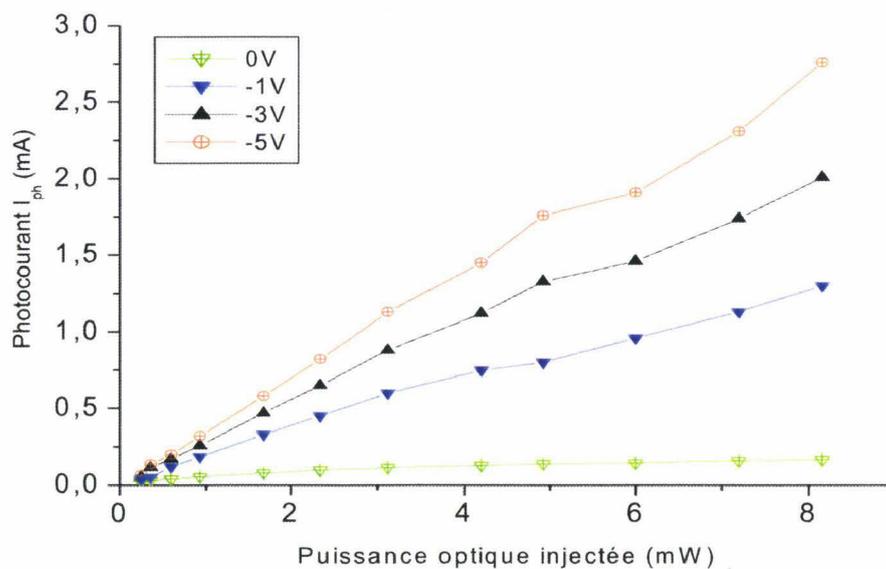


Figure IV.19. Photocourant d'une photodiode PIN-guide GaAs en fonction de la puissance optique injectée pour différentes tensions de polarisation inverse.

IV.5.2. Caractérisation dynamique

Nous présentons figure IV.20 l'intensité du signal hyperfréquence recueilli en sortie d'une photodiode AlGaAs en fonction de la fréquence entre 100MHz et 20GHz pour différentes tensions de polarisation jusqu'à -10V. Ces mesures ont été effectuées en utilisant un analyseur de réseau vectoriel (PNA-X Network Analyser N5242A).

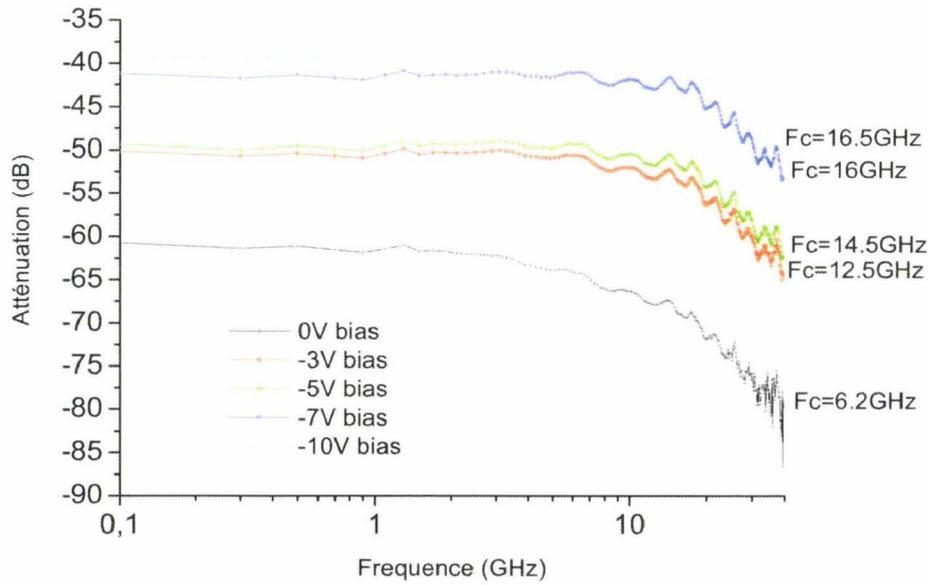


Figure IV.20. Intensité du signal hyperfréquence recueilli en sortie de la photodiode PIN-guide en fonction de la fréquence

L'allure générale de la réponse fréquentielle est celle d'un filtre du premier ordre, qui traduit une limitation en fréquence de la photodiode du type R-C. Autrement dit, cette limitation est essentiellement liée à la capacité de la photodiode chargée sur 50Ω à laquelle il faut adjoindre la résistance série parasite de la photodiode. La limitation en fréquence ne peut pas provenir ici du temps de transit, puisque l'épaisseur de la couche active ne fait que $0,4\mu\text{m}$. On constate, conformément au résultat statique obtenu pour un coefficient de réponse en fonction de la tension de polarisation, une augmentation du niveau du signal hyperfréquence au fur et à mesure que la tension de polarisation en inverse augmente. En même temps, on vérifie que la fréquence de coupure augmente avec la tension de polarisation. Cette évolution est particulièrement bien illustrée figure IV.21. Nous montrons une fréquence de coupure voisine de 6GHz sans tension de polarisation, et qui atteint presque 17GHz pour une tension de polarisation de -10V [14].

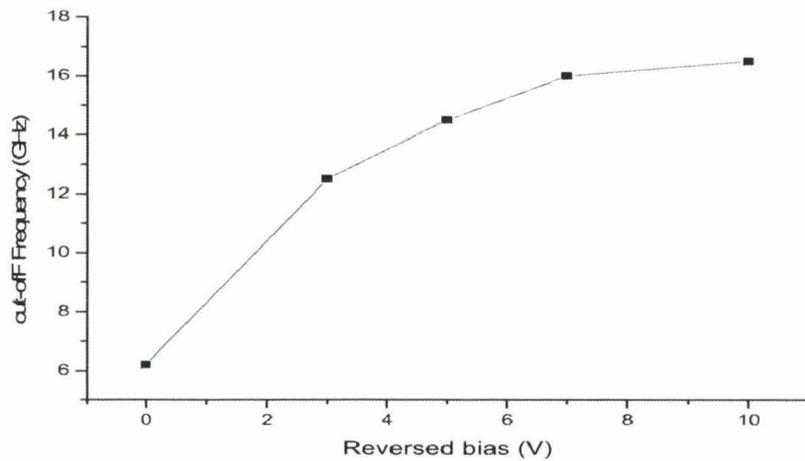


Figure IV.21. Fréquence de coupure RC d'une photodiode PIN-guide en fonction de la tension de polarisation.

Cette figure montre que la fréquence de coupure atteint une saturation comprise entre 16 et 16,5GHz pour des tensions de polarisation comprise entre -7V et -10V [14]. Cette saturation traduit probablement la désertion totale de la couche active GaAsSbN qui se manifeste par une valeur inférieure planchet de la capacité de la photodiode donnée par l'épaisseur de la couche GaAsSbN et les dimensions du guide absorbant, auquel il faut ajouter la capacité parasite du plot de contact et du boîtier. Si l'on admet que la résistance de charge vaut 50Ω , ajoutée de la résistance parasite de contact de 113Ω , tout se passe comme si notre photodiode était chargée sur une impédance de 163Ω . En considérant une fréquence de coupure de 16,5GHz donnée par le comportement purement capacitif de la photodiode, c'est-à-dire $f_c = \frac{1}{2\pi RC}$

où R est une résistance de 163Ω et C la capacité de la photodiode, on trouve pour C une capacité d'environ 60fF qui inclus la capacité intrinsèque de la photodiode C_i et la capacité du plot de contact C_p , soit $C = C_i + C_p$. En supposant, qu'à -10V, la couche active en GaAsSbN d'épaisseur $0,4\mu\text{m}$ est complètement désertée, que le guide absorbant à une longueur de $25\mu\text{m}$ et une largeur de $4\mu\text{m}$, nous pouvons calculer une capacité intrinsèque de la photodiode C_i d'environ 20fF en supposant une permittivité de 10^{-12} F/cm. Ces valeurs conduisent à une capacité de plot de contact C_p d'environ 40fF. Cette dernière valeur est en plein accord avec celle que l'on peut estimer à partir de la surface du plot de contact $50 \times 60\mu\text{m}^2$ et de la permittivité du diélectrique de planarisation (de la HSQ, $\epsilon = n^2$ ou n, indice optique vaut 1,45 pour SiO_2), et d'une épaisseur de diélectrique de planarisation d'un plus d' $1\mu\text{m}$. Il apparait de nos mesures que la résistance de contact de la photodiode est un élément parasite non négligeable limitant de façon significative la fréquence de coupure de la photodiode. Par exemple, si l'on pouvait réduire cette résistance à une valeur négligeable devant la résistance de charge de 50Ω , on pourrait espérer augmenter de plus d'un facteur 3 cette fréquence de coupure, pour atteindre dans des conditions idéale près de 50GHz, sans changement fondamental des dimensions de la photodiode. Dans l'hypothèse d'une réduction totale de la capacité du plot de contact, c'est-à-dire ou nous ne considérons que la capacité intrinsèque de la photodiode, la fréquence de coupure serait encore multipliée d'un facteur 3, pour atteindre la valeur absolue idéale de 150GHz.

IV.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré une nouvelle filière de matériau, le GaAsSbN, en accord de maille sur GaAs, dont l'énergie de bande interdite autorise la photodétection à la longueur d'onde $1,3\mu\text{m}$ des télécommunications optiques, pour la réalisation de photodiodes PIN-guide. Ces structures, de type guide d'onde absorbant éclairé par la tranche, concilient temps de transit très court, capacité très faible, et rendement quantique élevé si l'on peut assurer un bon couplage à la fibre optique. Dans ce but, nous avons fabriqué des photodiodes PIN-guide de structure simple, de type micro-ruban, à éclairage latéral direct, sans guide évanescent comme pour les photodiodes du chapitre précédent. Deux types de structures ont été fabriquées et étudiées sur des matériaux provenant du groupe du Professeur Yoon Soon Fatt à

NTU de Singapour. La première possède des couches de confinement PIN de part et d'autre de la couche intrinsèque GaAsSbN purement GaAs. La seconde structure possède en plus dans les couches de confinement des couches d'AlGaAs qui rendent le guide absorbant multimode. Comme l'avait prévu les modélisations de Xu Zhe, Doctorant dans le groupe du Professeur Yoon Soon Fatt à NTU de Singapour, les coefficients de réponse (responsivity), donc les rendements quantique externes, sont améliorés avec AlGaAs, grâce à un meilleur couplage à la fibre optique. On atteint ainsi une valeur record de 0,72A/W sans traitement antiréfléchissant de la face d'entrée du PIN-guide à la longueur d'onde de 1,3 μ m. Les mesures dynamiques ont montré que nos photodiodes présentent des fréquences de coupure supérieures à 16GHz limitées par la résistance d'accès de la photodiode. Les photodiodes ainsi réalisées présentent des performances remarquables en termes de coefficient de réponse et de fréquence de coupure qui peuvent être comparées aux photodiodes en filière InP. Ces photodiodes sont fabriquées sur le substrat GaAs, et représentent, peut-être, de nouvelles perspectives pour la réalisation de photodiodes performantes sur substrat GaAs, potentiellement moins cher que le substrat InP. Nous tenons également à signaler ici que nous avons également fabriqué des photodiodes PIN-guide sur des matériaux du groupe du Professeur Yoon Soon Fatt à NTU de Singapour, adaptées à la longueur d'onde 1,55 μ m des télécommunications optiques. Etant donné que la structure est exactement la même que celle que nous venons décrire dans ce chapitre, en dehors du matériau proprement dit, nous n'avons pas repris cette étude ici, qui sera détaillée dans le mémoire de thèse de Xu Zhe. Nous pouvons néanmoins, affirmer que les résultats sont prometteurs, bien que plus modestes en terme de performances (coefficient de réponse autour de 0,25A/W et fréquence de coupure autour de 10GHz, courant de fuite au-delà de plusieurs dizaines de μ A). Le côté limitant est ici le désaccord de maille de la couche active avec le substrat qui induit des défauts en son sein, augmente le courant de fuite, et par conséquent limite la tension inverse applicable, et donc coefficient de réponse et la fréquence de coupure. Il apparaît donc que l'application à la photodétection à la longueur d'onde de 1,55 μ m en filière GaAs est plus difficile à obtenir avec cependant des premiers résultats très prometteurs.

IV.7. Références

- [1] S. Wicaksono, S. F. YOON, K. H. TAN, W. K. LOKE
Characterization of small-mismatch GaAsSbN on GaAs grown by solid source molecular beam epitaxy
J. Vac. Sci. Technol. B, Microelectron. Process. Phenom, Vol.23, n°3, pp. 1054-1059, may 2005
- [2] K. H. TAN, S. F. YOON, W. K. LOKE, S. WICAKSONO, K. L. LEW, A. STÖHR, O. ECIN, A. POLOCZEK, A. MALCOCI, and D. JÄGER
High-speed picosecond pulse response GaNAsSb p-i-n photodetectors grown by rf plasma-assisted nitrogen molecular beam epitaxy
APPL. Phys. Lett. 90, 183515, 2007
- [3] S. WICAKSONO, S. F. YOON, W. K. LOKE, K. H. TAN, K. L. LEW, M. ZEGAOUI, J. P. VILCOT, D. DECOSTER and J. CHAZELAS
Effect of growth temperature on defect states of GaAsSbN intrinsic layer in GaAs/GaAsSbN/GaAs photodiode for 1.3 μ m application
J. Appl. Phys. 102, 044505, 2007
- [4] X. ZU, S. F. YOON, W. K. LOKE, C. Y. NG, K. H. TAN, S. WICAKSONO, N. SAADSAOUD, D. DECOSTER, M. ZEGAOUI and J. CHAZELAS
Design considerations for 1.3 μ m GaAsSbN-GaAs high speed and high quantum efficiency waveguide photodetectors
J. Lightw. Technol, Vol. 27, n°. 13, pp. 2518-2524, Jul. 2009
- [5] S. FEDDERWITZ, A. STOHR, S. F. YOON, K. H. TAN, M. WEISS, W.K. LOKE, A. POLOCZEK, S. WICAKSONO, and D. JAGER
Multigigabit 1.3 μ m GaAsSbN/GaAs photodetectors
Appl. Phys. Lett, Vol. 93, n°3, pp. 033509-1_033509-3, Jul. 2008
- [6] K. H. TAN, S. F. YOON, W. K. LOKE, S. WICAKSONO, Z. XU, T. K. Ng, K. L. LEW, N. SAADSAOUD, M. ZEGAOUI, D. DECOSTER and J. CHAZELAS
1.55 μ m GaAs/GaAsSbN/GaAs optical waveguides grown by radio frequency nitrogen plasma-assisted molecular beam epitaxy
Appl. Phys. Lett. 92. 113513, 2008
- [7] J. E. BOWERS, C. A. BURRUS
Ultrawide-band long-wavelength p-i-n photodetectors
J. Lightw. Technol, Vol. 5, n°.10, pp. 1339-1350, Oct. 1987
- [8] K. KATO, A. KOZEN, Y. MURAMOTO, Y. ITAYA, T. NAGTSUMA and M. YAITA
110-GHz, 50% efficiency mushroom-mesa waveguide p-i-n photodiode for a 1.55 μ m wavelength
IEEE Photon. Technol. Lett, Vol. 6, n°. 6, pp. 719-721, Juin. 1994
- [9] K. KATO
Ultrawide-band/high-frequency photodetectors
IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques, Vol. 47, n°.7, pp. 1265-1281, July 1999

- [10] K. JANG, K. LEE, J. KIM, S. HWANG, J. LEE, S. K. DHUNGEL, S. JUNG, J. YI
Effect of rapid thermal annealing of sputtered aluminium nitride film in an oxygen ambient
Materials Science in Semiconductor, 2006, Vol. 9, pp. 1137-1141.
- [11] A. KADOUN, D. BARBIER
Compared rapid thermal annealing procedures of InP
Materials Science in Semiconductor B90, 2002, Vol. 9, pp. 110-113.
- [12] M. ZEGAOU, N. CHOUEIB, P. TILMANT, M. FRANCOIS, C. LEGRAND, J. CHAZLAS, D. DECOSTER
A novel bondpad report process for III-V semiconductor devices using full HSQ properties
Microelectronic Engineering 86 (2009), pp. 68-71
- [13] Z. XU, N. SAADSAOUD, M. ZEGAOU, W. K. LOKE, K. H. TAN, S. WICAKSONO, S. F. LEGRAND, D. DECOSTER,
and J. CHAZELAS
DC Performance of high-quantum-efficiency 1.3 μ m GaNAsSb/GaAs waveguide photodetector
IEEE. Elect. Lett, Vol. 31, n $^{\circ}$. 5, may 2010
- [14] M. ZEGAOU, X. XU, N. SAADSAOUD, K. H. TAN, W. K. LOKE, S. WICAKSONO, S. F. YOON, C. LEGRAND, D.
DECOSTER, and J. CHAZELAS
High-Speed 1.3 μ m p-i-n GaNAsSb/GaAs waveguide photodetector
IEEE. Elect. Lett, Vol. 31, n $^{\circ}$. 7, july 2010

Conclusion générale

Ce travail de thèse est d'ordre essentiellement technologique et expérimental. Le dénominateur commun de cette thèse est une technologie pour composants optoélectroniques, de type guide d'onde de la filière InP et GaAs. Elle a été appliquée, soit à de nouvelles structures avec des matériaux considérés comme classiques pour l'optoélectronique des télécommunications optiques, c'est-à-dire ceux de la filière InP, soit à des matériaux nouveaux de la filière GaAs, susceptibles de remplacer les matériaux de la filière InP pour les télécommunications optiques aux longueurs d'onde $1,3\mu\text{m}$ et $1,55\mu\text{m}$. Les applications visées sont ici la photodétection rapide ou la commutation pour les télécommunications optiques.

Nous avons été ainsi amenés à fabriquer quatre types de dispositifs, correspondant aux quatre chapitres de cette thèse.

Le premier chapitre concerne l'étude des variations d'indice dans un guide d'onde InP/GaInAsP/InP en arête, par injection d'un courant à l'aide d'un contact Schottky. Il s'agissait ici d'étudier dans quelle mesure il est possible de remplacer les structures PIN qui sont le moteur de la commutation optique, mais délicates à réaliser technologiquement, par une structure technologiquement plus simple à fabriquer. La structure du guide d'onde est celle habituellement utilisée dans les commutateurs de l'IEMN, seule la jonction est ici à contact Schottky. Nous avons montré, comme on pouvait si attendre, que les variations d'indice optique par effet de porteurs libres n'existent pas dans ces dispositifs. Ils sont une conséquence d'un fonctionnement par porteurs majoritaires sans accumulation, alors que dans une PIN, ce sont les porteurs minoritaires qui jouent un rôle déterminant et qui s'accumulent dans le matériau à petit gap. En revanche, des variations d'indice très importantes, pouvant être supérieures à 0,1, ont été mesurées. Elles sont la conséquence d'un effet thermique, c'est-à-dire d'un échauffement, sous injection d'un courant en polarisation directe. Cet effet thermique disparaît pour une épaisseur de métal d'électrode suffisante pour jouer un rôle de radiateur. Lorsque les effets thermiques se manifestent pour induire les variations d'indice optique, la rapidité du mécanisme se situe aux environs d'une microseconde, ce qui est beaucoup plus long que les effets par porteurs libres, dont la rapidité se situe autour de quelques nanosecondes. Pour la commutation optique rapide, les effets thermiques sont plutôt à exclure, sauf peut être si une réduction drastique des dimensions des guides peuvent se traduire par des temps de réponse thermique beaucoup plus courts. Par ailleurs, cette étude a aussi montré que les effets thermiques peuvent avoir un rôle non négligeable dans la dégradation des effets par porteurs libres, puisque ces deux effets sont antagonistes pour les variations d'indice.

Le deuxième chapitre est consacré à une structure de guide d'onde passive et active sur un substrat GaAs à base d'une double hétérostructure GaAs/GaAsSbN/GaAs. Le GaAsSbN représente une nouvelle filière de matériaux III-V à petite énergie de bande interdite. La croissance est effectuée en accord de maille sur GaAs par épitaxie par jets moléculaires, dans le groupe du Professeur Yoon Soon Fatt à l'Université Technologique de Nanyang (NTU) de Singapour. Par un choix judicieux de leur composition, ces

matériaux sont adaptés à la photodétection à la longueur d'onde $1,3\mu\text{m}$. L'objet du travail présenté dans ce chapitre, a été d'évaluer dans quelle mesure, ils peuvent être utilisés pour la réalisation de guides optiques passifs et actifs à la longueur d'onde des télécommunications optiques de $1,55\mu\text{m}$. L'intérêt se situe dans une approche tout à fait similaire à celle du guide optique de la filière InP décrit dans le premier chapitre, approche qui n'existe pas actuellement en filière GaAs, par manque de matériau III-V d'énergie de bande interdite inférieure à celle du GaAs, et en accord de maille avec le GaAs. C'est ainsi qu'en filière GaAs, jusqu'à présent le cœur du guide optique étant le GaAs, il est nécessaire d'introduire une épaisse couche d'isolation optique en AlGaAs entre cette couche de cœur et le substrat qui est lui aussi en GaAs. L'évaluation de cette nouvelle filière sur GaAs pour l'optique intégrée à la longueur d'onde de $1,55\mu\text{m}$, a donc l'intérêt d'une structure épitaxiale plus simple, de la maturité technologique plus importante de la filière GaAs et d'un coût de réalisation plus faible. Nos réalisations technologiques et nos expériences, ont montré que ces matériaux GaAsSbN possèdent bien un indice optique supérieur à celui de GaAs. Nous avons pu aussi démontrer la possibilité de réaliser des guides optiques à la longueur d'onde $1,55\mu\text{m}$ avec une structure tout à fait analogue à celle de la filière InP décrite au premier chapitre. Néanmoins, ces guides sont caractérisés par des pertes très importantes, incompatibles avec l'optique intégrée, qui sont dues, semble-t-il, à des défauts dans le matériau. De la même façon, nos expériences, entreprises sur des structures actives de type PIN, se sont traduites par des variations d'indice optique qui semblent essentiellement d'ordre thermique, sans que les effets de porteurs libres aient vraiment pu être mis en évidence. Ce comportement surprenant pour une structure PIN, est probablement lié à une densité de porteurs résiduels dans la couche de cœur GaAsSbN déjà trop importante pour mettre en évidence un effet d'injection et d'accumulation de porteurs libres. La question qui peut se poser pour une application en optique intégrée, serait peut-être d'étudier des matériaux GaAsSbN à teneur en azote plus faible, de bande interdite plus grande, en accord de maille sur GaAs, transparents à la longueur d'onde de $1,55\mu\text{m}$ et peut-être à la longueur d'onde de $1,3\mu\text{m}$, qui auraient l'avantage de mettre en œuvre des matériaux plus proches de GaAs, de croissance plus accessible, et donc d'avoir une qualité plus proche de celle compatible avec les nécessités de l'optique intégrée.

Le troisième chapitre est consacré à la photodétection sur InP. Il s'agit ici de fabriquer une photodiode à la longueur d'onde $1,55\mu\text{m}$ de coefficient de réponse (responsivity) voisine de $0,9\text{A/W}$, de fréquence de coupure 20GHz , et de photocourant maximal 50mA . Cette action fait partie du Plan d'Etude Amont ORGE de la DGA, mené par Thales Système Aéroportés. La structure retenue dans ce projet est une photodiode à un seul type de porteur ou UTC (Uni Traveling Carrier) couplée par onde évanescente à un guide multimode dilué. Le signal optique est couplé à ce guide multimode avec un éclairage par la tranche, et la structure du guide a été optimisée judicieusement par Vincent Magnin et Joseph Harari, pour coupler l'onde optique se propageant dans le guide optique à la photodiode de façon la plus totale, et uniforme possible. En principe, la photodiode UTC a l'avantage d'être adaptée à la photodétection de puissance, puisque la couche absorbante en GaInAs est dopée de type P, ce qui permet d'éviter les effets d'écrantage du champ électrique sous forte puissance optique. L'approche choisie ici, avec un éclairage

par guide d'onde, autorise une couche absorbante active mince, sans nuire au rendement quantique de la photodiode. C'est donc cette voie qui a été choisie par l'IEMN pour le PEA ORGE, qui apparait peut-être complémentaire de la voie développée par le 3-5 Lab avec une UTC éclairée par le substrat, mais aussi plus exploratoire. La photodiode que nous avons réalisée a une partie active intermédiaire entre la structure UTC et la structure PIN, de façon à être en dehors d'un brevet NTT. Notre première structure est du type microruban adaptée à une fibre lentillée de diamètre de mode $2,5\mu\text{m}$. Nos résultats expérimentaux ont montré que cette photodiode possède, avec une fibre lentillée de diamètre de mode $4,5\mu\text{m}$, un coefficient de réponse externe de $0,53\text{A/W}$ sans antiréfléchissant sur la face d'entrée, une bande de fréquence de 20GHz , et un photocourant maximal supérieur de 35mA . Une deuxième génération de photodiodes, à accès coplanaire prévue pour être couplée à une fibre lentillée de diamètre $4,5\mu\text{m}$, présente cette fois-ci un coefficient de réponse sans antiréfléchissant de $0,85\text{A/W}$ avec la fibre lentillée de diamètre de mode de $4,5\mu\text{m}$, une bande de passante 23GHz , et un photocourant maximal à la saturation de 30mA . Cette deuxième photodiode n'a pas été décrite dans ce mémoire pour des raisons de confidentialité. Dans tous les cas, nos deux photodiodes souffrent d'un fonctionnement en puissance encore limité, malgré des performances à l'état de l'art pour une photodiode guide d'onde. Cette limite en puissance provient essentiellement de la résistance de contact parasite trop importante (30Ω pour la première génération et 70Ω pour la deuxième génération) qui a pour conséquence un effet de dépolarisation de la photodiode sous fort photocourant et une limitation par effet thermique. La prochaine étape sera de modifier la structure pour réduire de façon significative cette résistance d'accès, et atteindre ainsi les 50mA espérés.

Le quatrième chapitre est relatif à l'évaluation de cette nouvelle filière de matériau GaAsSbN issue du groupe du Professeur Yoon Soon Fatt à NTU de Singapour, pour la réalisation de photodiodes PIN-guide fonctionnement à la longueur d'onde de $1,3\mu\text{m}$. Cette étude, en collaboration avec NTU de Singapour, dans le cadre d'un projet MERLION soutenu par l'Ambassade de France à Singapour, est effectuée en parallèle de la thèse de Xu Zhe, orientée exclusivement sur l'étude de ces photodiodes PIN-guide aux deux longueurs d'onde $1,3\mu\text{m}$ et $1,55\mu\text{m}$. Les dispositifs que nous avons fabriqués, qui apparaissent dans ce chapitre quatre, et qui sont inclus également dans la thèse de Xu Zhe, sont à éclairage direct par la tranche. Autrement dit, ce sont des guides d'onde à cœur absorbant non dopé, dont les couches de confinement sont dopées respectivement P et N. Le signal optique, injecté par la face clivée, se propage et est absorbé dans ce guide d'onde, en créant ainsi le photocourant. Cette structure, connue en filière InP depuis les années 1990, a l'avantage de concilier temps de transit court, faible capacité, et bon rendement quantique. Elle n'est pas adaptée à la puissance comme la photodiode du chapitre trois. Notre démarche a été ici, par la réalisation de cette photodiode et sa caractérisation, de vérifier l'aptitude de cette nouvelle filière de matériau GaAsSbN sur substrat GaAs, à la photodétection rapide à la longueur d'onde de $1,3\mu\text{m}$. Nous avons ainsi démontré un coefficient de réponse de $0,7\text{A/W}$ sans traitement antiréfléchissant pour des photodiodes comportant des couches de confinement GaAs/AlGaAs, et une fréquence de coupure de $16,5\text{GHz}$. Ces performances ont été obtenues pour des tensions de polarisation de -10V , révélant

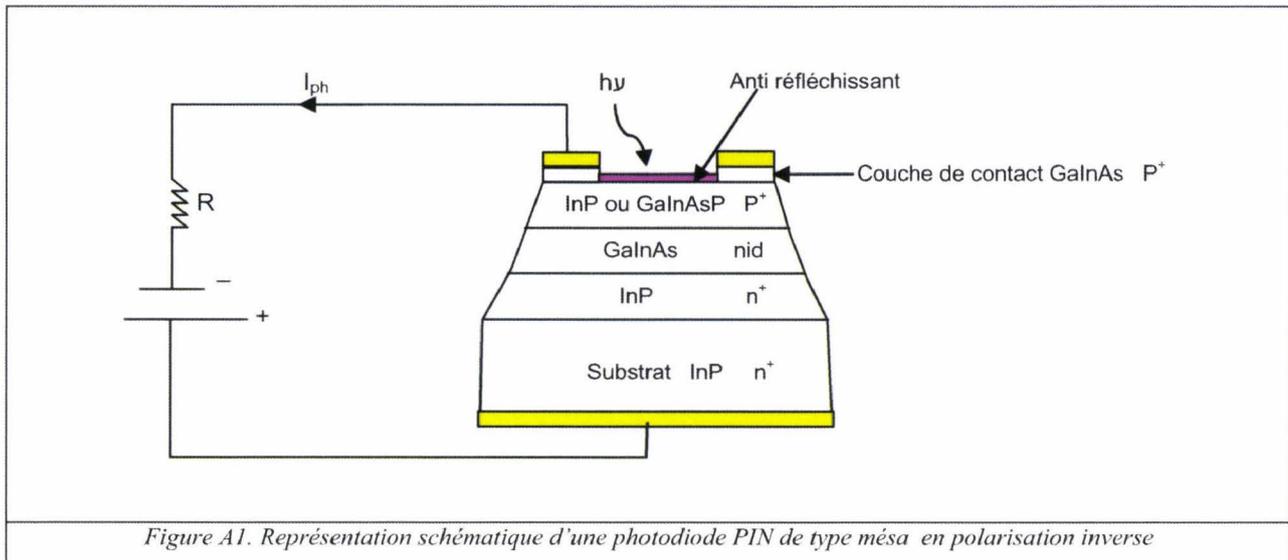
probablement un dopage résiduel un peu fort. Nous avons également fabriqué des photodiodes PIN-guide fonctionnant à la longueur d'onde de $1,55\mu\text{m}$. Celles-ci n'ont pas été détaillées dans le chapitre 4. Elles révèlent un courant d'obscurité relativement élevé qui résulte d'un matériau GaAsSbN en désaccord de maille, qui ne permet pas une tension de polarisation suffisamment élevée, ce qui conduit à un coefficient de réponse et une fréquence de coupure plus faible. Néanmoins, nos résultats sont très prometteurs en ce qui concerne la photodétection à la longueur d'onde de $1,3\mu\text{m}$. Même si un effort du point de vue matériau est à prévoir, celui-ci semble relativement modeste à la longueur d'onde $1,3\mu\text{m}$. Il sera peut-être plus important en ce qui concerne la photodétection à la longueur d'onde $1,55\mu\text{m}$.

En résumé, notre travail de thèse a consisté à fabriquer un certain nombre de dispositifs d'essai avec une approche technologique sensiblement équivalente. L'idée était, chaque fois, de vérifier un certain nombre de concepts qui se sont parfois confirmés et parfois infirmés. Cependant, les réponses à ces questions impliquaient forcément des réalisations technologiques ; elles ne pouvaient pas être prévisibles uniquement par modélisation. Notre philosophie ici était l'aide à la vérification de nouveaux concepts par la technologie et l'expérience.

ANNEXE A : Photodiodes PIN et UTC

A.I Photodiode PIN

Nous présentons très succinctement ici la structure et le fonctionnement d'une photodiode PIN classique de la filière InP pour des applications en télécommunications optiques. Comme indiqué figure A1, elle est généralement constituée d'une couche n^+ tampon en InP transparente, d'une couche active absorbante en GaInAs adaptée en maille à InP, et d'une couche fenêtre P transparente en InP ou en quaternaire.

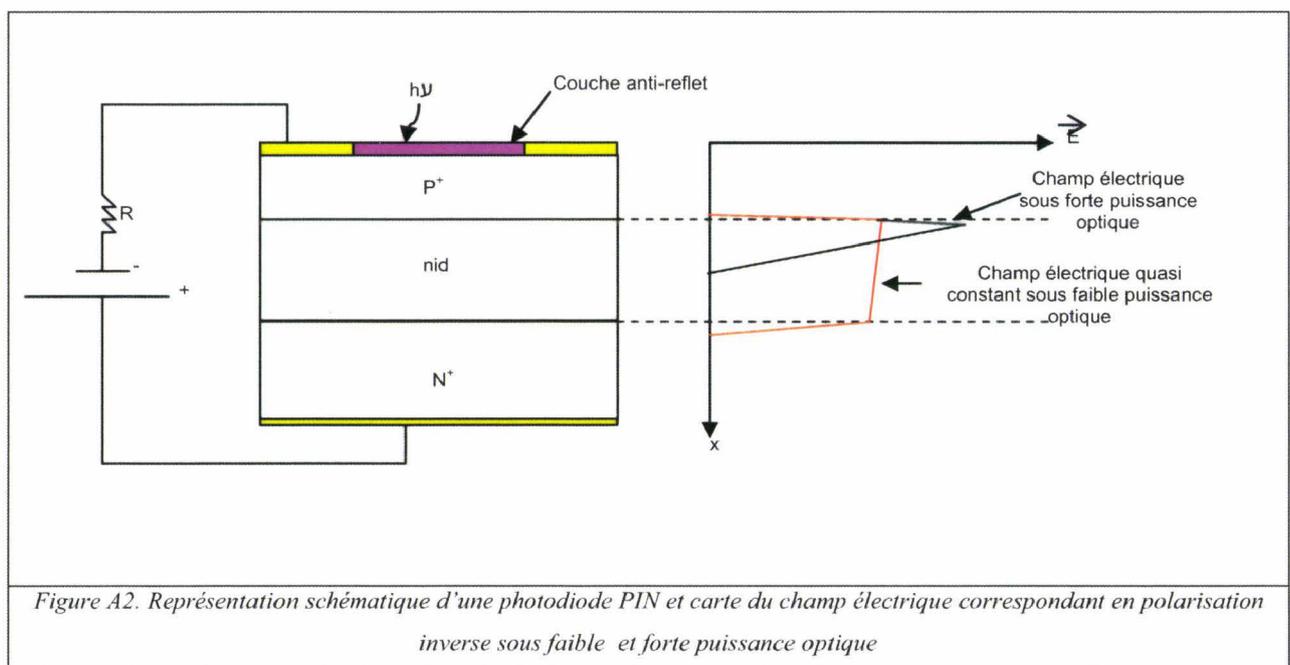


Généralement une couche de contact de type P^+ est ajoutée pour faciliter la réalisation du contact ohmique de type P. L'ensemble de ces couches est obtenu par croissance épitaxiale, la plupart du temps sur un substrat InP de type N^+ . La figure A1 montre l'ensemble de cette structure épitaxiale, mais aussi une photodiode de type méso qui est parmi les photodétecteurs les plus simples à mettre en œuvre pour un éclairage par le dessus ; cette photodiode comporte un contact ohmique de type P^+ sur le dessus, ouvert pour laisser passer le signal optique incident sur la photodiode, et un contact ohmique de type n face arrière. Un traitement antiréfléchissant par couche diélectrique est généralement effectué sur la surface de la fenêtre d'entrée de la photodiode. Sur le schéma de la figure A1, la photodiode est polarisée en inverse. Le GaInAs, par son énergie de bande interdite plus faible que l'énergie des photons de longueur d'onde $1,3\mu\text{m}$ ou $1,55\mu\text{m}$, permet la photocréation de paires électron-trous dans le GaInAs non intentionnellement dopé. En polarisant la diode en inverse, on crée un champ électrique quasi-uniforme dans le GaInAs qui sépare les paires électron-trou ; ceux-ci génèrent ainsi un photocourant dans les contacts. Dans cette configuration, le rendement quantique de la photodiode est lié à l'épaisseur de la couche absorbante. Si α est le coefficient d'absorption du matériau absorbant (ici le GaInAs), un bon rendement quantique exige une épaisseur de GaInAs supérieure à la profondeur de pénétration $1/\alpha$ de la lumière. Par exemple, dans le cas de la photodiode de la figure A1, les épaisseurs de GaInAs doivent être supérieures à $1,5\mu\text{m}$ et se situe plutôt autour de $2\mu\text{m}$ - $2,5\mu\text{m}$. On peut diviser d'un facteur 2 cette épaisseur en éclairant la photodiode par le substrat et en déposant la métallisation P sur toute la surface de la diode

pour obtenir un effet miroir. La fréquence de coupure est limitée par le temps de transit et la capacité de photodiode [1]. Ces deux effets sont antagonistes. Un temps de transit court des photoporteurs augmente la fréquence de coupure liée à cet effet, ce qui implique une diminution de l'épaisseur de la couche intrinsèque absorbante. En même temps, cette diminution d'épaisseur augmente la capacité de la photodiode, et par conséquent réduit la fréquence de coupure liée aux effets capacitifs, c'est-à-dire à la constante de temps RC où R est la résistance de charge de la photodiode. Il faut donc trouver un compromis entre ces deux effets pour optimiser la fréquence de coupure de la diode. Il faut veiller aussi à ce que l'épaisseur retenue soit compatible avec un rendement quantique suffisant. A titre d'exemple, une photodiode rapide de bande passante 20GHz et de rendement quantique supérieur à 70% peut être constituée d'une couche de GaInAs de 1,5 μm d'épaisseur et posséder un diamètre de 20 à 30 μm . Pour plus de précision sur la physique et la structure de la photodiode nous renvoyons aux thèses de J. P. Gouy [1] et Frédéric JOURNET[2].

Lors d'un fonctionnement sous forte puissance optique, la densité de photoporteurs créés dans la zone absorbante de la photodiode devient très importante [2]. Cette densité peut atteindre des valeurs telles, que le champ électrique initialement uniforme sous faible puissance optique (ou quasi-uniforme) s'annule dans une partie de la zone active de la photodiode (voir figure A2). Cet effet d'écrantage du champ électrique a pour conséquence :

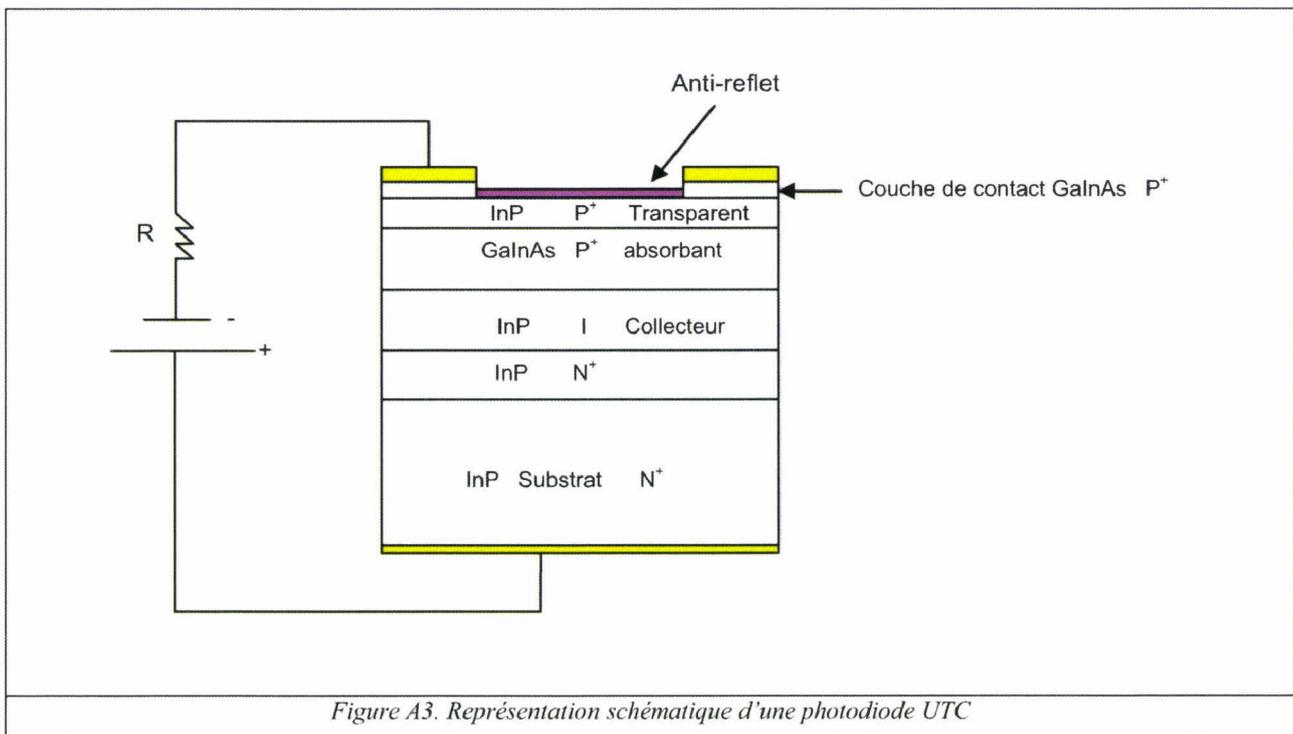
- ✓ Une augmentation de l'accumulation des porteurs de la diode et donc une réduction du temps de transit des photoporteurs.
- ✓ Une augmentation de la capacité de la photodiode
- ✓ Une possibilité de claquage par la pointe de champ électrique à l'interface entre le matériau absorbant et la couche P⁺



A cela s'ajoute une possibilité de dépolarisation de la photodiode par un photocourant élevé qui traverse les résistances parasites d'accès. L'ensemble de ces phénomènes vont se traduire par l'apparition d'un comportement non-linéaire de la photodiode, et d'une puissance microonde maximale que peut délivrer la photodiode. Cette puissance maximale est sensiblement proportionnelle au volume de la photodiode. Il en résulte que les photodiodes rapides, capables de détecter les signaux microonde comme la photodiode décrite précédemment, ont des puissances microondes maximales tolérables de l'ordre de 0dBm [2], [3].

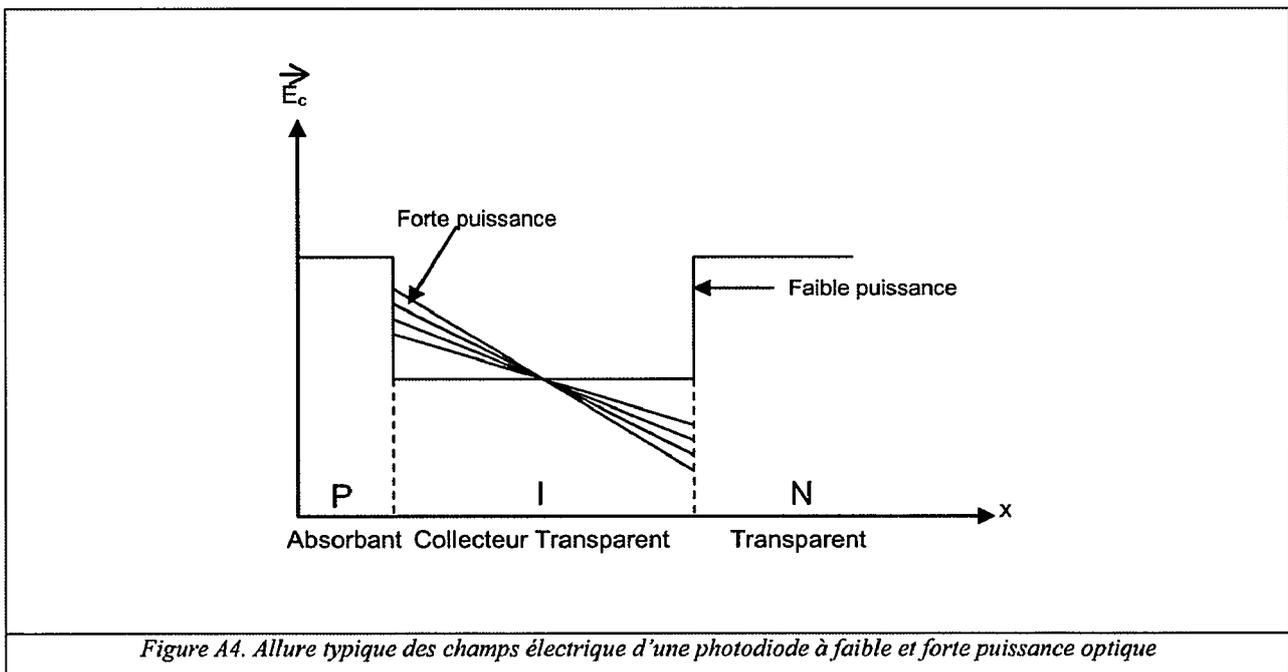
A2. Photodiode UTC

La photodiode PIN est limitée par l'apparition d'effets non linéaires sous forte puissance optique [3] [4], [5], [6]. C'est pour surmonter cette limitation qu'ont été introduites par NTT, dans les années 95, les photodiodes à un seul type de porteurs, dites photodiodes UTC (Uni Travelling Carrier) dont la structure de base est donnée figure A3 [7]. Dans le cas des photodiodes PIN, nous avons vu que la principale limitation sous forte puissance optique est l'effet d'écrantage du champ électrique qui s'annule dans une partie de la couche absorbante intrinsèque à cause de la forte densité de photoporteurs [3], [6], [8], [9].



L'idée de base de la photodiode UTC est de photocréer des porteurs dans une région sans champ électrique, avec un transport électrique régit par un mécanisme de diffusion. Ceci implique que la couche absorbante soit dopée de type P et la région intrinsèque appelée collecteur, est une région transparente au signal optique. Dans ces conditions, lorsque l'on crée des paires électron-trou par photogénération dans le GaInAs de type P, les seuls porteurs à l'origine du photocourant seront les porteurs minoritaires, c'est-à-

dire ici les électrons. Ceux-ci se déplacent par un mécanisme de diffusion jusqu'au collecteur où ils sont récupérés par le champ électrique. Sous forte puissance optique, les effets d'écrantage du champ électrique par les photoporteurs n'existent pas dans le GaInAs absorbant, puisque il n'y a aucun champ électrique. En revanche, il est nécessaire de conserver un champ électrique suffisamment fort dans le collecteur pour limiter la densité de photoporteurs dans cette région et les faire participer au photocourant pour éviter les effets non linéaires. Une façon de surmonter cette difficulté et de prévoir de collecteur fin ou un collecteur à modulation de dopage (thèse de Mourad Chtioui) [10]. Nous donnons ci-dessous (figure A4) l'allure typique des champs électriques dans une photodiode UTC sous faible et forte puissance optique avec le collecteur sans modulation de dopage.



Nous renvoyons le lecteur aux thèses de Frédéric Journet [1], Alexandre Beck [11], Mourad Chtioui [10] et l'ouvrage édité par Didier Decoster et Joseph Harari sur ces photodétecteurs [9].

Références de l'annexe A

- [1] J. P. GOUY,
Etude comparative de la photodiode PIN, de la Photodiode à avalanche et du photoconducteur sur matériaux III-V
Thèse, Université Lille1, 5 Juillet 1989
- [2] F. JOURNET
Modélisation de photodiodes PIN pour un fonctionnement en hyperfréquence sous forte puissance
Thèse, Université Lille1, 27 Mars 1996.
- [3] J. HARARI, F. JOURNET, O. RABII, G. JIN, J. P. VILCOT, D. DECOSTER
Modeling of waveguide PIN photodetectors under very high optical power
IEEE Trans, on Microwave theory and Techniques, Vol. MTT-43(9), pp. 2304-2310, 1995
- [4] K. J. WILLIAMS
“Comparaisons between dual-depletion-region and Uni-Traveling-Carrier p-i-n photodetectors”
IEE Proc-Optoelectron, vol. 149, n° 4, pp. 131-137, August 2002
- [5] K. J. WILLIAMS, R. D. ESMAN
“Large signal compression-current measurements in high-power microwave pin photodiode”
IEE Electronics Letters, vol. 35, n° 1, pp. 82-84, January 99
- [6] M. DENTAN
Etude et réalisation de photodiodes PIN InGaAs fonctionnant en hyperfréquences en grands signaux sous faible polarisation. Etude théorique et expérimentale de ce dispositif
Thèse Université Paris-Sud, 21 Decembre 1989
- [7] T. ISHIBASHI, T. FURURA, H. FUSHIMI, S. KODAMA, H. ITO, T. NAGATSUMA, N. SHIMIZU, and Y. MIYAMATO
“InP/InGaAs Uni-Traveling Carrier photodiodes”
IEICE Trans. Electron, Vol. E83-C, n° 6, pp. 938-949, June 2000
- [8] P. POULAIN, B. DE CREMOUX,
Diffusion limited transient response of heterojunction photodiodes
Japanese J. Appl. Phys, vol. 19, n°4, pp. L189-L192, 1980
- [9] D. DECOSTER, J. HARARI
Détecteurs optoélectroniques
Edition Hermès Science Publications, Paris 2002.
- [10] M. CHTIOUI
Photodiode UTC de puissance pour les liaisons optique / hyperfréquences et la sommation de signaux hyperfréquences par voie optique
Thèse, Université Lille1, Décembre 2008.

[11] A. BECK

Réalisation et caractérisation de photodiodes à transport unipolaire pour la génération d'ondes téraherts

Thèse Université Lille 1, 3 Décembre 2008.

ANNEXE B : Guides d'onde optique en arête sur InP

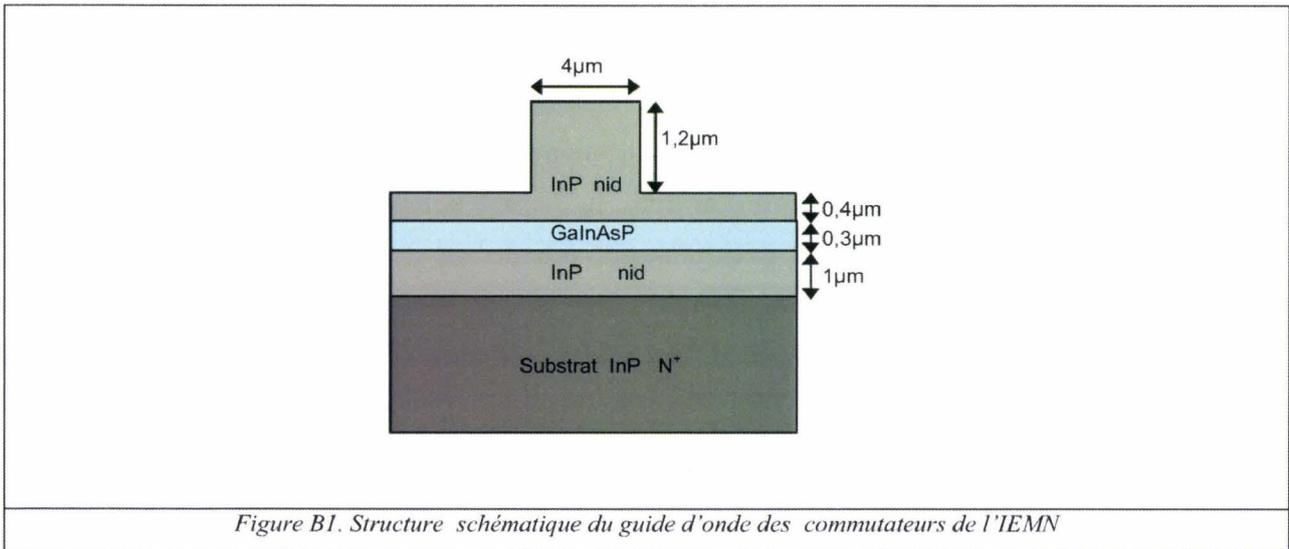
B1 Guides passifs

La structure de ces guides d'onde est connue depuis près de 30 ans, dès lors que les premiers travaux de croissance épitaxiale aient permis l'obtention des matériaux de la filière InP avec une qualité suffisante. Ils sont généralement constitués d'une double hétérostructure InP/GaInAsP/InP. Le GaInAsP d'énergie de bande interdite plus petite que l'InP, présente dans son domaine de transparence, un indice optique supérieur à celui d'InP. Pour mémoire, nous donnons dans le tableau B, l'indice optique de quelques quaternaires de la filière InP et de l'InP pour les longueurs d'ondes 1,3 μ m et 1,55 μ m des télécommunications optiques [1-5].

Matériaux	Eg (eV)	$\lambda = 1.55\mu\text{m}$	$\lambda = 1.3\mu\text{m}$
InP	1.34	3.1647	3.2026
InGaAsP $_{\lambda=1.1\mu\text{m}}$	1.12	3.282	-
InGaAsP $_{\lambda=1.18\mu\text{m}}$	1.08	3.315	3.382
InGaAsP $_{\lambda=1.2\mu\text{m}}$	1.03	3.33	-
InGaAsP $_{\lambda=1.25\mu\text{m}}$	0.99	3.35	-
InGaAsP $_{\lambda=1.3\mu\text{m}}$	0.95	3.38	-
InGaAsP $_{\lambda=1.40\mu\text{m}}$	0.93	3.43	-
Ga _{0.47} In _{0.53} As	0.75	3.57-j.0.081	3.57-j.0.114

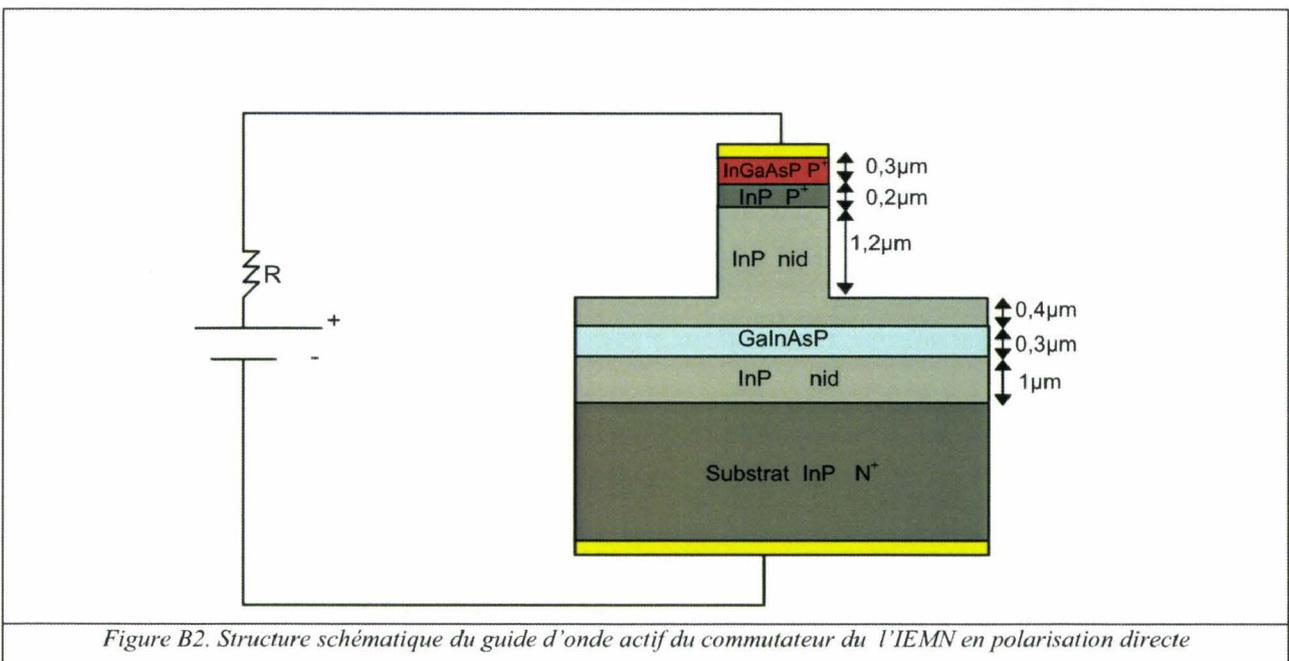
Tableau B. Indice optique de quelques matériaux en accord de maille sur InP [1-5].

Sachant que le quaternaire a un indice optique supérieur à celui de l'InP, il joue le rôle de cœur du guide dans lequel le maximum de lumière vient se propager. Les couches d'InP sont appelées "couches de confinement". En effet, l'indice optique de l'InP, par différence avec l'indice du quaternaire, va définir le confinement vertical de la lumière dans cette structure de guide d'onde. Pour obtenir un guide complet, il faut pouvoir confiner la lumière latéralement, ce qui impose une différence d'indice, avec un indice supérieur là où la lumière est confinée. Différentes techniques existent. Celle que nous utilisons pour les commutateurs de l'IEMN, consiste à graver l'épitaxie de façon à définir un guide en arête. Cette gravure de part et d'autre de l'arête, permet d'obtenir une différence d'indice effectif entre la propagation sous l'arête et de part et d'autre de l'arête. Bien sûr, l'indice effectif est plus important sous l'arête que de part et d'autre (il ya plus de matériau semi-conducteur d'indice élevé sous l'arête que de part et d'autre). Nous donnons figure B1 la structure schématique du guide d'onde du commutateur de l'IEMN. De façon plus précise, l'épaisseur du quaternaire se situe aux environs de 3000Å, la hauteur de l'arête est d'environ 1,5 μ m, et l'épaisseur d'InP au dessus de quaternaire en dehors de l'arête vaut 4000Å.



B2 Guides actifs

Pour rendre ces guides actifs électroniquement, c'est-à-dire caractérisés par une modification d'indice effectif par une action électronique (courant ou tension), le principe que nous avons adopté dans les commutateurs de l'IEMN, consiste à transformer ce guide d'onde par dopage des couches en présence, pour y introduire une structure PIN polarisée en direct dans laquelle on injecte un courant électrique (figure B2). Cette injection de courant se traduit par une accumulation de porteurs (en principe minoritaires) localisée essentiellement dans le matériau à petit gap pendant la durée de vie des paires électron-trou.



Cette augmentation de la densité de porteurs libres induit une diminution de l'indice optique, essentiellement par effet plasma, donnée par l'expression $\Delta n = -\frac{q^2}{2n_0\epsilon_0} \frac{\lambda^2}{4\pi^2 c^2} \left(\frac{\Delta N_n}{m_n^*} + \frac{\Delta N_p}{m_p^*} \right)$, avec q la charge élémentaire, n_0 l'indice de réfraction sans injection de porteurs, λ la longueur d'onde, ΔN_n et ΔN_p les variations de concentration des électrons et trous, m_n^* et m_p^* la masse effective des électrons et des trous [6-7]. Cette variation d'indice est proportionnelle à la densité de porteurs injectés. Ces variations d'indice par effet plasma peuvent être exaltées par l'effet de remplissage de bande qui est d'autant plus élevé que la longueur d'onde du signal optique est proche de la longueur d'onde de coupure du matériau semi-conducteur [8].

Un autre phénomène physique est à prendre en compte dans les effets d'injection de porteurs, pour déterminer la densité de porteurs injecté. Il s'agit des phénomènes de recombinaison des paires électron-trou. En effet, le courant injecté s'exprime comme : $I = \frac{qNV}{\tau}$ où q est la charge élémentaire, N la densité

de porteurs injectés, V le volume de matériau actif où les porteurs sont injectés, et τ la durée de vie les

paires électron-trou. Cette durée de vie peut s'exprimer sous la forme $\tau = \frac{1}{A + BN + CN^2}$, où A , B , et C

sont trois coefficients qui expriment l'importance des trois mécanismes qui régissent ce phénomène de recombinaisons [9]. Sous faible densité de porteurs, la recombinaison est du type Schokley RHEED caractérisée par le paramètre A . Lorsque la densité de porteurs est plus élevée, l'émission radiative devient déterminante ; elle est caractérisée par le paramètre B . Sous très forte injection, l'effet Auger devient prépondérant ; il est caractérisé par le paramètre C . L'expression $\tau = \frac{1}{A + BN + CN^2}$ montre

donc que la durée des paires électron-trou diminue quand la densité de porteurs augmente ; elle est typiquement de l'ordre de quelques nanosecondes, pour des densités de porteurs inférieures à 10^{18} cm^{-3} .

Nous invitons le lecteur à consulter les thèses suivantes pour plus d'information sur ces guides passifs et actifs (Thèse Karine Blary, Thèse Malek Zegaoui, Thèse Nargess Choueib) [10-11-12].

ANNEXE C : Photodiodes à base de guide d'onde

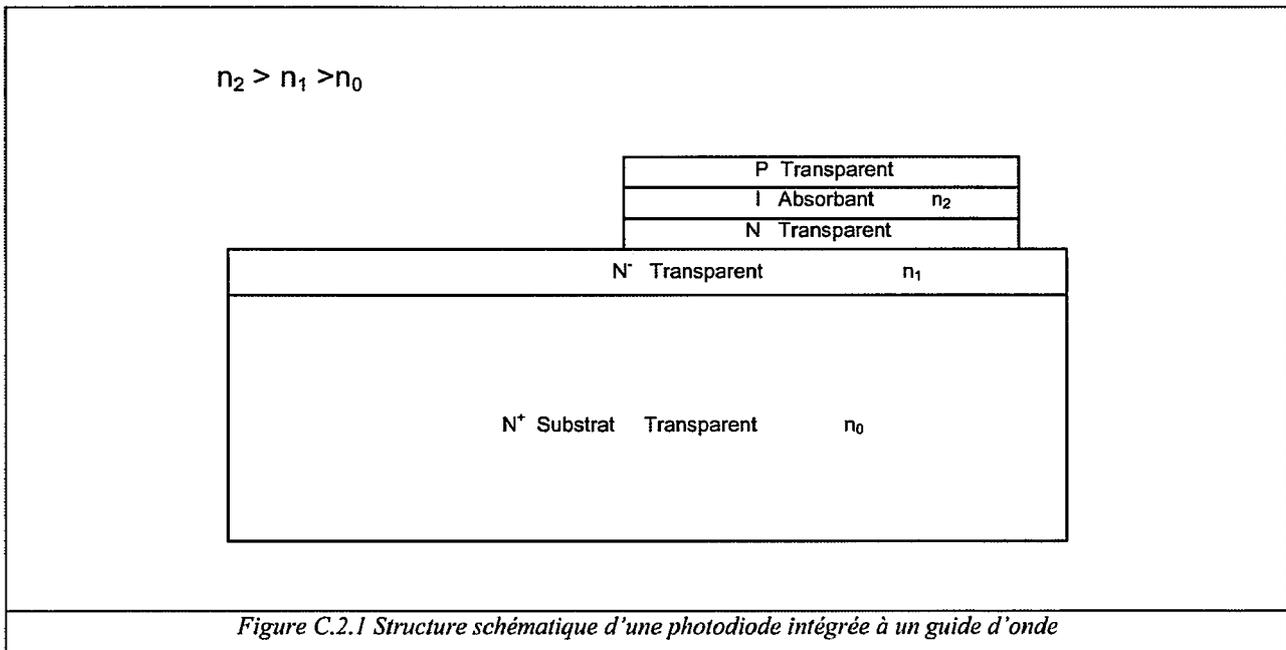
C1 Photodiode PIN-guide

Nous avons vu que la fréquence de coupure d'une photodiode éclairée par le dessus ou le dessous (éclairage vertical) suppose un compromis entre temps de transit et capacité. Il faut que la couche active absorbante soit suffisamment fine pour que le temps de transit des photoporteurs soit suffisamment court. En même temps, il faut qu'elle soit suffisamment épaisse pour réduire la capacité, et aussi pour que le rendement quantique soit suffisamment élevé. Une façon de surmonter cette difficulté a consisté, depuis les années 90, d'introduire des photodiodes PIN-guide, dont la structure est celle d'un guide d'onde semblable à ceux décrits dans l'annexe B, mais dont le matériau de cœur est absorbant. Les couches de confinement sont respectivement de type P et N, alors que le matériau de cœur est intrinsèque. L'éclairage se fait par la tranche par une face clivée ou gravée. Cette façon de procéder, pour laquelle les structures guidantes sont gravées entièrement, y compris au travers de la jonction pour réduire la capacité, a conduit à des fréquences de coupure records, au-delà du domaine millimétrique, par la fabrication de photodiodes très petites de la filière InP, sans nuire au rendement quantique. Typiquement les épaisseurs de couches actives sont de l'ordre de $0,3\mu\text{m}$ à $0,4\mu\text{m}$. La photodiode possède une longueur d'une dizaine de microns et une largeur de $4\mu\text{m}$ à $5\mu\text{m}$. Les longueurs sont courtes, dans la mesure où l'onde optique est absorbée en totalité sur $5\mu\text{m}$ - $6\mu\text{m}$. La faiblesse de cette photodiode se situe dans ce petit volume qui réduit les puissances optiques maximales avant l'apparition des effets non-linéaires, et une création d'une forte densité de porteurs au voisinage de la face d'entrée de la diode qui peut induire à une dégradation du matériau. C'est notamment cette dernière raison qui a poussé les travaux dans la même période, à étudier des photodiodes intégrées monolithiquement à un guide optique.

Pour plus d'information sur ce type de dispositif, le lecteur pourra se reporter aux thèses et Jérôme Van De Castelle [1], de Nicolas Michel [2]

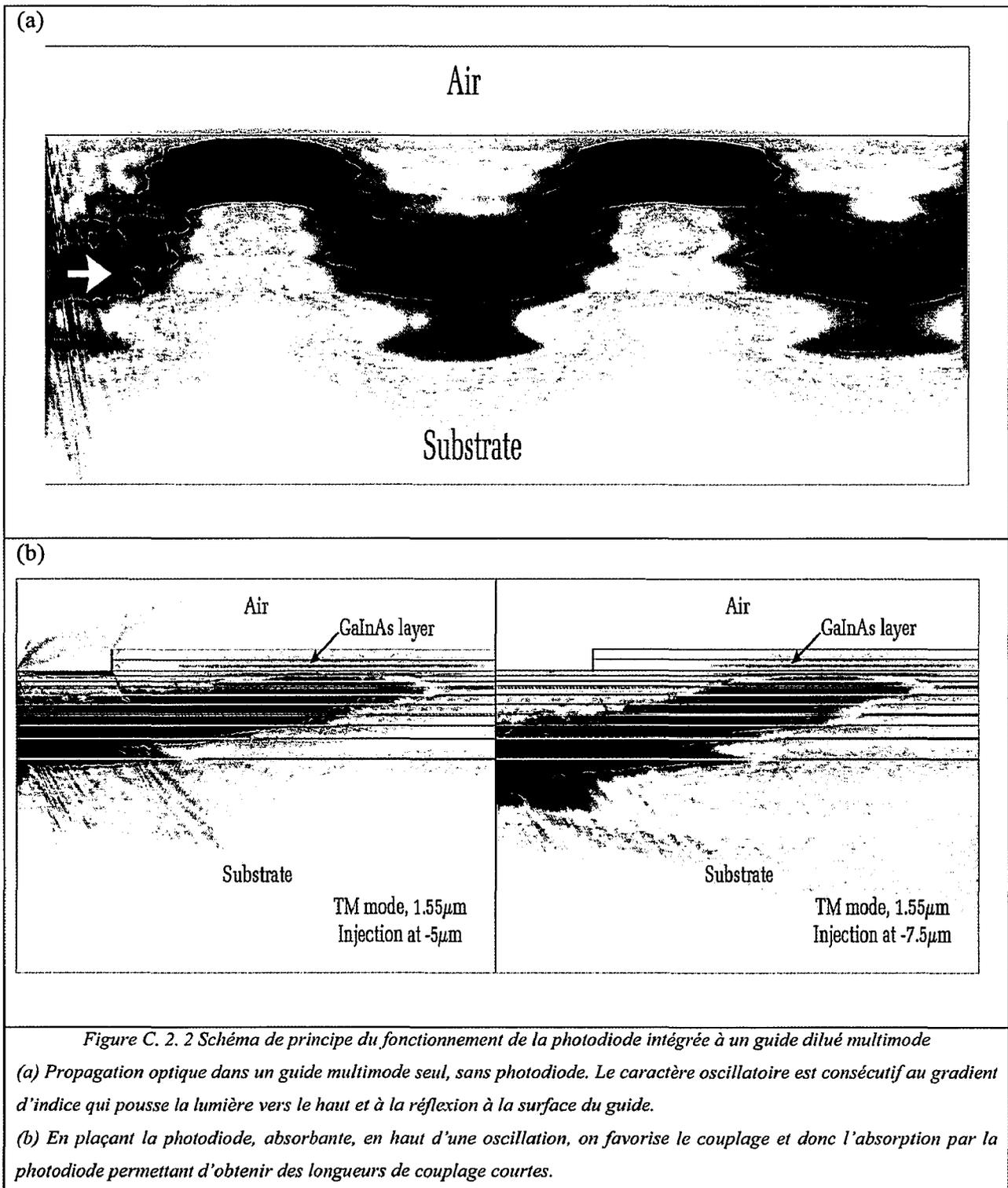
C2 Photodiode intégrée monolithiquement à un guide d'onde

Les premières études sur l'intégration monolithique d'une photodiode et d'un guide optique à couplage évanescent, remonte aux années 1985. Les premières structures étudiées, souvent à base de photodiodes PIN, et quelquefois avec des photodiodes MSM, voire des photoconducteurs, s'appuyaient sur un principe simple (figure C2.1). La photodiode, étant constituée d'un matériau absorbant d'indice supérieur à celui des matériaux du guide d'onde, la lumière, par couplage évanescent, monte naturellement dans la partie absorbante.



Toute la difficulté constituait alors à réduire la longueur de couplage entre la photodiode et le guide d'onde, pour diminuer la capacité intrinsèque de la photodiode. On se trouvait là, en principe, en présence d'une photodiode qui présentait sensiblement les mêmes avantages que le PIN-guide en terme de temps de transit, et dont la capacité restait à être optimisée pour tenir compte d'un compromis rendement quantique/bande passante. Différents scénarios ont été étudiés pour optimiser ce compromis. C'est ainsi que, par exemple, à peu près au même moment, Mallecot [3] et surtout Vinchant [4-7], ont démontré la possibilité d'utiliser l'apparition de modes de propagation dans la couche absorbante pour réduire de façon exceptionnelle la longueur de couplage. Néanmoins, les longueurs de couplages étaient encore trop importantes pour disposer de photodiode très rapides.

Les travaux sur l'intégration monolithique des photodiodes guide d'onde ont été remis à l'honneur avec l'apparition des guides d'onde multimode dilués [8-9]. Ces guides sont suffisamment épais pour être compatibles avec les modes issus d'une fibre lentillée. Ils sont constitués d'une alternance de couches d'indice différent, qui permet de jouer légèrement sur la propagation de la lumière à l'intérieur du guide. Différentes approches ont ainsi été proposées, notamment par Alcatel Opto+, il y a un peu moins d'une dizaines d'années ; mais l'approche la plus efficace, amenant les meilleurs résultats, a consisté à proposer une structure de guide à l'image d'une lentille à gradient d'indice. Dans ce cas, en filière InP, le guide d'onde est constitué d'une alternance de couches d'InP et de couches de quaternaire de telle façon que l'épaisseur de la couche d'InP diminue en approchant de la surface, alors que l'épaisseur de la couche de quaternaire augmente [10].



Dans ces conditions, l'indice « moyen » étant plus fort en haut du guide qu'en bas, la lumière monte vers la surface, et à cause de l'incidence rasante, elle se réfléchit sur la surface du guide à l'interface air-semiconducteur. Il en résulte un mouvement d'oscillation du faisceau optique dans le guide d'onde, conformément à son caractère multimode. Lorsque la photodiode est intégrée

monolithiquement à ce guide d'onde, la lumière montre de façon préférentielle vers la photodiode et l'on peut ainsi réduire de façon importante les longueurs de couplage. Des photodiodes fonctionnant en gammes millimétriques possédant une faible capacité et un bon rendement quantique ont été démontrées dans le projet RNRT POPEYE[11].

Références de l'annexe C

- [1] J. VAN DE CASTELLE
Etude et Réalisation de transducteurs opto-hyperfréquences sur matériaux III-V
Thèse, Université Lille1, 1996
- [2] N. MICHEL
Etude et réalisation de photodiodes-guides millimétriques de puissance à 1,55 μ m
Thèse, Université Lille1, Mars 2004
- [3] F. MALLECOT
Etude des phénomènes de propagation dans des structures de guidage à base de GaAs/GaAlAs/GaInAs. Application à la réalisation de photoconducteurs intégrés monolithiquement à un guide optique
Thèse, Université Lille1, 1988
- [4] J. F. VINCHANT
Intégration monolithique de photodétecteur et de guides optiques sur matériaux III-V
Thèse, Université Lille1, 1990
- [5] J. F. VINCHANT, F. MALLECOT, D. DECOSTER, and J. P. VILCOT
Effects of absorbing layers on the propagation constants: A four layer model on desktop-computer applied to photodetectors monolithically Integrated with optical waveguide
Opt. comm, vol. 67, pp. 266-270, 1988
- [6] J. F. VINCHANT, F. MALLECOT, D. DECOSTER, and J. P. VILCOT
Photodetectors monolithically integrated with optical waveguides: Theoretical and experimental study of absorbing layer effects
IEE Proc, Part.J, Vol. 136, pp. 72-75, 1989
- [7] J. F. VINCHANT, J. P. VILCOT, and D. DECOSTER
Electron-Hole pair generation rate of monolithic integrated waveguide/photodetector: Application to the modelling of monolithic integrated waveguide p-i-n photodiodes
Journal of Lightwave Technology, Vol. 8, n° 12, December 1990
- [8] V. MAGNIN
Contribution à la modélisation et à l'optimisation de composants optoélectronique
Thèse, Université Lille1, 1998
- [9] V. MAGNIN, L. GIRAUDET, J. HARARI, D. DECOSTER
Design and optimization of a 1.3/1.55 μ m wavelength selective p-i-n photodiode based on multimode diluted waveguide
IEEE Photonics Technology Letters, vol. 17, n° 2, pp. 459-461, February 2005
- [10] V. MAGNIN, L. GIRAUDET, J. HARARI, J. DECOBERT, P. PAGNOT, E. BOUCHEREZ, and D. DECOSTER
Design, Optimization, and Fabrication of Side-Illuminated p-i-n Photodetectors With High Responsivity and High Alignment Tolerance for 1.3 μ m and 1.55 μ m wavelength Use

[14] IEMN, Opto+, PICOGIGA, Thomson-LCR
Photoréception optique sans préamplification électrique
Rapport final du projet RNRT POPEYE

Publications

Publications dans des revues Internationales

K. H. TAN, S. F. YOON, W. K. LOKE, S. WICAKSONO, Z. XU, T. K. NG, K. L. LEW, N. SAADSAOUD, M. ZEGAOU, D. DECOSTER, and J. CHAZELAS

1.55 μ m GaAs/GaAsSbN/GaAs optical waveguides grown by radio frequency nitrogen plasma-assisted molecular beam epitaxy

App. Phys. Lett, Vol. 92, 113513, 2008.

W. K. LOKE, S. F. YOON, K. H. TAN, T. K. NG, Y. K. SIM, S. WICAKSONO, N. SAADSAOUD, D. DECOSTER, and J. CHAZELAS

GaAsSbN/GaAs waveguide photodetector with response up to 1.6 μ m grown by molecular beam epitaxy

Appl. Phys. Lett, Vol. 93, 081102, 2008.

K. H. TAN, S. F. YOON, C. TRIPON-CANSELIET, W. K. LOKE, S. WICAKSONO, S. FACI, N. SAADSAOUD, D. DECOSTER, and J. CHAZELAS

GaNAsSb material for ultrafast microwave photoconductive switching application

Appl. Phys. Lett. Vol. 93, 063509, 2008.

K. H. Tan, S. F. YOON, W. K. LOKE, S. WICAKSONO, T. K. NG, K. L. LEW, A. STÖHR, S. FEDDERWITZ, M. WEIB, D. JÄGER, N. SAADSAOUD, E. DOGHECHE, D. DECOSTER, and J. CHAZELAS

High responsivity GaNAsSb p-i-n photodetectors at 1.3 μ m grown by radio-frequency nitrogen plasma-assisted molecular beam epitaxy

Optics Express, Vol. 16, n°11, pp. 7720-7725, 2008.

X. ZU, S. F. YOON, W. K. LOKE, C. Y. NG, K. H. TAN, S. WICAKSONO, N. SAADSAOUD, D. DECOSTER, M. ZEGAOU, and J. CHAZELAS

Design consideration for 1.3 μ m GaAsSbN/GaAs high speed and high quantum efficiency waveguide photodetectors

J. Lightwave. Technol, Vol. 27, n° 13, pp. 2518-2524, 2009.

N. SAADSAOUD, M. ZEGAOU, D. DECOSTER, E. DOGHECHE, X. WALLART, and J. CHAZELAS

High thermal induced index variations with short response time in InP/GaInAsP/InP waveguide Schottky diodes

Elect. Lett, Vol. 45, n° 15, 2009.

Z. XU, N. SAADSAOUD, M. ZEGAOU, W. K. LOKE, K. H. TAN, S. WICAKSONO, S. F. YOON, C. LEGRAND, D. DECOSTER, and J. CHAZELAS

DC performance of High-Quantum-Efficiency 1.3 μ m GaAsSnN//GaAs waveguide photodetector

IEEE Elect. Lett, Vol. 31, n° 5, 2010.

M. ZEGAOU, Z. XU, N. SAADSAOUD, K. H. TAN, W. K. LOKE, S. WICAKSONO, S. F. YOON, C. LEGRAND, D. DECOSTER, and J. CHAZELAS

High-speed 1.3 μ m p-i-n GaNAsSb/GaAs waveguide photodetector

Elect. Lett. Vol. 31, n° 7, 2010.

Z. Xu, N. SAADSAOUD, W. K. LOKE, K. H. TAN, S. WICAKSONO, S. F. YOON, G. LECOUSTRE, D. DECOSTER, and J. CHAZELAS

High Performance GaNAsSb/GaAs 1.55 μ m waveguide photodetector

Transaction on Electron Devices (soumis), July 2010.

Brevet

D. DECOSTER, N. SAADSAOUD, M. ZEGAOUI, et J. CHAZELAS

Procédé de variation de l'indice optique d'un guide à semi-conducteur, guide à indice optique contrôlable et commutateur optique ultra-rapide

N° de publication : 2. 934 690

N° d'enregistrement national :08 04320, 29 Juillet 2008.

Conférences

N. SAADSAOUD, M. ZEGAOUI, D. DECOSTER, J. CHAZELAS, K. H. TAN, S. F. YOON, W. K. LOKE, S. WINCAKSONO, Z. XU, T. K. NG, K. LEW

Guides optiques 1,55 μ m à base d'hétérostructures GaAsSbN/GaAs

Présentation d'un poster au 12^{ème} journées Nano, Micro et Optoélectronique JNMO'08, Oléron, France.

N. SAADSAOUD, M. ZEGAOUI, D. DECOSTER, J. CHAZELAS, K. H. TAN, S. F. YOON, W. K. LOKE, S. WINCAKSONO, Z. XU, T. K. NG, K. LEW

Guides optiques 1,55 μ m à base d'hétérostructures GaAsSbN/GaAs

Présentation d'un poster pp. 27, 6^{ème} journées Franco-Maghrébines des Microondes et leurs Applications JFMMA'09, Agadir, Maroc.

D. DECOSTER, M. ZEGAOUI, N. SAADSAOUD, E. DOGHECHE, J. CHAZELAS

Carrier and Thermal induced index variations in InP waveguide diodes

Conférence invitée, International Conference on Materials for Advanced Technologies (ICMAT) à Singapour, juillet 2009.

N. SAADSAOUD, M. ZEGAOUI, D. DECOSTER, E. DOGHECHE, X. WALLART, and J. CHAZELAS

Carrier-induced Optical index variations in InP waveguide diodes: The thermal effects contribution, [7608-35]

Conférence invitée SPIE Photonics West 23-28 January 2010, San Francisco, California, USA.



Résumé

Cette thèse se veut d'ordre essentiellement technologique et expérimental. Notre travail de thèse a consisté à fabriquer un certain nombre de dispositifs d'essai avec une approche technologique sensiblement équivalente. L'idée était, chaque fois, de vérifier un certain nombre de concepts qui se sont parfois confirmés et parfois infirmés. Cependant, les réponses à ces questions impliquaient forcément des réalisations technologiques ; elles ne pouvaient pas être prévisibles uniquement par modélisation. Notre philosophie était l'aide à la vérification de nouveaux concepts par la technologie et l'expérience. Cette thèse comporte quatre chapitres, qui correspondent aux quatre projets que nous avons menés de façon aussi approfondie que possible, en mettant en œuvre chaque fois une technologie de type guide d'onde, chacun de ces dispositifs ayant ensuite été caractérisés aussi complètement que possible. Les quatre type d'objets nouveaux que nous avons réalisés et caractérisés sont :

- des guides d'ondes actifs de la filière InP à contact Schottky pour la commutation optique,
- des guides d'onde à base d'une double hétérostructure GaAsSbN/GaAs pour le guidage optique à la longueur d'onde 1,55 μm et la commutation,
- des photodiodes de puissance InP constituées d'un guide d'onde multimode dilué couplé monolithiquement de façon évanescente à une photodiode PIN dérivée de la photodiode UTC,
- des photodiodes PIN-guide sur GaAs pour la photodétection à la longueur d'onde 1,3 μm .

Pour chacun de ces chapitres, nous analysons successivement, nos motivations, la structure des dispositifs, la technologie et les résultats expérimentaux.

Abstract

This thesis is based on technology and experiments. We fabricated several testing devices with almost the same technological process and we characterized them. Every time, the goal was to check the validity of concepts, which could not be predicted only thanks to modeling, the fabrication and characterization of new devices was absolutely needed.

We divided our book into 4 chapters, corresponding to the 4 types of new devices we fabricated and characterized, all based on a III-V ridge optical waveguide technology. These four devices are:

- Active Schottky contact InP optical waveguides for optical switching.
- GaAsSbN/GaAs double heterostructure optical waveguides for 1.55 μm optical telecommunication integrated optics.
- 1.55 μm high power, high frequency InP photodiodes based on the monolithic integration of a dilute multimode waveguide and modified PIN photodiode.
- GaAs PIN-waveguide photodiodes for 1.3 μm wavelength high speed photodetection.

Which form the core of several projects in collaboration with NTU (Nanyang Technological University), and Thales Systèmes Aéroportés with the support of DGA, and Singapore Embassy (MERLION project).

Bibliothèque Universitaire de Valenciennes



00900707