## THESE

## présentée à

### L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

### pour obtenir le titre de

### **DOCTEUR DE L'UNIVERSITE**

### **Spécialité : Microondes et Microtechnologies**

par

**Gwenn ULLIAC** 



## **REALISATION EN OPTIQUE INTEGREE** DE LA FONCTION SOMMATION DE SIGNAUX MICROONDES :

## ETUDE ET FABRICATION DE STRUCTURES PHOTODETECTRICES SPECIFIQUES EN FILIERE InP

Soutenance prévue le 12 décembre 2005 devant la commission d'Examen

M. Didier DECOSTER	Président (USTL, Lille)
M. Jean-Pierre VILCOT	Directeur de thèse (IEMN, Lille)
M. Jean CHAZELAS	Co-Directeur de thèse (Thales Systèmes Aéroportés)
M. Georges ALQUIE	Rapporteur (Université Pierre et Marie Curie Paris VI)
M. Philippe DI BIN	Rapporteur (IRCOM, Limoges)
M. Hong-Wu LI	Examinateur (IREENA, Nantes)
M. François REPTIN	Membre Invité (Ingénieur DGA)
M. Henri PORTE	Membre Invité (Photline Technologies, Besançon)

### REMERCIEMENTS

Cette thèse de doctorat, réalisée dans le cadre d'une convention CIFRE avec Thales Systèmes Aéroportés, a été effectuée au Département Hyperfréquences et Semiconducteurs (DHS) de l'Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie (I.E.M.N) de l'Université des Sciences et Technologies de Lille et au sein du Département des Techniques Avancées de Thales Systèmes Aéroportés.

Je tiens à remercier Monsieur D. Decoster, Professeur à l'USTL, pour m'avoir fait l'honneur de présider la commission d'examen. Sa constante disponibilité, ses qualités scientifiques et humaines ont permis de mener à bien ce travail. Je lui suis particulièrement reconnaissant du temps qu'il a consacré à la correction de ce mémoire.

J'adresse mes plus sincères remerciements à Monsieur G. Alquié, Professeur à l'Université de Paris VI, ainsi qu'à Monsieur P. Di Bin, Maître de conférences à l'Université de Limoges, pour avoir accepté de juger ce travail et d'en être les rapporteurs.

Je tiens ici à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur J.P. Vilcot, Directeur de recherche au CNRS, qui a encadré mes travaux à l'I.E.M.N (du stage à la thèse !). Sa constante disponibilité pour répondre à mes interrogations nombreuses et variées a permis de mener à bien la réalisation de ce mémoire. Je le remercie également vivement pour son aide lors des caractérisations. Un grand merci « somme toute » pour tout...

Monsieur J. Chazelas, Directeur du département Techniques Avancées de Thales Systèmes Aéroportés et Directeur de recherche associé à l'I.E.M.N, a également participé à l'encadrement de ces travaux. Son approche industrielle a apporté une motivation supplémentaire à ce travail. Je le remercie également pour le temps qu'il m'a consacré pour répondre à mes interrogations sur le rôle de la fonction sommation dans les antennes.

J'adresse mes remerciements à Monsieur H.W. Li, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Nantes, et anciennement membre de l'équipe Optoélectronique, pour avoir accepté d'assister à l'exposé de ce travail.

Je remercie également Monsieur F. Reptin, Ingénieur DGA, et Monsieur H. Porte, Directeur de Recherche au CNRS, de l'intérêt qu'ils portent à ce travail en acceptant de participer à ce jury de thèse. Un immense merci à l'ensemble du personnel de la centrale de technologie avec qui j'ai eu le plaisir de travailler et qui ont su me faire profiter de leur expérience. Je tiens à remercier tout particulièrement : C. Legrand pour sa patience lors de mes nombreuses gravures, M. François et M. Muller pour l'écriture électronique, P. Tilmant pour son aide plus que précieuse pour mes nombreux essais en photolithographie, A. Fattorini et A. Leroy pour les dépôts métalliques, C. Coinon pour les épitaxies, C. Boyaval pour les observations MEB sans oublier R. Ringot (alias tonton)...

Merci également à D. Vandermoëre pour le montage des sommateurs, ainsi qu'à E. Delos, de la Centrale de Caractérisation, pour les mesures électriques.

Merci aussi à Pierre Armant pour sa constante serviabilité durant toutes ces années.

Bien sûr je n'oublie pas tous ceux que j'ai pu rencontrer perdus dans les méandres de la salle blanche, parmi lesquels : Alex et Michel, Frédérique, Philippe, Auxence...

J'adresse un clin d'œil amical à toutes les demoiselles qui m'ont accompagnées au sein du bureau 352 : Karine, Sophie, Nargess, Sanaa et j'en oublie...

Un grand merci à Dorothée et Malek pour leur aide pour les caractérisations.

Bien évidemment, je remercie vivement tous les membres de l'équipe Optoélectronique côtoyés durant toutes ces années : Stefan, Vincent, Jo, Denis, Michelle, Myriam, Patrice, Arnaud, Sam, Yves, Achour, Bob, Jeff...

Je tiens ici à exprimer ma profonde gratitude à Karine, Marie, Sophie M., Christophe et Julien pour leur soutien si précieux tout au long de cette thèse.

Merci à mes parents, à ma famille et à mes amis pour leurs soins prodigués durant ces années d'étude.

Enfin Sonia, merci d'avoir pris soin de moi pendant cette longue période de rédaction...

## **TABLE DES MATIERES**

Introduction générale	1
Chapitre I : Sommation de signaux hyperfréquences par voir optique	
1. Apport de l'optique pour les équipements militaires	8
1.1. Avantages des liaisons optiques sur les liaisons hyperfréquences	8
1.2. Photonique hyperfréquence	9
1.2.1. Fonction câblage	10
<b>1.2.2.</b> Fonction déport	10
<b>1.2.3.</b> Fonction retard	11
<b>1.2.4.</b> Fonction commande d'antenne	11
2. Antennes actives à balayage électronique	11
2.1 Demoine d'application	11
2.1. Domaine d'application	11
2.2.1. Antenne réseau linéaire	12
<b>2.2.2.</b> Antenne active à balavage électronique	13
2.3. Commande d'antennes à balayage électronique	14
<b>2.3.1.</b> Système actuel de commande d'antennes à balayage électronique	14
<b>2.3.2.</b> Commande optique d'antennes à balayage électronique	16
3. Fonction sommation en mode réception	19
3.1. Principe global de la fonction sommation	19
3.2. Liaisons optiques et sommateur hyperfréquence	19
3.3. Sommation optique	20
4. Dynamique d'une liaison optique simple	21
4.1 Signal	21
4.1. Définition	21
4.1.2. Linéarité du système	22
4.2. Bruit	22
<b>4.2.1.</b> Bruit thermique	23
4.2.2. Bruit de grenaille	23
<b>4.2.3.</b> Bruit dû au laser	24
4.3. Dynamique d'une liaison optique simple	25
5. Dynamique d'une liaison sommée	26
5.1. Sommation en hyperfréquence	26
5.2. Sommation hyperfréquence dans une structure opto-microonde	26
5.3. Sommation en optique	28

5.4. Comparaisons sommation hyperfréquence/optique	30
5.5. Limites de la sommation optique	30
5.5.1. Bruit d'hétérodynage	30
5.5.2. Bande passante	31
5.5.3. Linéarité du système	31
5.5.4. Pertes d'insertion	32
6. Réalisation de la sommation optique	32
6.1. Optique fibrée	32
6.1.1. Coupleur optique	32
6.1.2. Multiplexeur.	35
6.2. Sommation en espace libre	37
6.3. Optique intégrée	42
6.4. Tableau récapitulatif des solutions envisagées	46

# Chapitre II : Modélisation du sommateur opto-hyperfréquence

Préambule	
A. Photodiodes évanescentes : composants dédiés	53
1. Généralités	53
1.1. Principes de base de la photodétection	53
<b>1.2.</b> La filière InP	54
1.2.1. Généralités	54
1.2.2. Le GaInAs : matériau de base pour la photodétection	55
1.2.3. Les composés GaInAsP	56
1.2.4. Propriétés optiques des matériaux InP, GaInAs et GaInAsP	56
<b>1.3.</b> La photodiode PIN : le composant de base de la photodétection	57
<b>1.3.1.</b> Principe de fonctionnement	58
<b>1.3.2.</b> Coefficient de réponse et rendement quantique	59
<b>1.3.3.</b> Limitations fréquentielles	61
<b>1.3.4.</b> Compromis coefficient de réponse – bande passante	65
1.3.5. Courant d'obscurité	66
<b>1.3.6.</b> Courant de saturation	68
1.4. Etude d'une photodiode évanescente	71
1.4.1. Principe de fonctionnement.	71
1.4.2. Etat de l'art	72
1.5. Cahier des charges d'une photodiode dédiée à la fonction sommation	76

2. Etude d'une photodiode évanescente : application à la fonction de sommation	
<b>2.1.</b> Limitations fréquentielles : application à la fonction de sommation	77
2.2. Modélisation optique.	78
2.2.1. Paramètres à optimiser	78
2.2.2. Rendement quantique	79
2.2.2.1. Epaisseur de zone intrinsèque	79
2.2.2.2. Compromis coefficient de réponse/surface maximale	81
2.2.2.3. Longueur de photodiode	82
2.2.2.4. Influence de la couche dopée N	84
2.2.2.5. Epaisseur du ruban du guide	85
<b>2.2.3.</b> Guides droits	86
2.2.4. Désalignement guide-photodiode	87
<b>2.2.5.</b> Structure de l'épitaxie optimisée	88
B. Etude du sommateur opto-hyperfréquence	90
1. Structure guidante	90
1.1. Guides courbes	91
<b>1.2.</b> Ecartement entre les guides	93
1.3. Conclusions.	95
2. Conception complète du sommateur optimisé	96
3. Géométries de sommateur envisagées	97
3.1. Topologies	97
<b>3.2.</b> Nombre de voies sommables selon les topologies	98
<b>3.2.1.</b> Expression des capacités selon les topologies	98
<b>3.2.2.</b> Nombre de voies sommables pour la structure optimisée	100
<b>3.2.3.</b> Influence de l'écartement sur le nombre de voies sommables	101
<b>3.2.4.</b> Cas du substrat dopé $N^+$	103
<b>3.3.</b> Détail des structures envisagées	106
<b>3.3.1.</b> Sommateur à 2 voies.	107
<b>3.3.2.</b> Sommateur à 4 voies	109
3.3.3. Sommateur à 8 voies	110
3.3.4. Masque global	111
4. Effets liés à la conception des sommateurs	113
4.1. Déphasage hyperfréquence	113
<b>4.2.</b> Augmentation de la dynamique	113
C. Conclusion	115

# Chapitre III : Réalisation du sommateur opto-hyperfréquence

1. Structure épitaxiale réalisée	••••
2. Topologie des composants	••••
. Récapitulatif des étapes technologiques	
. Description des masques	
. Verrou technologique	••••
5.1. Support du pont d'interconnexion	
<b>5.2.</b> Définition du report des contacts P et N	
<b>5.3.</b> Définition des ponts à air	
<b>5.4.</b> Conclusions sur cette étude	•••••
. Description détaillée des étapes	••••
6.1. Dépôt des contacts ohmiques de type P	
6.2. Gravure du ruban de la photodiode (P et I)	
6.3. Dépôt des contacts ohmigues de type N	
6.4. Gravure de la couche dopée N	
6.5. Définition des guides optiques	
<b>6.6.</b> Gravure du mesa d'isolation	
6.7. Définition de la reprise des contacts P et N	
L L	
6.8. Caractérisations I(V)	
6.8. Caractérisations I(V)	••••
6.8. Caractérisations I(V) Conclusion B. Réalisation du sommateur sur substrat dopé N <sup>+</sup>	
<ul> <li>6.8. Caractérisations I(V)</li> <li>Conclusion</li> <li>B. Réalisation du sommateur sur substrat dopé N<sup>+</sup></li> <li>Structure épitaxiale réalisée sur substrat dopé N<sup>+</sup></li> </ul>	
<ul> <li>6.8. Caractérisations I(V)</li> <li>Conclusion</li> <li>B. Réalisation du sommateur sur substrat dopé N<sup>+</sup></li> <li>Structure épitaxiale réalisée sur substrat dopé N<sup>+</sup></li> <li>Récapitulatif des étapes technologiques sur substrat dopé N<sup>+</sup></li> </ul>	
<ul> <li>6.8. Caractérisations I(V)</li> <li>Conclusion</li> <li>B. Réalisation du sommateur sur substrat dopé N<sup>+</sup></li> <li>Structure épitaxiale réalisée sur substrat dopé N<sup>+</sup></li> <li>Récapitulatif des étapes technologiques sur substrat dopé N<sup>+</sup></li> <li>Description des masques</li> </ul>	
6.8. Caractérisations I(V). Conclusion. B. Réalisation du sommateur sur substrat dopé N <sup>+</sup> Structure épitaxiale réalisée sur substrat dopé N <sup>+</sup> Récapitulatif des étapes technologiques sur substrat dopé N <sup>+</sup> Description des masques Description détaillée des étapes.	
<ul> <li>6.8. Caractérisations I(V)</li> <li>Conclusion</li> <li>Réalisation du sommateur sur substrat dopé N<sup>+</sup></li> <li>Structure épitaxiale réalisée sur substrat dopé N<sup>+</sup></li> <li>Récapitulatif des étapes technologiques sur substrat dopé N<sup>+</sup></li> <li>Description des masques</li> <li>Description détaillée des étapes</li> <li>4.1. Gravure du ruban de la photodiode (P et I)</li> </ul>	••••
<ul> <li>6.8. Caractérisations I(V)</li> <li>Conclusion</li> <li>Réalisation du sommateur sur substrat dopé N<sup>+</sup></li> <li>Structure épitaxiale réalisée sur substrat dopé N<sup>+</sup></li> <li>Récapitulatif des étapes technologiques sur substrat dopé N<sup>+</sup></li> <li>Description des masques</li> <li>Description détaillée des étapes</li> <li>4.1. Gravure du ruban de la photodiode (P et I)</li> <li>4.2. Gravure de la couche dopée N</li> </ul>	
<ul> <li>6.8. Caractérisations I(V)</li> <li>Conclusion</li> <li>8. Réalisation du sommateur sur substrat dopé N<sup>+</sup></li> <li>9. Structure épitaxiale réalisée sur substrat dopé N<sup>+</sup></li> <li>9. Structure épitaxiale réalisée sur substrat dopé N<sup>+</sup></li> <li>9. Structure épitaxiale réalisée sur substrat dopé N<sup>+</sup></li> <li>9. Structure des étapes technologiques sur substrat dopé N<sup>+</sup></li> <li>9. Description des masques</li> <li>9. Description détaillée des étapes</li> <li>9. A.1. Gravure du ruban de la photodiode (P et I)</li> <li>9. 4.3. Définition des guides optiques</li> </ul>	••••
<ul> <li>6.8. Caractérisations I(V)</li> <li>Conclusion</li></ul>	••••
<ul> <li>6.8. Caractérisations I(V)</li> <li>Conclusion</li></ul>	
<ul> <li>6.8. Caractérisations I(V)</li> <li>Conclusion</li></ul>	
<ul> <li>6.8. Caractérisations I(V)</li> <li>Conclusion</li></ul>	
<ul> <li>6.8. Caractérisations I(V)</li> <li>Conclusion</li> <li>8. Réalisation du sommateur sur substrat dopé N<sup>+</sup></li> <li>8. Structure épitaxiale réalisée sur substrat dopé N<sup>+</sup></li> <li>9. Structure épitaxiale réalisée sur substrat dopé N<sup>+</sup></li> <li>9. Description des masques</li> <li>9. Description détaillée des étapes</li> <li>4.1. Gravure du ruban de la photodiode (P et I)</li> <li>4.2. Gravure de la couche dopée N</li> <li>4.3. Définition des guides optiques</li> <li>4.4. Reprise des contacts P</li> <li>4.5. Caractérisations I(V)</li> <li>4.6. Amincissement</li> <li>4.7. Dépôt du contact N face arrière</li> <li>4.8. Clivage</li> </ul>	

# Chapitre IV : Caractérisation du sommateur opto-hyperfréquence

A. Photodiode évanescente	
1. Caractérisations des guides optiques	205
1.1. Rappel succinct des différentes sources de pertes optiques	205
<b>1.2.</b> Champ proche	208
<b>1.3.</b> Fibre à fibre / Fabry-Pérot	211
2. Caractérisation des photodiodes évanescentes	216
2.1. Caractérisations électriques	217
2.1.1. Caractérisations I(V)	217
2.1.2. Caractérisations C(V)	217
2.2. Caractérisations optiques en éclairement continu	219
<b>2.2.1.</b> Dépendance à la polarisation	220
<b>2.2.2.</b> Mesure du coefficient de réponse	221
2.3. Mesures des bandes passantes sous faible éclairement	229
B. Sommateur opto-hyperfréquence	231
1. Caractérisations statiques	232
<b>1.1.</b> Evolution du photocourant en fonction du nombre de voies	232
1.1.1. Sommation incohérente	232
1.1.2. Sommation cohérente	234
<b>1.2.</b> Détermination du courant de saturation	235
2. Caractérisations dynamiques	239
<b>2.1.</b> Evolution de la puissance hyperfréquence en fonction du nombre de voie	240
<b>2.2.</b> Evolution de la dynamique en fonction du nombre de voies	241
2.2.1. Sommation incohérente	241
2.2.2. Sommation cohérente	243
2.3. Sommation ou mélange ?	246
<b>2.3.1.</b> Caractérisations dynamiques	246
2.3.2. Caractérisations statiques	249
C. Conclusion	255

Conclusion générale..... 259

# ANNEXE : Réalisation de guides submicroniques

1. Gravure en chimie chlorée	268
2. Gravure en chimie carbonée	270
3. Conclusion	272

### INTRODUCTION

Depuis les années 70, hormis les applications concernant le domaine de la visualisation, les principales avancées technologiques en optoélectronique résultent de recherches sur les systèmes de télécommunication dévolus essentiellement aux applications numériques. Dans ce domaine, l'optique a démontré qu'elle pouvait allier performance et bas coût. En effet la fibre optique présente de nombreux avantages [1] : une large bande passante, une insensibilité aux perturbations électromagnétiques, une diaphonie négligeable entre fibres voisines, la possibilité de multiplier les canaux sur une seule fibre par le multiplexage en longueurs d'onde, de faibles pertes ou encore une facilité d'exploitation en comparaison à celle des câbles coaxiaux. Ces propriétés des liaisons optiques peuvent être avantageusement utilisées dans les systèmes hyperfréquences pour la transmission de signaux analogiques et numériques. Il faut également noter que se confirme dans le domaine des interactions optique/micro-ondes, la forte dualité entre les technologies développées dans le secteur en expansion des télécommunications à très haut débit et le traitement de signaux analogiques hyperfréquences pouvant intéresser le domaine militaire (radars, guerre électronique et communications), si bien que l'utilisation de ces composants civils pourrait être transposée dans les systèmes militaires. Cette volonté d'introduire des composants optoélectroniques dans les systèmes hyperfréquences est rendue possible grâce aux progrès des convertisseurs électro-optiques (E/O) [2-3] et optoélectriques (O/E) [4-5-6], des modulateurs optiques [7-8] et des amplificateurs optiques. Cette nouvelle orientation amène donc les industriels de la défense à modifier leurs architectures de systèmes en fonction des composants existant sur le marché civil [9]. Ce travail, réalisé dans le cadre d'une collaboration étroite entre l'I.E.M.N. et Thales Systèmes Aéroportés, se place dans ce contexte et s'inscrit dans un projet visant à aboutir à un prototype d'antenne réseau large bande à balayage électronique commandé optiquement. Les fonctions de retard, pondération et sommation nécessaires à la formation de faisceaux à la réception dans ce type d'antennes doivent ainsi être réalisées par voie optique [10].

Des travaux sur la commutation optique **[11-14]** afin de réaliser un système de synthèse de retards temporels à grande dynamique ont été menés au sein de l'équipe Optoélectronique de l'I.E.M.N., en effet, pour des raisons d'encombrement, de poids, d'immunité aux interférences électromagnétiques, la voie qui consiste à générer et restituer ce retard à l'aide d'une liaison opto-microonde dont on modifie la longueur en commutant différentes fibres de

#### Introduction

longueurs différentes, est très séduisante. Une matrice de commutation 4x4 a ainsi été réalisée [13].

Ce travail s'attache, quant à lui, à réaliser la fonction de sommation de signaux hyperfréquences par voie optique dans la bande de fréquence 0-20 GHz. Cette fonction sommation apparaît ainsi comme un élément clé des antennes à balayage électronique sur système embarqué à la réception. Cette étude est la suite de travaux réalisés à Thales Systèmes Aéroportés [15] et Thales Air Défense [16] sur différentes méthodes de réalisation de la fonction sommation par voie optique.

Notre travail a consisté en l'étude, la réalisation et la caractérisation d'un sommateur optohyperfréquence en optique intégrée à base de structures photodétectrices spécifiques en filière InP, et s'articule autour de quatre chapitres :

- Dans le 1<sup>er</sup> chapitre, nous démontrons l'apport de l'optique dans les équipements militaires avant de comparer les différents systèmes de commande d'antennes à balayage électronique : le système actuel et celui envisagé par voie optique. Les architectures de sommation de signaux microondes, soit directement dans le domaine hyperfréquence soit par voie optique sont ensuite confrontées, en étudiant plus particulièrement le comportement de la dynamique en fonction du nombre de voies. Les différentes méthodes de réalisation de la fonction sommation par voie optique sont ensuite analysées en termes de performances et de limitations.
- Nous présentons dans le 2<sup>ème</sup> chapitre la solution en optique intégrée que nous proposons pour réaliser la fonction de sommation microonde. Elle consiste à réaliser un circuit intégré micro-optoélectronique constitué d'une photodiode PIN couplée par ondes évanescentes à N guides optiques. Nous étudions ensuite le fonctionnement et les performances des photodiodes évanescentes en montrant qu'elles répondent aux différents critères du cahier des charges d'une photodiode pour réaliser la fonction sommation. Les différentes géométries de sommateur à 2, 4 et 8 voies envisagées pour l'application visée (20 GHz) sont ensuite détaillées.
- Dans le 3<sup>ème</sup> chapitre, nous abordons dans une première partie le procédé technologique complet de réalisation du sommateur opto-hyperfréquence sur substrat semi-isolant. Nous détaillons en particulier le verrou technologique que constitue le procédé de reprise des

#### Introduction

contacts sur ces composants fortement non-planaires. Nous présentons dans une deuxième partie le nouveau procédé technologique sur substrat dopé  $N^+$  tenant compte des conclusions tirées du 1<sup>er</sup> procédé.

Le 4<sup>ème</sup> chapitre, quant à lui, s'articule autour de deux parties : les caractérisations des photodiodes évanescentes et celles des sommateurs opto-hyperfréquences. Nous abordons dans une première partie les caractérisations des guides optiques, ainsi que les caractéristiques optiques et électriques des photodiodes évanescentes. Dans une deuxième partie, nous présentons les caractérisations menées sur les sommateurs opto-hyperfréquences. Nous avons étudié, plus particulièrement, l'évolution de la dynamique en fonction du nombre de voies éclairées afin de valider le principe de sommation en hyperfréquence.

#### Introduction

#### REFERENCES

### [1] I. et M. Joindot

Les télécommunications par fibres optiques DUNOD, 1996

[2] O. Kjebon, R. Schatz, S. Loududoss, S. Nilsson, B. Stalnacke and L. Backbom
 30 GHz direct modulation bandwidth in detuned loaded InGaAsP DBR lasers at 1.55µm wavelength

Electronic Letters, 1997, Vol. 33, n°6, pp. 488-489

[3] L. Bach, W. Kaiser, J.P. Reithmaier, A. Forchel, T.W. Berg and B. Tromborg Enhanced direct-modulated bandwidth of 37 GHz by a multi-section laser with a coupled-cavity-injection-grating design

Electronic Letters, 2003, Vol. 39, n°22, pp. 1592-1593

[4] Y. Lui, S.R. Forrest, G.L. Tangonan, R.A. Jullens, R.Y. Loo, V.L. Jones, D. Persechini, J.L. Pikulski and M.M. Johnson

**Very-high-bandwidth InGaAs p-i-n detector arrays** IEEE Photon. Technol. Lett., 1991, Vol. 3, n°10, pp. 931-933

[5] L.Y. Lin, M.C. Wu, T. Itoh, T.A. Vang, R.E. Muller, D.L. Sivco and A.Y. Cho Velocity-matched distributed photodetectors with high-saturation power and large bandwidth

IEEE Photon. Technol. Lett., 1996, Vol. 8, n°10, pp. 1376-1378

[6] M. Achouche, V. Magnin, J. Harari, F. Lelarge, E. Derouin, C. Jany, D. Carpentier, F. Blache, D. Decoster

High performance evanescent edge coupled waveguide unitraveling-carrier photodiodes for > 40 Gb/s optical receivers

IEEE Photonics Technology Letters, 2004, Vol.16, n°2, pp. 584-586

K. Noguchi, O. Mitomi and H. Miyazawa
 Millimeter-wave Ti:LiNbO3 optical modulators
 J. Lightwave Technology, 1998, Vol. 16, n°4, pp. 615-619

[8] N. Dagli

Wide-bandwidth lasers and modulators for RF photonics

IEEE. Trans. Microwave Theory Tech., 1999, Vol. 47, n°7, pp. 1151-1171

[9] P.G. Sheehan and R.J. Forrest

The use of optical techniques for beam forming in phased arrays Proceedings SPIE, 1984, Vol. 477, pp. 82-89

[10] H. Zmuda and E.N. Toughlian Photonics Aspects of modern radar Artech House, 1994

### [11] I. Cayrefourcq

Conception et fabrication de matrices de commutation optiques en vue de la réalisation de modules de synthèse de retards temporels

Thèse, Université Lille 1, 1998

### [12] Y. Hernandez

Etudes technologiques, expérimentales et par simulation pour la commutation optique sur InP

Thèse, Université Lille 1, 2001

[13] K. Blary Matrices de commutation optique sur InP Thèse, Université Lille 1, 2003

[14] M. Zegaoui

**Commutateurs électro-optiques à haute diaphotie sur InP** Thèse, Université Lille 1, 2005

[15] N. Breuil, C. Fourdin, P. Nicole, G. Ulliac, J.P. Vilcot et J. Chazelas
 Sommation optique de signaux hyperfréquences
 13<sup>èmes</sup> Journées Nationales Microondes, 2003, Lille

[16] S. Blanc

Architectures optiques pour la formation de faisceaux multiples à la réception – Application aux antennes radar Thèse de doctorat, INPG, 2004 Sommation de signaux hyperfréquences par voie optique

Sommation de signaux hyperfréquences par voie optique

Ce travail de thèse, réalisé dans le cadre d'une convention CIFRE avec Thales Systèmes Aéroportés, s'inscrit dans un projet visant à démontrer la faisabilité du pilotage d'antennes à balayage par voie optique. Il consiste à réaliser la fonction de sommation de signaux hyperfréquences par voie optique dans la bande de fréquence 0-20 GHz. En effet cette fonction, associée aux fonctions retard et pondération, est nécessaire à la formation de faisceaux à la réception.

Après avoir démontré l'apport de l'optique dans les équipements militaires, nous comparons les différents systèmes de commande d'antennes à balayage électronique : le système actuel et celui envisagé par voie optique.

Les architectures de sommation de signaux microondes, soit directement dans le domaine hyperfréquence soit par voie optique sont ensuite confrontées, en étudiant plus particulièrement le comportement de la dynamique en fonction du nombre de voies.

Les différentes méthodes de réalisation de la fonction sommation par voie optique seront ensuite analysées en termes de performances et de limitations. Pour cela, nous nous sommes appuyés essentiellement sur des travaux expérimentaux réalisés à Thales Systèmes Aéroportés et Thales Air Défense.

# 1. Apport de l'optique pour les équipements militaires

Les fibres optiques sont aujourd'hui le support de transmission des liaisons haut débit en télécommunication numérique et leur emploi est envisagé pour remplacer en partie les liaisons hyperfréquences dans les équipements militaires futurs.

### 1.1. Avantages des liaisons optiques sur les liaisons hyperfréquences

Les fibres optiques offrent une multitude d'avantages par rapport aux câbles électriques :

- large bande passante :

Les signaux optiques utilisés en télécommunications fibrées proche infra-rouge ont des fréquences autour de quelques centaines de Térahertz. La bande passante associée à la transmission d'une porteuse optique est donc potentiellement très largement supérieure à celle obtenue sur des câbles métalliques. Toutefois, la dispersion chromatique limite la transmission de données à quelques dizaines de Gigabits sur plusieurs centaines de kilomètres. Le problème a pu être contourné avec la technique WDM qui a permis de véhiculer conjointement plusieurs porteuses à différentes longueurs d'onde et ainsi d'augmenter considérablement le débit équivalent par fibre. En outre, l'amélioration des capacités intrinsèques des fibres, l'intégration des amplificateurs optiques à fibre dopée Erbium ainsi que les progrès sur la régénération optique, ont contribué à l'amélioration de ces performances. Ces dernières performances ont permis d'installer des liaisons transocéaniques de plusieurs dizaines de Gbit/s sans répéteur.

Des transmissions de 5 à 7 Tbit/s, en utilisant la technique WDM sur environ 150 canaux à 40 Gbit/s, ont été démontrées sur quelques dizaines à quelques centaines de kilomètres **[1-2-3]**. Des débits de 1 à 2 Tbit/s ont aussi été atteints sur plusieurs milliers de kilomètres mais avec 20 Gbit/s par canal **[4-5]**. L'utilisation future de ce potentiel dépend en grande partie des performances des composants d'émission/réception : ils devront être capables de traiter des débits de 40 Gbit/s.

### - faibles pertes :

Les pertes de propagation dans les câbles coaxiaux (5 à 10 dB/Km à quelques centaines de MHz et environ 1dB/m à 20 GHz) limitent la distance maximale de transmission à quelques kilomètres pour les radiofréquences et à quelques dizaines de mètres pour les micro-ondes. Ainsi la faible atténuation des fibres optiques permet de réduire ces pertes à 0.2 dB/Km, quelle que soit la fréquence, et d'envisager des transmissions bien plus performantes. *Il faut toutefois garder en mémoire qu'une liaison fibre-optique « brute » (i.e. sans amplification additionnelle) présente une perte d'insertion dans le domaine microonde de l'ordre de 30dB liée aux efficacités respectives des composants d'extrémité (laser, détecteur).* 

### - Avantage économique :

Grâce à la mise au point de nouveaux procédés de fabrication, le coût des fibres est en baisse constante. De par sa petite taille et son faible poids, la fibre optique se place, avec sa grande capacité de transmission, comme le meilleur candidat pour les télécommunications longues distances. Par ailleurs, elle est d'un encombrement, poids et flexibilité de mise en ouvre sans commune mesure avec le guide hyperfréquence, qui pour les « courtes » distances (quelques dizaines de mètres) pourrait être son rival en terme de pertes de propagation.

- Isolation électrique et sécurité de l'information :

Fabriquées à partir de matériaux non conducteurs, les fibres optiques ne sont pas concernées par les problèmes d'isolation électrique. Elles sont, par conséquent, insensibles aux interférences électromagnétiques et ne rayonnent pas, rendant l'information transportée quasiment insondable.

### **1.2.Photonique hyperfréquence**

Le domaine de la photonique hyperfréquence concerne l'ensemble des traitements optiques appliqués aux signaux hyperfréquences. Dans ce domaine, l'utilisation de la transmission optique de signaux s'applique à différentes fonctions [6].

- 9 -

### **1.2.1.** Fonction câblage

La première application envisagée pour les liaisons optiques, en particulier dans le domaine de la Guerre Electronique, est le remplacement des câbles coaxiaux large bande, c'est la fonction câblage.

Le câblage optique est intéressant pour des antennes actives de grandes dimensions ou réparties. Ce réseau de transport et distribution peut véhiculer sur le même support physique (la fibre optique) et simultanément des signaux de nature et caractéristique très différentes (signaux hyperfréquences émis ou reçus, oscillateurs locaux à haute pureté spectrale, informations numériques) qu'ils soient co- ou contra-propagatif sur la même ligne. La technique employée est celle du multiplexage de longueurs d'onde (WDM).

Dans les antennes actives, on pourra transmettre sur la même fibre les signaux de commande, les signaux RF à l'émission et à la réception. De plus, l'optique permettra d'alléger, de simplifier mécaniquement l'antenne et d'améliorer l'accessibilité des modules de Transmission/Réception en face arrière de l'antenne en remplaçant la forêt de fils coaxiaux par des nappes de fibre optique plus « malléables ».

### 1.2.2. Fonction déport

Afin de protéger un opérateur ou des équipements, les antennes sont déportées par rapport à l'unité de traitement. Il apparaît donc le besoin de liaisons à très faibles pertes permettant le déport du contrôle de l'antenne ainsi que la distribution de signaux hyperfréquences à très large bande (typiquement 2-18 GHz).

Les caractéristiques des moyens classiques (câbles coaxiaux...) limitent cette longueur de déport et n'autorisent que de faibles longueurs entre unités, ce qui limite certaines architectures. Ainsi les faibles pertes linéiques des fibres optiques en font un moyen privilégié de transport de signaux sur de grandes distances, par exemple entre une antenne et le traitement. Il s'agit de plus d'un support diélectrique non rayonnant et insensible aux parasites extérieurs. Ainsi, ce type d'application a été validé pour un couple module d'émission à diode laser DFB et module de détection à photodiode PIN : un déport sur plus de 25 Km a été validé au CNET avec des antennes de réception pour satellite de communication à Pleumeur-Bodou [7] ainsi que pour le déport de signaux jusqu'à 6.5 GHz sur 20 Km à Kourou [8]. Le projet ALMA prévoit quant à lui l'utilisation d'un interféromètre, constitué de 64 radiotélescopes de

12 mètres de diamètre chacun, et installé au Chili à 5000 mètres d'altitude. Ces antennes pourront être déplacées sur une aire de 10 Km de diamètre.

### **1.2.3.** Fonction retard

Dans le domaine aéroporté, les futurs radars large bande devront allier grande couverture angulaire et largeur de bande instantanée. Il sera donc nécessaire pour la formation des voies d'utiliser une synthèse de retards commutables permettant d'éviter les dépointages de faisceau en fonction de la fréquence d'émission. Les liaisons optiques analogiques permettent de réaliser des lignes à retard large bande et à faible perte linéique.

### 1.2.4. Fonction commande d'antenne

Le contrôle optique de l'émission des modules actifs autorise un balayage mono ou multi faisceaux sans déviation de faisceau en fonction de la fréquence et dans une large bande instantanée. Les fonctions de retard, pondération et sommation nécessaires à la formation de faisceaux doivent donc être réalisées par voie optique.

> Ce travail s'inscrit dans un projet visant à démontrer le pilotage d'antennes à balayage par voie optique et consiste à réaliser la fonction de sommation des signaux hyperfréquences par voie optique dans la bande de fréquence 0-20 GHz.

## 2. Antennes actives à balayage électronique

## 2.1. Domaine d'application

Les systèmes radar et de contremesures du futur utiliseront de manière générale des antennes actives à balayage électronique. Cette évolution est déterminée entre autres par les performances potentielles importantes de ces antennes notamment en terme de fiabilité, de résistance au brouillage, et de totale flexibilité pour la formation de faisceaux tant à l'émission qu'à la réception.

## 2.2. Formation de faisceaux

#### 2.2.1. Antenne réseau linéaire

Nous supposons une antenne réseau linéaire (monodimensionnelle dite 1D) de N éléments identiques et équidistants, comme représenté sur la figure I-1.



**Figure I-1 :** Antenne réseau linéaire à éléments équidistants avec d : distance entre deux éléments et  $\theta$  : direction d'arrivée du front d'onde

Le facteur de réseau, représentant le diagramme normalisé rayonné par les N éléments équidistants, s'écrit dans ce cas [9]:

$$F(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \left| a_i \right| \exp \left[ j \left( \frac{2\pi}{\lambda_h} . i.d. \sin(\theta) - \psi_i \right) \right]$$
(1)

où  $\theta$  représente la direction de pointage, d la distance inter-éléments, i le numéro de l'élément et  $\psi_i$  la phase de chaque élément.

Pour pointer dans la direction  $\theta_0$ , à la longueur d'onde  $\lambda_{ho}$ , la phase à appliquer à chaque élément est égale à :

$$\psi_i = \frac{2\pi}{\lambda_{h0}} .i.d.\sin(\theta_0)$$
 (2)

L'expression du facteur de réseau devient alors :

$$F(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \left| a_i \right| \exp\left[ j \left( \frac{2\pi}{\lambda_h} i d \sin(\theta) - \frac{2\pi}{\lambda_{h0}} i d \sin(\theta_0) \right) \right]$$
(3)

### 2.2.2. Antenne active à balayage électronique

Les antennes actives permettent la formation simultanée ou séquentielle de un ou plusieurs diagrammes de rayonnements prédéfinis de directions différentes, fixes ou orientables dans l'espace. Les antennes actives sont constituées d'une matrice d'éléments rayonnants alimentés par des signaux dont la phase est réglable. On contrôle ainsi le diagramme de rayonnement et donc la direction de rayonnement de l'antenne en jouant sur les phases de chaque nœud du réseau. L'écart de phase entre deux éléments rayonnants successifs est défini, dans le cas général, comme une progression linéaire selon les axes géométriques de l'antenne. A l'échelle du réseau, cette loi définit la surface équiphase ou plan de phase, sur laquelle tous les signaux sont en interférences constructives (figure I-2). Le rayonnement est alors maximum selon la normale à ce plan. Orienter le faisceau revient donc à orienter le plan de phase.



Figure I-2 : Principe de commande d'antenne réseau.

La formation de faisceaux dans les antennes actives nécessite, à partir de signaux  $E_i(t)$  provenant des différents éléments récepteurs/rayonnants, de créer des signaux du type S(t) à partir des opérations suivantes :

- retard des signaux initiaux  $E_i(t)$  d'une valeur  $\tau_i$
- pondération par un facteur A<sub>i</sub> des signaux initiaux E<sub>i</sub>(t) retardés
- sommation des signaux retardés et pondérés

$$S(t) = \sum_{i=1}^{N} A_i . E_i (t - \tau_i)$$
 (4)

## 2.3.Commande d'antennes à balayage électronique

### 2.3.1. Système actuel de commande d'antennes à balayage électronique

Prenons l'exemple d'une antenne réseau destinée à des applications radar (figure I-3) :



Figure I-3 : Schéma simplifié de la sommation hyperfréquence dans une antenne réseau

Le champ incident est récupéré par un réseau d'antennes. Dans une technologie classique où les transferts de signaux entre les antennes et le calculateur se font par des liaisons

hyperfréquences, les opérations de retard peuvent, par exemple, être réalisées par des déphaseurs large bande ou par des circuits réalisés en technologie MMIC (Microwave Monolithic Integrated Circuit) GaAs ou MEMS (Micro Electronical Mechanical Systems).

Les opérations de pondération peuvent de même être réalisées par des atténuateurs hyperfréquences programmables utilisant les mêmes technologies.

Nous voyons sur la figure I-3 que les différents signaux récupérés par les antennes sont additionnés avant d'être détectés et analysés par le système de traitement. C'est alors une sommation de type hyperfréquence qui est effectuée.

Cependant cette opération de sommation électrique proprement dite présente des difficultés d'implémentation technologique. En effet, la sommation de plusieurs signaux en bande étroite est assez standard, mais en large bande, toutes les solutions présentent des inconvénients en termes de complexité et de pertes d'insertion. Le seul sommateur très large bande passif connu est un combineur hyperfréquence composé de coupleurs hyperfréquences 2 vers 1 et de longueurs de lignes (figure I-4).



Figure I-4 : Schéma d'un combineur hyperfréquence (8 voies)

Afin d'alimenter tous les éléments rayonnants, le combineur hyperfréquence est de la taille de l'antenne. Par conséquent, la sommation électrique se trouve confrontée à des problèmes de place dans l'antenne.

Cette solution présente également deux inconvénients majeurs :

- la perte d'insertion, croissante avec le nombre de signaux à sommer
- l'isolation entre les voies, en effet le renvoi dans les voies adjacentes à une voie donnée d'une partie de la puissance incidente (qui ne part donc pas dans la voie « somme ») peut provoquer des perturbations

### 2.3.2. Commande optique d'antennes à balayage électronique

Parmi les applications de l'optoélectronique au traitement du signal, la génération de retards temporels est une fonction de première importance permettant notamment de commander des antennes actives. Le champ d'application comprend les architectures de formation de faisceau des antennes à balayage électronique [10-11]. L'optique intervient pour générer des déphasages ou des retards de grande dynamique.

La réalisation de la fonction de sommation par voie optique, étudiée dans ce travail, est, comme nous pouvons le voir sur la figure I-6, indispensable afin de démontrer la possibilité de pilotage des antennes à balayage par voie optique et de compléter les fonctions retards pour fournir une solution « tout optique ».

Ces systèmes sont conçus pour fonctionner en émission/réception [12].

### 2.3.2.1. Formation de faisceaux à l'émission

En émission, les signaux micro-ondes modulent les lasers. Les signaux optiques modulés transitent alors par le module de synthèse de retards. L'ensemble des signaux micro-ondes sortants, alors déphasés, sont ensuite détectés: la transduction Opto/Hyper est assurée par la chaîne Photodiode (N°i)-Amplificateur (A<sub>i</sub>). Enfin, les signaux amplifiés peuvent alimenter le réseau d'antennes distribuées.

La figure I-5 illustre schématiquement l'architecture optique pour la formation de faisceaux à l'émission.



Figure I-5 : Schéma simplifié pour la formation de faisceaux à l'émission

## 2.3.2.2. Formation de faisceaux à la réception

En réception, les signaux récupérés par les antennes sont amplifiés et viennent moduler les lasers. Les signaux sont ensuite déphasés via le module de synthèse de retards. La reconstruction du faisceau incident est assurée par une sommation des signaux provenant de chacun des éléments rayonnants.

La figure I-6 illustre schématiquement l'architecture optique pour la formation de faisceaux à la réception.



Figure I-6 : Schéma simplifié pour la formation de faisceaux à la réception

### 2.3.2.3. Emission/réception

Commander le déphasage des signaux hyperfréquences arrivant ou émanant des éléments rayonnants permet ainsi d'orienter un faisceau dont la fréquence de travail est déterminée. Dans le cas des antennes à large bande instantanée, il est nécessaire de synthétiser des retards temporels afin d'obtenir des lois de phase, que l'on appellera dans ce cas lois de retard, indépendantes de la fréquence. Ceci permet à l'antenne d'écouter ou d'émettre dans la direction choisie quelle que soit la fréquence utilisée. Les opérations de retard et pondération peuvent être réalisées de multiples façons (commutation de lignes à guides optiques intégrés [13-14-15], utilisation de la dispersion chromatique, MOEMS pour la pondération ...).

Une autre spécificité entre le mode émission et réception réside dans le fait qu'à l'émission on s'attache à envoyer un signal de niveau constant alors qu'en mode réception, la problématique est différente puisque la sommation doit pouvoir s'opérer aussi bien sur des cibles d'échos très faibles que sur des cibles d'échos très forts. En effet, dans le cas d'un fonctionnement radar, le bilan radar est très défavorable : quelques dizaines voire quelques centaines de kW sont émis pour recevoir seulement quelques pW. Le bruit prend alors une importance capitale en radar ; les échos se situent souvent sous le plancher de bruit de la chaîne de réception et sont sortis du bruit par les systèmes de traitement de signal associés.

Entre le mode émission et réception, la pondération en phase et en amplitude reste un procédé identique en optique, seules les photodiodes et les lasers sont inversés. Toutefois, en mode émission, les signaux doivent être divisés alors qu'en mode réception ils doivent être combinés. Cette fonction de combinaison ou sommation peut être réalisée en optique suivant différents schémas : soit après photodétection, le signal est sommé au moyen d'un combineur hyperfréquence, soit la sommation est directement réalisée en optique au moyen de coupleurs, ou de multiplexeurs ou de composants dédiés.

## **3. Fonction sommation en mode réception**

### 3.1. Principe global de la fonction sommation

Comme nous l'avons vu, pour former un faisceau, les informations issues de toute l'antenne doivent être sommées après pondération et retards adéquats.

$$F(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \left| a_i \right| \exp\left[ j \left( \frac{2\pi}{\lambda_h} i d \sin(\theta) - \frac{2\pi}{\lambda_{h0}} i d \sin(\theta_0) \right) \right]$$
(5)

La sommation consiste donc à ajouter N signaux  $S_i(t)$  issus des N différents éléments rayonnants ou sous-réseaux afin d'obtenir un signal de sortie S(t) qui bénéficie du filtrage spatial donné par cette pondération. Le retard  $\tau_i$  et la pondération en amplitude  $A_i$  de chacun des signaux sont pris en compte pour exprimer le signal S(t).

$$S(t) = \sum_{i=1}^{N} A_i S_i (t - \tau_i)$$
 (6)

Nous allons étudier les différentes façons de réaliser cette fonction sommation.

## 3.2. Liaisons optiques et sommateur hyperfréquence

Pour cette architecture, chaque voie hyperfréquence est associée à une liaison optique à modulation directe ou externe. Pour N voies il faut N lasers et N photodiodes qui génèrent les signaux hyperfréquences. La sommation est réalisée à l'aide d'un coupleur N voies hyperfréquence, comme représenté sur la figure I-7.



Figure I-7 : Schéma simplifié pour la sommation hyperfréquence

Comme nous l'avons dit précédemment, le seul sommateur très large bande passif connu est le combineur hyperfréquence qui permet de sommer les courants issus des N photodiodes. Cependant l'inconvénient majeur de ce système est la perte d'insertion, qui est croissante avec le nombre de signaux à sommer.

## **3.3.Sommation optique**

Les architectures optiques sont attractives pour leur réduction de poids et de volume. Toutefois, la fonction sommation de signaux, implémentée en optique, modifie les performances en dynamique d'une simple liaison optique. En effet, le point de fonctionnement en puissance optique de la photodiode est augmenté par la convergence des différentes porteuses optiques. Ces dernières peuvent interagir entre elles sous différents aspects qui vont impacter la dynamique de l'architecture optique et par conséquent celle du système.

Pour cette architecture, chaque voie hyperfréquence est associée à une liaison optique à modulation directe ou externe. Pour N voies, il faut N lasers et 1 photodiode qui génère le signal hyperfréquence. La sommation optique consiste à sommer sur une seule photodiode N signaux optiques modulés en hyperfréquence, comme représenté sur la figure I-8.

Sommation de signaux hyperfréquences par voie optique



Figure I-8 : Schéma simplifié pour la sommation optique

## 4. Dynamique d'une liaison optique simple

Schématiquement la dynamique est représentée de manière ultime par la différence entre le point de compression à -1dB de la liaison et le bruit thermique.

## 4.1.Signal

#### 4.1.1. Définition

A la sortie de chaque photodiode, la puissance du signal hyperfréquence  $P_{HF}$  est proportionnelle au carré du courant photodétecté I :

$$P_{HF} = \frac{1}{2} . Z. (m.I)^2$$
 (7)

avec Z l'impédance de charge (50 $\Omega$ ) et m la profondeur de modulation (qui dépend de l'émission).

## 4.1.2. Linéarité du signal

La linéarité du système de réception peut être définie par la mesure du point de compression à -1dB au niveau de la photodiode. On évalue la linéarité des photodiodes en les éclairant avec un rayonnement de puissance croissante. Chaque décade supplémentaire de la puissance optique produit une augmentation de deux décades du signal hyperfréquence, puisque la détection est quadratique. La photodiode atteint son point de compression à -1dB quand la puissance hyperfréquence dévie de 1 dB de la loi quadratique idéale (figure I-9).



Figure I-9 : Exemple de fonctionnement en puissance d'une photodiode

Plus la puissance optique augmente, plus le photodétecteur génère des harmoniques au détriment de la puissance générée sur le fondamental. Au delà d'un certain taux d'harmoniques (de l'ordre de -30dB), les performances du système sont notablement dégradées et inaptes à la fonction demandée ici.

## 4.2.Bruit

Le bruit total B d'une liaison est le résultat de trois contributions majeures [16] : le bruit thermique, le bruit de grenaille et le bruit du laser.

### 4.2.1. Bruit thermique

Le bruit thermique est présent dans tout dispositif et ne dépend que de la température. Il dépend de la fluctuation thermique de la vitesse des porteurs. C'est une source de bruit indépendante des conditions d'éclairement de la photodiode. Spectralement le bruit thermique est un bruit blanc qui fixe la limite ultime du plancher de bruit.

La puissance du bruit thermique B<sub>th</sub> est égale à :

 $B_{th} = k.T.BP \quad (dB) \quad (8)$ 

où k représente la constante de Boltzmann, T la température en Kelvin, BP la bande passante de mesure pour un système adapté ( $Z=50\Omega$ ).

Le bruit thermique se manifeste notamment comme le plancher de bruit lorsque la puissance optique est faible.

#### 4.2.2. Bruit de grenaille

La photogénération de porteurs s'accompagne d'un bruit inhérent au mécanisme de conversion photon-électron qui lui est associé : le bruit de grenaille.

Le courant photodétecté est égal à la somme de courants de déplacement des porteurs créés individuellement à des instants variables. Le processus de photodétection est en fait une variable aléatoire caractérisée par sa valeur moyenne et sa valeur quadratique moyenne. Le processus est poissonien [17] et la puissance du bruit de grenaille  $B_{det}$  varie linéairement avec la puissance optique et s'écrit :

$$B_{det} = 2.Z.q.I.BP = 2.Z.q.(\Re P_i + i_d).BP$$
 (dB) (9)

où  $\Re$  représente le coefficient de réponse du détecteur, P<sub>i</sub> la puissance optique moyenne, i<sub>d</sub> le courant d'obscurité, Z l'impédance de charge (généralement 50 $\Omega$ ) et BP la bande passante de mesure.

Comme le montre cette formule, on souhaite notamment un faible courant d'obscurité  $i_d$  par rapport au signal incident pour ne pas augmenter considérablement le bruit en réception. C'est un spectre de bruit blanc d'autant plus grand que le photocourant est élevé.

### 4.2.3. Bruit dû au laser

La puissance de bruit correspondante à la détection du bruit d'amplitude du laser est égale à :

$$B_{source} = Z.RIN.I^2.BP = Z.RIN(\Re P_i)^2.BP \quad (dB) \quad (10)$$

où RIN représente le bruit d'amplitude optique du laser,  $\Re$  le coefficient de réponse du détecteur, P<sub>i</sub> la puissance optique incidente moyenne, Z l'impédance de charge (généralement 50 $\Omega$ ) et BP la bande passante de mesure.

Le RIN s'exprime comme le rapport entre la densité spectrale des fluctuations de la puissance optique  $P_0$  et le carré de cette puissance.

$$RIN = \frac{\left\langle \Delta P_0^2 \right\rangle}{P_0^2} \tag{11}$$

Le coefficient de RIN du laser vaut généralement entre -150 dB/Hz et -160 dB/Hz pour les lasers semiconducteurs à 1.55 µm de type DFB.

Le bruit total d'une liaison est dominé par le bruit du laser pour des valeurs de photocourant élevées (>1mA).

## 4.3.Dynamique d'une liaison optique simple

On obtient le rapport signal sur bruit d'une liaison optique en divisant la puissance hyperfréquence de sortie par la totalité du bruit, pour une bande passante de 1Hz :

$$\frac{S}{B} = \frac{P_{IIF}}{B_{th} + B_{det} + B_{source}} = \frac{\frac{1}{2}Z(m.I)^2}{kT + 2.q.Z.I + Z.RIN.I^2}$$
(12)



Figure I-10 : Illustration du rapport signal sur bruit en sortie de photodiode

Ce rapport est maximal vers les fortes puissances optiques, la puissance de bruit est alors principalement dominée par le bruit dû au laser (figure I-10). On souhaite donc utiliser la photodiode sous puissance optique incidente importante afin de maximiser la dynamique des liaisons optiques et ceci tout particulièrement pour les liaisons analogiques. On souhaite également un fonctionnement linéaire sous fort photocourant afin de minimiser les harmoniques. Des photodiodes à haute puissance microonde de sortie sont donc préférentiellement recherchées.

## **5. Dynamique d'une liaison sommée**

Nous considérons dans la suite de cette étude une bande passante de mesure (BP) de 1Hz.

## 5.1. Sommation en hyperfréquence

Soit une sommation de N signaux dans le domaine hyperfréquence, le rapport signal à bruit SNR<sub>hypi</sub> du signal issu de la voie i s'écrit :

$$SNR_{hypi} = \frac{P_{hypi}}{B_{hypi}}$$
(13)

où P<sub>hypi</sub> représente la puissance du signal et B<sub>hypi</sub> le bruit de la voie i.

La sommation de N voies, possédant le même rapport signal à bruit, à travers un combineur hyperfréquence idéal, i.e sans pertes, conduit à un rapport signal à bruit :

$$SNR_{Nvoies} = SNR_{1voie}$$
 (14)

Cependant dans la réalité, le combineur peut présenter des pertes en excès et le rapport signal à bruit des N voies est inférieur à celui du signal unitaire.

## 5.2. Sommation hyperfréquence dans une structure opto-microonde

La sommation de N signaux véhiculés sur porteuse optique est réalisée, après photodétection, par un combineur hyperfréquence. Les N détecteurs sont donc reliés aux entrées du combineur, comme représenté sur la figure I-11.



Figure I-11 : Schéma simplifié de la sommation hyperfréquence dans une structure optomicroonde

La puissance hyperfréquence en sortie du coupleur ( $P_{hyp}$ ) est égale à la somme des puissances élémentaires ( $P_{hypi}$ ) de chaque voie moins les pertes du combineur. Les pertes L du combineur augmentent proportionnellement à N. La puissance hyperfréquence s'écrit donc :

$$P_{hvp} = N.P_{hvpi}.L \tag{15}$$

Le niveau de la densité de bruit en sortie  $(B_{hyp})$  est égal à la somme des densités de bruit détectées par chaque photodiode atténuée des pertes du combineur. Nous considérons ici deux contributions, le bruit de la source laser  $(B_{source})$  et le bruit du photodétecteur  $(B_{det})$ . Le niveau de bruit s'écrit donc :

$$B_{hvp} = N.(B_{det} + B_{source}).L \quad (16)$$

Le rapport signal à bruit est indépendant du nombre de voies et des pertes du combineur, il s'agit du rapport signal à bruit d'une liaison optique seule :

$$SNR_{Nvoies} = \frac{P_{hyp}}{B_{hyp}} = \frac{P_{hypi}}{\left(B_{det} + B_{source}\right)} = SNR_{1voie}$$
(17)
Nous retrouvons alors le cas de la sommation hyperfréquence comme décrit dans le paragraphe précédent.

L'utilisation de N liaisons opto-microondes éclairant N photodétecteurs ne change donc strictement rien au niveau du rapport signal à bruit global par rapport à la sommation hyperfréquence présentée auparavant, la sommation étant toujours réalisée au niveau de N générateurs microondes indépendants.

# **5.3.Sommation en optique**

La sommation optique consiste à sommer sur une seule photodiode N signaux optiques modulés en hyperfréquence. La somme s'effectue au moyen d'un combineur optique, comme illustré sur la figure I-12.



Figure I-12 : Schéma simplifié de la sommation optique

Dans ce cas, la puissance hyperfréquence totale  $(P_{hyp})$  est proportionnelle au carré de la somme des photocourants détectés par la photodiode puisque la détection est quadratique. La puissance hyperfréquence détectée dépend de l'amplitude et de la phase de chacun des signaux d'entrée.

En considérant que la puissance optique modulée et les photocourants sont égaux et en phase sur les N voies, la puissance hyperfréquence est proportionnelle au carré du nombre de voies.

$$P_{hyp} = N^2 \cdot P_{hyp_i} \qquad (18)$$

Par exemple, si nous prenons deux signaux hyperfréquences RF ayant la même phase et la même amplitude modulant deux lasers similaires, la puissance du signal sommé est 6 dB plus élevée que celle obtenue avec un seul laser.

La densité de bruit est la somme des densités de bruit ; toutefois, bien qu'il n'y ait qu'un seul détecteur, le bruit du détecteur est proportionnel à la puissance optique incidente totale des N sources ; le bruit devient par conséquent :

$$B_{hyp} = N.B_{det} + N.B_{source}$$
(19)

Typiquement pour une liaison optique dans laquelle le récepteur détecte plusieurs milliwatts (donc plusieurs milliampères), le bruit majoritaire est le bruit lié à la source laser [18].

Par exemple, si nous prenons deux lasers similaires, présentant donc le même RIN, la puissance du bruit sommé est 3dB plus élevée que celle obtenue avec un seul laser [19].

En combinant les équations (18) et (19), nous obtenons donc l'expression suivante pour le rapport signal à bruit :

$$SNR_{Nvoies} = N.SNR_{1voie}$$
 (20)

Le rapport signal à bruit augmente donc proportionnellement aux nombres de voies, ainsi un gain de 3 dB en dynamique est théoriquement attendu pour la sommation optique de 2 lasers par rapport à la dynamique d'un signal unitaire.

# 5.4. Comparaisons sommation hyperfréquence/optique

Afin de comparer la sommation hyperfréquence dans une structure opto-microonde et la sommation en optique, nous rappelons ici les expressions respectives du rapport signal à bruit résultant :

 $SNR_{Nvoies} = SNR_{1voie}$  (17)

$$SNR_{Nvoies} = N.SNR_{1voie}$$
 (20)

Pour les liaisons où le bruit dominant est le bruit lié au laser, ce qui est le cas dans notre application, la sommation optique présente donc un gain proportionnel au nombre de voies sommées (N). Théoriquement, il apparaît donc que la sommation optique permet d'améliorer le SNR du signal somme par rapport à son équivalent dans le domaine microonde. Néanmoins, la sommation par voie optique présente des limites.

# 5.5. Limites de la sommation optique

#### 5.5.1. Bruit d'hétérodynage

Dans un système à antennes actives, il est impératif de conserver la cohérence électrique des N signaux hyperfréquences tout au long de la chaîne de transmission.

Pour ce faire, la cohérence optique entre les faisceaux en sortie du sommateur optique doit être supprimée afin d'éviter d'une part tout mélange optique de type interférentiel et d'autre part le bruit d'hétérodynage. Celui-ci est dû à la recombinaison des différents spectres de bruit des lasers et doit être minimisé.

Pour cela, la séparation des spectres des différentes sources sommées est donc nécessaire et peut s'opérer soit dans le domaine fréquentiel, en choisissant un ensemble de sources dont les longueurs d'onde sont suffisamment éloignées (pour créer une raie hétérodyne en dehors de la bande passante du détecteur), soit dans le domaine spatial par séparation physique des zones d'illumination (en impliquant un écart géométrique minimal à respecter entre deux voies).

## 5.5.2. Bande passante

Les systèmes hyperfréquences tels que les radars ou les systèmes de guerre électronique travaillent sur des larges bandes de fréquences entre 0.5 et 18 GHz. Il est donc nécessaire de chercher une solution à bande passante correspondante.

La bande passante d'un photodétecteur, liée à la capacité et au temps de transit, est une limitation de la sommation optique.

Plus précisément, dans le cas où l'on sépare spatialement les zones d'illumination, si N est le nombre de voies à sommer, le photodétecteur optimal doit avoir une surface directement proportionnelle à N, et par conséquent une capacité :

$$C = k * N \qquad (21)$$

où k est un paramètre dépendant de la technologie employée pour réaliser la jonction.

Or la fréquence de coupure est en première approximation inversement proportionnelle à C, donc au nombre de voies N. Il y a donc un compromis à trouver entre la bande passante et le nombre de voies dans le cas d'une sommation utilisant une séparation spatiale des différentes voies.

#### 5.5.3. Linéarité du système

Le nombre maximal N de canaux que l'on peut sommer avec un photodétecteur donné est limité par la puissance optique maximale admissible par le photodétecteur. Cette valeur, pour les meilleurs détecteurs actuels, est de l'ordre de 50mW pour des diamètres de 300µm, ce qui permet de sommer au moins une dizaine de voies mais la bande passante est alors inférieure à 1GHz.

En réalité, la puissance optique de saturation est proportionnelle à la surface (indirectement par le volume) du photodétecteur, donc proportionnelle à N. Ainsi un fonctionnement sous forte puissance semble difficilement compatible avec un fonctionnement à fréquence élevée, puisque cette deuxième condition impose une réduction du volume actif du composant. On doit donc s'attendre à des phénomènes non-linéaires sous forte puissance qui apparaîtront d'autant plus vite que la fréquence de coupure est élevée. Il faut donc rechercher le nombre optimal de voies en fonction des limites imposées par la fréquence de coupure et le taux d'harmonique supportable. Cependant le point important n'est pas la puissance maximale admissible pour développer le photodétecteur optimal, mais le choix de la technologie permettant d'augmenter la densité surfacique de puissance maximale admissible.

#### 5.5.4. Pertes d'insertion

La dynamique étant prépondérante dans cette étude, il s'agit de définir la meilleure solution permettant d'introduire le minimum de pertes optiques.

# 6. Réalisation de la sommation optique

Nous allons étudier les différentes façons de réaliser la sommation par voie optique et nous distinguerons trois technologies pour le bloc de sommation optique :

- Sommation en optique fibrée (coupleur optique / multiplexeur)
- Sommation en espace libre (sommateur à fibres)
- Sommation en optique intégrée (sommateur à guides intégrés)

Les différentes technologies seront comparées en terme de performances et de limitation.

# 6.1.Optique fibrée

# 6.1.1. Coupleur optique

#### 6.1.1.1. Principe

La solution la plus simple pour combiner plusieurs canaux optiques consiste à utiliser un coupleur optique N vers 1. Toutes les voies à sommer sont rapatriées au niveau du coupleur optique passif: chaque voie est associée à une entrée du coupleur, et la voie de sortie devient la voie somme.

Sommation de signaux hyperfréquences par voie optique



Figure I-13 : Sommation à travers un coupleur optique

Cependant cette solution, représentée figure I-13, doit être totalement déconseillée, quel que soit le nombre de voies, pour deux raisons: les pertes d'insertion du coupleur dépendent du nombre de voies et le canal de sortie du coupleur recevant la totalité du spectre peut amener soit des interférences dues au battement des différentes raies lasers, soit un bruit d'hétérodynage voire encore les deux.

#### 6.1.1.2. Pertes d'insertion

Etant donné qu'un coupleur 2 vers 1 entraîne une perte de 3 dB, un coupleur optique standard N vers 1, réalisé par concaténation de plusieurs coupleurs 2 vers 1, aura des pertes théoriques intrinsèques L égales à 10.log (N).

Pour N lasers identiques, le rapport signal à bruit SNR<sub>coupleur</sub> de la solution basée sur un coupleur est égal à :

$$SNR_{coupleur} = SNR_{1voie}$$
 (22)

On déduit de cette formule que les pertes intrinsèques du coupleur optique mènent rapidement à une perte en dynamique par rapport à la sommation calculée en optique.

# 6.1.1.3. Battement hétérodyne

Le photodétecteur est un détecteur quadratique : le photocourant qu'il génère est proportionnel au carré du champ électrique total de l'onde optique incidente, qui est donc la somme des champs électriques de toutes les ondes optiques générées par l'ensemble des lasers. Or, si les longueurs d'onde des lasers sont trop proches, les signaux optiques incidents sur le photodétecteur vont créer, par le phénomène de détection quadratique, des signaux de battement dont les fréquences seront égales à la différence entre les fréquences des ondes optiques, et qui peuvent alors être inférieures à la bande utile à transmettre, auquel cas ils ne seront pas filtrés, et vont donc être considérés comme un bruit supplémentaire **[20-21-22]**.

Nous pouvons exprimer la fréquence de battement fbat par :

$$f_{bat} = \frac{c\Delta\lambda}{\lambda^2} \qquad (23)$$

où  $\lambda$  représente la longueur d'onde moyenne des 2 ondes optiques incidentes et  $\Delta\lambda$  leur différence.

La performance est encore dégradée à cause du phénomène des bandes latérales de modulation de la porteuse optique, qui ne sont pas filtrés (optiquement et électriquement) et vont donc pouvoir par hétérodynage générer de multiples raies parasites de niveaux variables dans le temps en fonction des amplitudes des signaux incidents.

On peut penser se prémunir de ce problème en sélectionnant les lasers en longueur d'onde, de façon à ce que les longueurs d'onde soient toutes suffisamment distinctes. Cependant, dans ces conditions, il vaut en principe mieux utiliser un multiplexeur de longueurs d'onde qui présente généralement des pertes optiques plus faibles qu'un coupleur

#### 6.1.1.4. Expérimentation

On étudie le battement entre des longueurs d'onde proches et l'influence de ce phénomène sur le bruit de la liaison.

Le passage d'un faisceau laser dans un coupleur ne dégrade en aucun cas son RIN alors que la sommation par coupleur optique dégrade fortement le RIN équivalent [19]. La dégradation du RIN ou encore le bruit d'hétérodynage (se référer au paragraphe 5.5.1) issu de la sommation

via un coupleur de deux lasers de longueur d'onde proche a été mesuré dans le cadre de la thèse de S. Blanc [23] et est équivalent au bruit d'un laser de RIN égal à -155dB/Hz.

En conclusion, la sommation à travers un coupleur présente une limitation du rapport signal à bruit à cause des pertes dues au coupleur, et par ailleurs les voies n'étant pas isolées entre elles, au niveau de bruit de la liaison optique peut s'ajouter le bruit d'hétérodynage. Néanmoins si les spectres sont suffisamment éloignés, celui-ci peut être négligé.

Ces effets de pertes et d'interférences sont notablement réduits en utilisant un multiplexeur [24].

# 6.1.2. Multiplexeur

# 6.1.2.1. Principe

L'utilisation d'un multiplexeur de longueur d'onde permet d'effectuer une sommation de plusieurs signaux optiques de longueurs d'onde systématiquement toutes différentes.



Figure I-14 : Sommation à travers un multiplexeur optique

## 6.1.2.2. Avantages

Cette solution, illustrée figure I-14, présente les avantages suivants :

- elle est très facile à mettre en œuvre
- elle ne présente théoriquement pas les effets de battements hétérodynes ou de bruit d'hétérodynage de la solution à coupleur passif
- elle permet d'utiliser un photodétecteur ayant pratiquement le même diamètre de surface sensible que celui du cœur de fibre, donc de valeur minimale. Sa surface est donc minimale, ce qui permet d'obtenir la bande passante maximale
- elle ne présente théoriquement pas de pertes en excès

## 6.1.2.3. Limitations

Cette solution impose cependant que les longueurs d'onde soient toutes différentes, ce qui implique un tri des lasers en longueurs d'onde.

Bien que le coût du multiplexeur soit raisonnable, le surcoût de cette solution dû au tri des lasers ne la rend pas plus intéressante que les autres, d'autant qu'elle empêche l'utilisation du multiplexage pour d'autres fonctions nécessaires aux antennes actives (transmission de commandes sur la même fibre que celle véhiculant les signaux hyperfréquences, par exemple).

#### 6.1.2.4. Expérimentation

## 6.1.2.4.1. Sommation optique

L'influence de la sommation sur la puissance hyperfréquence et sur le bruit a été vérifiée expérimentalement à 3GHz dans le cadre de la thèse de S. Blanc [23]. Il y a une bonne adéquation entre les valeurs mesurées et théoriques dans le cas de signaux équiphases en utilisant des multiplexeurs à canaux très larges. Néanmoins, les limites intrinsèques proviennent d'une part de la puissance de saturation de la photodiode qui limite le nombre de canaux, d'autant plus que la fréquence de coupure augmente, et d'autre part des pertes d'insertion du multiplexeur qui, en pratique, augmentent avec le nombre de canaux. La

sommation à travers un multiplexeur apporte néanmoins une solution intéressante pour la réalisation de la sommation optique.

#### 6.1.2.4.2. Formation de faisceaux

Une architecture optique de formation de faisceaux par l'utilisation conjointe de fibre dispersive (fonction retard) et de multiplexeur (fonction sommation) a été proposée dans le cadre de la thèse de S. Blanc **[23]** et a été validée expérimentalement sur une antenne linéaire composée de quatre éléments rayonnants et pour une bande de fréquence [2.7-3.3 GHz]. Cependant cette architecture ne permet pas de réaliser la formation de faisceaux en 2D directement.

L'éclairement direct de N fibres optiques sur une photodiode permet de s'affranchir de ces pertes.

# **6.2.Sommation en espace libre**

## 6.2.1. Principe

Un sommateur à fibres est un sommateur optique pour lequel autant de fibres que de voies à sommer sont positionnées devant une photodiode, ce qui permet une détection simultanée de plusieurs signaux optiques. La différence majeure par rapport à la solution du coupleur optique présenté en 6.1.1 réside dans le fait qu'il n'y a pas « réelle » sommation des faisceaux optiques dans une seule fibre, toutes les fibres sont conservées identiquement à elles-mêmes et rassemblées en final pour ne former qu'une seule « grosse » fibre multicoeurs.

Un sommateur à 8 voies de ce type a été réalisé par la société Opto-Speed et est représenté figure I-15. Il consiste donc à rassembler les 8 fibres constituant les 8 voies à sommer de façon mécanique et à aligner toutes les faces des fibres dans un même plan, afin que l'ensemble de ces faces puisse être positionné directement devant la surface d'un photodétecteur. Le diamètre du « bouquet » de fibres est de 120µm. La surface d'encombrement de la face de sortie des 8 fibres optiques détermine le diamètre de la

photodiode qu'il est possible d'employer. La bande passante d'une photodiode ayant un diamètre de 120 µm est de l'ordre de 2.4 GHz.



Figure I-15 : Illustration du sommateur à fibres

Cette sommation ne nécessite pas l'utilisation de lasers triés en longueurs d'onde contrairement à la sommation à travers un coupleur optique et un multiplexeur. Par ailleurs, sous réserve de précautions, cette sommation ne rajoute pas de bruit en excès. En effet, totalement séparés dans leur propagation, les différents faisceaux ne peuvent se recouper spatialement qu'au niveau du détecteur du fait de la divergence des faisceaux en sortie de chaque fibre élémentaire. On minimise complètement ces problèmes de battements hétérodynes, en ajustant la distance entre le bouquet de fibre et la photodiode afin de séparer géométriquement les signaux optiques incidents sur le photodétecteur. En revanche, le produit entre la bande passante et le nombre de canaux est limité au niveau de la photodiode.

#### 6.2.2. Expérimentation

Les mesures réalisées à Thales Systèmes Aéroportés [25] ont été faites selon deux configurations. Des déphaseurs hyperfréquences ont été utilisés afin de travailler sur des signaux équiphases.

# 6.2.2.1. Sommation cohérente

La première consiste à sommer des signaux optiques modulés par le même signal hyperfréquence issus du même laser. Ce signal est divisé en 4 par un coupleur optique puis

raccordé à 4 des 8 fibres optiques d'entrée du combineur Opto-Speed, comme illustré sur la figure I-16.



Figure I-16 : Sommation cohérente en espace libre au moyen du sommateur à fibres

Les courbes de la figure I-17 montrent le spectre du signal hyperfréquence en sortie de photodiode selon le nombre de voies connectées.



Figure I-17 : Evolution de la puissance hyperfréquence en fonction du nombre de voies

Le tableau I-1 présente une synthèse comparative des niveaux théoriques et des mesures.

Nombre de voies	Ecart théorique (dB)	Ecart mesures (dB)
2	6	6.4
3	9.4	10.1
4	12	12.1

**Tableau I-1 :** Valeurs théoriques et mesurées de la puissance hyperfréquence en fonction du nombre de voies

L'écart théorique correspond à une valeur en dB avec la sommation des signaux hyperfréquences selon la condition de phase adéquate sans pertes supplémentaires.

Pour 2, 3 et 4 voies nous obtenons respectivement un écart expérimental de 6.4dB, 10.1dB et 12.1dB. En théorie, ces valeurs sont respectivement de 6dB, 9.4dB et 12dB. Un bon accord théorie-mesure est obtenu.

# 6.2.2.2. Sommation incohérente

La deuxième série d'essais, effectués à Thales Systèmes Aéroportés, consiste à sommer des signaux optiques modulés par le même signal hyperfréquence issus de 3 lasers différents, comme représenté figure I-18. Ces lasers sont espacés de 2nm en longueur d'onde d'émission et modulés par le même signal hyperfréquence au travers d'un répartiteur hyperfréquence en phase.



Figure I-18 : Sommation incohérente en espace libre au moyen du sommateur à fibres

# 6.2.2.2.1. Evolution de la puissance hyperfréquence

L'évolution de la puissance hyperfréquence en fonction du nombre de voies a été caractérisée. Le tableau I-2 présente une synthèse comparative des niveaux théoriques et des mesures :

Nombre de voies	Ecart théorique	Ecart mesures
2	6	6.4
3	9.4	10.2

**Tableau I-2 :** Valeurs théoriques et mesurées de la puissance hyperfréquence en fonction du nombre de voies

Nous constatons aussi dans cette configuration que le principe de la sommation est bien respecté. La sommation de deux signaux hyperfréquences par voie optique nous donne bien une augmentation du signal sommé de 6dB, tandis que pour 3 voies, nous obtenons une augmentation de 10.2 dB.

# 6.2.2.2.2. Evolution de la dynamique

Afin de vérifier la variation du rapport signal à bruit, il reste à mesurer l'augmentation du niveau de bruit. Ainsi que nous l'avons vu en théorie, le niveau de bruit doit augmenter de 3dB électrique pour une sommation à 2 voies.

Les mesures sont faites pour deux lasers avec un filtrage vidéo sur les signaux hyperfréquences afin d'améliorer la précision de mesure sur le plancher de bruit.



Figure I-19 : Evolution de la dynamique en fonction du nombre de voies

Une mesure, à f=1.75 GHz, avec 1 puis 2 voies du sommateur à fibre optique a été faite à Thales Systèmes Aéroportés, figure I-19. Cette mesure est faite dans la configuration où le bruit dû au RIN du laser est dominant. L'augmentation du signal après sommation est de 6dB alors que l'on constate que l'augmentation du niveau de bruit n'est que de 3dB. Le rapport signal à bruit mesuré pour 2 voies augmente donc de 3dB (facteur 2) par rapport à celui mesuré pour une seule voie, ce qui valide les prévisions théoriques du paragraphe 5.4. Le procédé de sommation de signaux hyperfréquences par voie optique avec une photodiode de large surface a donc été démontré par Thales Systèmes Aéroportés [26]. Cependant cette solution est intrinsèquement limitée en terme de bande passante (2.4GHz). Elle est bien

adaptée pour des applications en bande S, mais il semble difficile de focaliser 8 fibres sur une photodiode de bande passante 20GHz dont le diamètre n'est d'environ que de 35µm.

## 6.3. Optique intégrée

Les technologies en optique intégrée permettront d'augmenter le nombre de voies pour une surface donnée [27-28-29].

#### 6.3.1. Guides intégrés : principe

Le sommateur s'organise en plusieurs couches contenant chacune plusieurs guides intégrés. Entre les couches guidantes, on place des couches tampon (buffer). Cette technique est intéressante car elle permet d'obtenir une forte densité de guides dans un faible volume. On a représenté figure I-20 la configuration dans le cas d'une seule couche guidante.



Figure I-20 : Sommateur à guides intégrés

# 6.3.2. Réalisation technologique

Une technologie a été développée par le Fraunhofer Institute of Silica Research [30] pour l'empilement de guides optiques utilisant des polymères hybrides organiques et inorganiques (ORMOCER). Cette technologie utilise les méthodes de procédé conventionnelles faibles coût (dépôt à la tournette, photolithographie), et le système offre une stabilité à température élevée et une faible atténuation optique aux longueurs d'onde utilisées. Un sommateur à 32 voies composé de 4 niveaux de 8 guides optiques monomodes a été réalisé (figure I-21).



Figure I-21 : Face de sortie du sommateur ORMOCER 32 voies (4 couches de 8 guides)

L'empilement total présente une hauteur de 90  $\mu$ m pour des guides de 5 $\mu$ m par 5 $\mu$ m. L'écartement entre les guides d'une même couche décroît entre la face d'entrée (côté fibres optiques) et la face de sortie où se trouve le photodétecteur. Ainsi il est, du côté de l'arrivée des fibres, au moins égal au diamètre de la gaine de verre (125 $\mu$ m). Du côté du photodétecteur, on s'arrange pour que l'espace entre les centres des guides soit de quelques 5 à 10  $\mu$ m supérieur au diamètre du mode principal, toujours pour éviter les problèmes d'hétérodynage, qui seraient dus cette fois au couplage entre modes guidés dans la partie où les guides sont rapprochés. Cette optimisation résulte d'un compromis entre les pertes de propagation dues à la longueur totale du guide, celles dues au rayon de courbure du trajet du guide, et le couplage par onde évanescente créant l'hétérodynage.

L'espacement vertical entre les guides est de 22  $\mu$ m afin d'empêcher le couplage entre les champs évanescents des guides, ce qui augmenterait le bruit d'hétérodynage. On peut ensuite empiler un certain nombre de couches optiques guidantes pour réaliser un sommateur à plus grand nombre de voies et plus adapté à la surface circulaire du photodétecteur. La limite physique de cette technologie est donnée par la courbure du wafer avec la hauteur d'empilement, ce qui empêchera une exposition homogène du wafer lors de la photolithographie, si le procédé est étendu à plus de 6 niveaux.

#### 6.3.3. Limitations

Cependant la technologie optique intégrée s'accompagne de pertes d'insertion et de propagation plus importantes que celles du dispositif direct à fibres. Lors de l'interfaçage des fibres avec les guides optiques intégrés, on adapte des cœurs de fibres circulaires sur des guides carrés. La différence entre les profils de champs de modes conduit inévitablement à des pertes. Par ailleurs, la recherche de la meilleure isolation entre les guides conduit à réaliser un composant dont la longueur peut atteindre plusieurs centimètres. En limitant la courbure des guides, on limite le couplage de modes entre les guides ; on réduit ainsi le bruit d'hétérodynage. Des mesures effectuées sur les voies présentant les plus grandes courbures ont montré des pertes de l'ordre de 4.5 dB à 1.55µm pour une longueur de 41 mm.

Une autre limitation est liée au compromis bande passante-nombre de voies, en effet la surface d'encombrement de la face de sortie du sommateur ORMOCER dépendant du nombre de voies détermine le diamètre de la photodiode et par suite la bande passante. Ainsi la sommation de 16 et 32 voies requiert respectivement un diamètre de 60 et 194 $\mu$ m correspondant respectivement à une bande passante de 9 et 1GHz.

Comme dans le cas précédent du sommateur en espace libre, la distance entre la face sortie du sommateur ORMOCER et la photodiode doit être ajustée afin d'éviter le recouvrement des faisceaux optiques incidents à la surface du photodétecteur et par suite l'obtention d'un bruit d'hétérodynage en excès.

L'étude de la sommation de signaux hyperfréquences à travers ce sommateur à guides intégrés n'a pour l'instant pas été publiée.

6.4. Tableau récapitulatif	des solutions	envisagées
----------------------------	---------------	------------

Types de	Types de sommateur	Avantages	Inconvénients
Optique fibrée	Coupleur	<ul> <li>facile à mettre en œuvre (accès fibré)</li> <li>bande passante</li> </ul>	<ul> <li>bruit d'hétérodynage ⇒ élévation du plancher de bruit</li> <li>pertes d'insertion élevées du coupleur dépendant du nombre de voies</li> <li>tri des lasers en λ</li> <li>⇒ surcoût</li> </ul>
	Multiplexeur	<ul> <li>facile à mettre en œuvre (accès fibré)</li> <li>pas de battements hétérodynes</li> <li>bande passante</li> <li>démonstrateur à 3 GHz avec antenne 1D</li> </ul>	<ul> <li>tri des lasers en λ</li> <li>⇒ surcoût</li> <li>Saturation de la diode</li> <li>⇒ nombre de canaux limité</li> <li>pertes d'insertion</li> </ul>
En espace libre	Sommateur à fibres	<ul> <li>pas de tri des lasers</li> <li>pas de battements hétérodynes</li> <li>pertes d'insertion</li> <li>sommation à 8 voies en bande S</li> </ul>	• compromis bande passante- nombre de voies
Optique intégrée	Sommateur à guides intégrés	<ul> <li>pas de battements hétérodynes si les guides sont suffisamment écartés entre eux</li> <li>sommateur à 32 voies réalisé</li> </ul>	<ul> <li>pertes de couplage guide-fibre</li> <li>pertes de propagation dans les guides</li> <li>difficulté de réalisation technologique</li> </ul>

Tableau I-3 : Comparatif des différentes solutions pour réaliser la sommation en optique

# 7. Conclusion

Ce travail s'inscrit dans un projet visant à démontrer la faisabilité du pilotage d'antennes à balayage par voie optique et consiste à réaliser la fonction de sommation de signaux hyperfréquences par voie optique dans la bande de fréquence 0-20 GHz. En effet cette

fonction, associée aux fonctions retard et pondération, est nécessaire à la formation de faisceaux à la réception.

Les architectures de sommation de signaux microondes, soit directement dans le domaine hyperfréquence soit par voie optique ont ensuite été confrontées, en étudiant plus particulièrement le comportement de la dynamique en fonction du nombre de voies. Nous avons démontré que la sommation optique permet d'améliorer le SNR du signal somme par rapport à son équivalent dans le domaine hyperfréquence.

Les différentes méthodes de réalisation de la fonction sommation par voie optique ont ensuite été analysées en termes de performances et de limitations. Les différentes études et expérimentations reportées dans ce chapitre ont principalement montré que :

- Les solutions entièrement fibrées (coupleur passif ou multiplexeur de longueur d'onde) ne sont pas viables dans une perspective à faible coût où le nombre de voies N doit dépasser plusieurs unités. Elles ne sont valables que sous certaines conditions, par la sélection en longueurs d'onde, sous peine d'obtenir des facteurs de bruit totalement rédhibitoires. L'étude de la sommation à l'aide d'un coupleur a permis de mettre en évidence la nécessité de séparer les spectres des différentes sources sommées. La sommation à travers un coupleur, à cause de ses larges pertes optiques, ne permet pas de gain en dynamique.
- La solution présentant les plus faibles pertes d'insertion et le facteur de bruit le plus faible sans aucun tri sur les lasers est la solution à fibres à couplage direct. Cependant cette solution est sujette à un compromis bande passante - nombre de voies.

Afin de concilier simultanément une bande passante élevée, une décorrélation totale des signaux optiques ainsi qu'une puissance de sortie élevée, nous avons choisi d'étudier et de fabriquer un circuit intégré micro-optoélectronique remplissant la fonction de sommation microonde en minimisant les problèmes cités plus haut.

La conception de ce circuit est présentée dans le chapitre suivant.

# REFERENCES

[1] T. Ito, K. Fukuchi, K. Sekiya, D. Ogachara, and T. Ono

6.4 Tb/s (160x40 Gb/s) WDM transmission experiment with 0.8 Bit/s/Hz spectral efficiency

Proceedings ECOC, September 2000, Munich, post-deadline papers

[2] S. Bigo, A. Bertaina, Y. Fignac, S. Borne, L. Locy, D. Hamoir, D. Bayart, J.P. Hamaide, W. Hidler, E. Lach, B. Franz, G. Veith, P. Sillard, L. Fleury, P. Guenot and P. Nouchi

5.12 Tb/s (128x40 Gb/s) WDM transmission over 3x100 km of teralight fibre

Proceedings ECOC, September 2000, Munich, post-deadline papers

[3] A. Färbert, G. Mohs, S. Spälter, J.P. Elbers, C. Fürst, A. Schöpflin, E. Gottwald, C. Scheerer and C. Glingener

7 Tb/s (176x40 Gb/s) bidirectionnal interleaved transmission with 50 GHz channel spacing

Proceedings ECOC, September 2000, Munich, post-deadline papers

[4] J.X. Cai, M.I. Hayee, M. Nissov, M.A. Mills, A.N. Pilipetskii, S.G. Evangelides, N. Ramanujam, C.R. Davidson, R. Mengues, P.C. Corbett, D. Sutton, G. Lenner, C. Rivers and N.S. Bergano

1.12 Tb/s transmission over trans-atlantic distance (6200 km) using fifty six 20 Gb/s channels

Proceedings ECOC, September 2000, Munich, post-deadline papers

[5] T. Takana, N. Shimojo, T. Naito, H. Nakamoto, I. Yokota, T. Ueki, A. Suguyama and M. Suyama

2.1 Tb/s WDM transmission over 7221 km with 80km repeater spacing

Proceedings ECOC, September 2000, Munich, post-deadline papers

[6] P. Richin et N. Vodjani

#### La photonique hyperfréquence

Revue scientifique et Technique de la défense (RSTD), juin 2001, n°52, pp. 47-63

[7] J. Debeau, P. Gay, J.F. Veillard

Faisabilité d'un déport d'antenne terrienne sur fibre optique monomode dans la bande 3.7-4.2 GHz

OPTO 90, Paris

[8] G. Picard

Système de transmission par fibres optiques pour des liaisons satellites – bancs de contrôle sur le centre spatial guyanais

Journées optiques et micro-ondes IEEE-MTT, novembre 1992

[9] S. Drabowitch et C. Ancona Antennes – Applications 2<sup>nde</sup> édition Masson, 1986

#### [10] A.J. Seeds

**Application of Optoelectronic Techniques in Phased array Antenna Beam Forming** International Topical Meeting on Microwave Photonics, MWP'97, pp. 15-20

# [11] A.J. Seeds

## **Microwave Photonics**

IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, Vol.50, n°3, pp. 877-887

#### [12] Dassault Electronique

Apports de l'optique dans les antennes actives. Concepts d'architectures optiques : rapport final

Rapport DRET, mai 1994

[13] I. Cayrefourcq

Conception et fabrication de matrices de commutation optiques en vue de la réalisation de modules de synthèse de retards temporels

Thèse, Université de Lille1, 1998

[14] Y. Hernandez

Etudes technologiques, expérimentales et par simulation pour la commutation optique sur InP

Thèse, Université de Lille1, 2001

[15] K. Blary

Matrices de commutation optiques sur InP Thèse, Université de Lille1, 2003

[16] M. Alouini, L. Menager, N. Vodjani et C. Fourdin
 Etude d'une liaison optique pour le transport micro-onde en bande C
 Document interne THALES, avril 2004

[17] A. Yariv

# **Optical Electronics in Modern Communications**

Oxford University Press, 1997

[18] M.B. Bibey

**Transmission optique d'un signal hyperfréquence à haute pureté spectrale** Thèse de doctorat, Université Lille 1, 1998

[22] S. BozonSommation de signaux hyperfréquences sur porteuses optiquesRapport de DESS, Université Montpellier, 2000

[20] C. Desem Optical interference in lightwave subcarrier multiplexing systems employing multiple optical carriers

Electronic Letters, 1988, Vol. 24, n°1

# [**21**] C. Desem

**Optical interference in subcarrier multiplexed systems with multiple optical carriers** Journal on selected areas in communications, 1990, Vol. 8, n°7

[22] M. Nazarathy, W.V. Sorin, D.M. Baneys and S.A. Newton
 Spectral analysis of optical mixing measurements
 Journal of Lightwave technology, 1989, Vol. 7, pp. 1083-1096

# [23] S. Blanc

Architectures optiques pour la formation de faisceaux multiples à la réception – Application aux antennes radar

Thèse de doctorat, INPG, 2004

[24] D.T.K. Tong and M.C. Wu

Transmit/Receive module of multiwavelength optically controlled phased-array antennas

IEEE Photonic Technology Letter, 1998, Vol. 10, n°7, pp. 1018-1020

[25] L. Darcel

#### **Sommation de signaux hyperfréquences par voie optique** Rapport de DEA, Université Paris, 2001

[26] N. Breuil, C. Fourdin, P. Nicole, G. Ulliac, J.P. Vilcot et J. Chazelas
 Sommation optique de signaux hyperfréquences
 13<sup>èmes</sup> Journées Nationales Microondes, 2003, Lille

[27] U. Streppel, P. Dannberg, C. Waechter, A. Braeuer, P. Nicole, L. Froehlich, R. Houbertz and M. Popall

Multilayer optical fan-out device composed of stacked monomode waveguides Proceedings SPIE, 2001, Vol. 4453, pp. 61-68

[28] U. Streppel, P. Dannberg, C. Waechter, A. Braeuer and P. Nicole Optical signal summation with multilayer integrated optical fan-out devices Proceedings SPIE, 2003, Vol. 4829, pp. 464-465

[29] P. Nicole, C. Fourdin, M. Schaller, U. Streppel, A. Braeuer
 New 3D opto-microwave module for signal summation in active antenna applications
 Proceedings SPIE, 2003, Vol. 4829, pp. 1108-1109

[30] U. Streppel, P. Dannberg, C. Waechter, A. Braeuer, P. Nicole, L. Froehlich, R. Houbertz, M. Popall

Development of a New Fabrication Method for Stacked Optical Waveguides Using Inorganic-Organic Copolymers

IEEE Conference on Polymers and Adhesives in Microelectronics and Photonics, 2001, pp. 329-335

# Modélisation du sommateur opto-hyperfréquence en optique intégrée

Après un bref rappel des notions fondamentales de photodétection, nous présenterons les différents paramètres optiques et électriques caractérisant le comportement d'une photodiode classique à éclairage vertical en analysant en particulier le compromis bande passante - coefficient de réponse – saturation. Nous étudierons ensuite le fonctionnement et les performances des photodiodes évanescentes en montrant qu'elles répondent aux différents critères du cahier des charges d'une photodiode pour réaliser la fonction sommation.

Les modélisations optiques (BPM) et électriques effectuées seront ainsi détaillées à travers les notions de rendement quantique, pertes optiques et bande passante. Enfin les différentes géométries de sommateur à 2, 4 et 8 voies envisagées seront présentées.

# Préambule

La solution en optique intégrée que nous proposons consiste à réaliser un circuit optoélectronique constitué d'une photodiode PIN couplée par ondes évanescentes à N guides optiques. Notre approche repose sur l'emploi d'un unique photodétecteur intégrant la fonction de détection et de sommation. Le principe d'un tel composant suppose de détecter les signaux optiques (porteurs des signaux hyperfréquences à sommer) dans des volumes distincts d'un unique photodétecteur. La structure reposera sur un couplage évanescent faible longueur (de l'ordre de 40µm afin d'étendre la bande passante jusqu'à 20 GHz). Néanmoins le nombre d'entrées sera limité par l'isolation optique requise entre les guides et par la puissance optique continue maximale admissible par le photodétecteur.





Un sommateur à 2 voies, représenté figure II-1 (a), est constitué d'une photodiode couplée à 2 guides optiques espacés d'une distance d. Nous observons sur la figure II-1 (b) les deux guides optiques surmontés de la photodiode PIN.

# A. Photodiodes évanescentes : composants dédiés

# 1. Généralités

#### 1.1. Principes de base de la photodétection

Un photodétecteur est un dispositif permettant de convertir une énergie lumineuse en énergie électrique, par absorption des photons incidents. Si l'énergie apportée par ces photons est suffisamment importante, elle permet le passage d'un électron de la bande de valence à la bande de conduction. D'un point de vue mathématique, cette condition d'absorption se traduit par :

$$h\upsilon \ge E_g$$
 (1)

hv étant l'énergie du photon, et Eg l'énergie du matériau semi-conducteur constituant le photodétecteur.

- Si cette relation n'est pas vérifiée, il n'y a pas d'interaction et le milieu est dit « transparent ».
- Si cette relation est vérifiée, le photon est absorbé et il y a création d'une paire électrontrou au cœur du matériau.

De plus, si l'on applique un champ électrique aux bornes de cette zone absorbante, la paire électron-trou est alors dissociée et les porteurs peuvent être récupérés par le circuit extérieur. C'est le principe de base de la photodétection.

#### 1.2. La filière InP

#### 1.2.1. Généralités

La filière InP est adaptée à la photodétection aux grandes longueurs d'ondes ( $1.3\mu m$  et  $1.55\mu m$ ). En effet, même si l'InP n'est pas absorbant dans cette gamme de longueurs d'onde, il existe d'autres matériaux en accord de maille sur InP, comme le montre la figure II-2, capables d'absorber la lumière à ces longueurs d'onde ( $1,3 \mu m$  et  $1,55 \mu m$ ), et ayant de bonnes caractéristiques de transport [1]. C'est d'ailleurs, à l'heure actuelle, la seule filière matériau industrielle le permettant.



Figure II-2 : Energie de bande interdite de différents matériaux en accord de maille sur InP

Les matériaux les plus utilisés en accord de maille sur InP sont :

• le matériau ternaire Ga<sub>x</sub>In<sub>1-x</sub>As dont la condition d'accord de maille est réalisée pour x=0.47

• le quaternaire  $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ , combinaison du ternaire  $Ga_xIn_{1-x}As$  avec l'InP dont la condition d'accord de maille est x=0.47y.

Pour qu'il y ait photodétection, comme nous venons de le voir, il faut que le photon incident ait une énergie supérieure à celle de la bande interdite du matériau. Il existe donc une longueur d'onde  $\lambda_c$ , dite de seuil photoélectrique ou de coupure, définissant la limite supérieure du domaine spectral d'absorption.  $\lambda_c$  est définie par :

$$\lambda_c(\mu m) = \frac{1.24}{E_g(eV)} \qquad (2)$$

On peut ainsi définir, pour chaque matériau semi-conducteur, une longueur d'onde de coupure  $\lambda_c$  au-delà de laquelle le matériau est transparent. L'énergie de bande interdite  $E_g$  ainsi que la longueur d'onde de coupure  $\lambda_c$  de quelques matériaux sont données dans le tableau II-1. Ces chiffres montrent l'intérêt du matériau ternaire GaInAs et de certains des matériaux quaternaires GaInAsP pour la détection aux grandes longueurs d'onde.

Matériau	Si	GaAs	InP	Ga <sub>0.47</sub> In <sub>0.53</sub> As	Ga <sub>x</sub> In <sub>1-x</sub> As <sub>y</sub> P <sub>1-y</sub>
E <sub>g</sub> (eV)	1.12	1.42	1.35	0.75	0.75→1.35
λ <sub>c</sub> (μm)	1.11	0.87	0.92	1.65	0.92→1.65

**Tableau II-1 :** Energie de bande interdite et longueur d'onde de coupure associée de quelques

 matériaux semiconducteurs

#### 1.2.2. Le GaInAs : matériau de base pour la photodétection

## 1.2.2.1. Propriétés optiques

Le Ga<sub>0.47</sub>In<sub>0.53</sub>As présente un intérêt tout particulier pour la photodétection. Son petit gap de 0.75eV lui confère des propriétés d'absorption très intéressantes aux longueurs d'onde des télécommunications. En effet, son coefficient d'absorption très élevé, est évalué à  $\alpha$ =0.68µm<sup>-1</sup> à  $\lambda$ =1.55µm et  $\alpha$ =1.16µm<sup>-1</sup> à  $\lambda$ =1.3µm [2].

#### 1.2.2.2. Propriétés électriques

Outre ses propriétés optiques, ses propriétés électriques sont également intéressantes. La faible masse effective des électrons permet d'atteindre des valeurs de mobilité favorables à la fabrication de photodiodes rapides ( $\mu_n$ =12000 cm<sup>2</sup>V<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup> à 300 K [3-4]). Pour une photodiode PIN, le GaInAs, constituant la zone intrinsèque de la diode, sera utilisé en régime de

saturation afin d'atteindre la vitesse maximale des trous. Pour des champs supérieurs à 50 kV/cm, les vitesses des porteurs se stabilisent aux alentours de  $v_{nsat}=6.5.10^6$ cm.s<sup>-1</sup> et  $v_{psat}=4.8.10^6$ cm.s<sup>-1</sup> [5].

#### 1.2.3. Les composés GaInAsP

L'intérêt majeur des matériaux quaternaires est de pouvoir fixer leur gap en jouant sur leur composition. Le gap du  $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$  est modulable entre 0.75 e.V et 1.35 e.V (GaInAs-InP).

Cela permet donc, par ajustement de la composition du matériau, de disposer d'alliages transparents aux longueurs d'onde des télécommunications.

# 1.2.4. Propriétés optiques des matériaux InP, GaInAs et GaInAsP

#### 1.2.4.1. Indices de réfraction

Le tableau II-2 regroupe la longueur d'onde de coupure  $\lambda_c$  ainsi que l'indice de réfraction n de différents matériaux de la filière InP utilisés à la longueur d'onde 1.55µm. Il est à noter que les matériaux quaternaires sont souvent discernés par leur longueur d'onde de coupure plutôt que par leurs paramètres x et y.

Matériaux	InP	Galı	nAsP	GaInAs
λ <sub>c</sub> (μm)	0.92	1.15	1.30	1.65
n	3.17	3.315	3.38	3.57-0.08i

Tableau II-2 : Indices de réfraction de différents matériaux de la filière InP à 1.55µm [6]

Ces valeurs ne sont valables que pour les matériaux non dopés intentionnellement. Néanmoins, en pratique, le niveau de dopage résiduel dans de tels matériaux est aux alentours de  $n_i=10^{15}$  cm<sup>-3</sup>.

# 1.2.4.2. Influence du dopage

Pour des dopages usuels utilisés dans les photodiodes, les variations d'indice du GaInAs avec le dopage de type P sont négligeables [7], tandis que la valeur de l'indice de réfraction de l'InP est abaissée de 3.17 à environ 3.163 pour un dopage de 2.10<sup>18</sup> cm<sup>-3</sup> [8].

Pour un dopage de type n<sup>+</sup> de  $10^{18}$  cm<sup>-3</sup>, utilisé dans les photodiodes, l'indice du GaInAsP<sub>1.3µm</sub> passe de 3.38 à 3.36 **[9]**.

#### 1.3. La photodiode PIN : le composant de base de la photodétection

Nous présentons dans ce paragraphe les différentes caractéristiques définissant toute photodiode à savoir : le coefficient de réponse (conversion photons/paires électron-trou), la réponse fréquentielle (temps de collection des porteurs photogénérés) et les courants d'obscurité et de saturation.

Nous illustrons nos propos par le photodétecteur le plus utilisé actuellement, en raison de sa relative simplicité et de ses performances, qu'est la photodiode PIN à éclairage frontal, représentée figure II-3.



Figure II-3 : Structure planaire à éclairement par le dessus

# 1.3.1. Principe de fonctionnement

La photodiode PIN est schématiquement constituée de trois sections de semi-conducteurs : une couche intrinsèque (I) ou plus précisément non intentionnellement dopée (n.i.d), intercalée entre une couche de type P et une autre de type N, toutes deux fortement dopées. Le principe de fonctionnement d'une photodiode PIN est illustré figure II-4.



Figure II-4 : Photodiode PIN à éclairage vertical

Sous éclairement, la couche n.i.d absorbe l'énergie lumineuse incidente ( $P_{opt}$ ). Son épaisseur W détermine le coefficient de réponse du détecteur en fonction du matériau (ternaire ou quaternaire) choisi pour sa réalisation.

Les zones de type P et N sont choisies de telle sorte que leur gap soit supérieur à l'énergie des photons à collecter, elles sont donc transparentes à la longueur d'onde de travail.

Sous polarisation inverse suffisante, la zone de déplétion s'étend à travers toute la couche intrinsèque. Dans de telles conditions, il existe un champ électrique  $\overrightarrow{E}$  élevé dans la zone n.i.d séparant efficacement les paires électrons-trous. Ainsi, les porteurs photocréés, électrons et trous, sont transportés dans le composant jusqu'aux deux contacts électriques le reliant au circuit extérieur, en particulier à la résistance de charge aux bornes de laquelle est mesuré le signal électrique. Ils peuvent atteindre leur vitesse de saturation sous l'action de ce champ électrique [10], ce qui conduit à de meilleures performances en terme de réponse dynamique. Ainsi, pour les champs électriques supérieurs à 50 kV/cm, les vitesses des porteurs sont quasi constantes [11] et se stabilisent, comme nous l'avons vu pour la GaInAs, aux alentours de  $v_{nsat}=6.5.10^6$ cm.s<sup>-1</sup> et  $v_{psat}=4.8.10^6$ cm.s<sup>-1</sup> [5].

#### 1.3.2. Coefficient de réponse et rendement quantique

Nous donnons ici les définitions générales du rendement quantique interne  $\eta_{int}$  et externe  $\eta_{ext}$  ainsi que de le coefficient de réponse  $\Re$  de la photodiode [12].

#### 1.3.2.1. Rendement quantique interne

Pour une photodiode classique, l'épaisseur de la zone intrinsèque (I) définit le rendement quantique de la diode. Ainsi lorsque la photodiode est éclairée perpendiculairement aux surfaces épitaxiées, l'épaisseur de la couche intrinsèque est la dimension qui détermine l'absorption.

Le rendement quantique interne  $\eta_{int}$  de la photodiode est le nombre de paires électrons/trous générés par photon incident couplé dans la zone absorbante et peut s'exprimer par :

$$\eta_{\rm int} = 1 - e^{-\alpha W} \tag{3}$$

avec  $\alpha$  le coefficient d'absorption optique du matériau constituant la zone intrinsèque absorbante.

#### 1.3.2.2. Rendement quantique externe

Le rendement quantique externe est le rapport entre le nombre d'électrons collectés dans le circuit extérieur et le nombre de photons incidents:

$$\eta_{ext} = \frac{\frac{I_{ph}}{q}}{\frac{P_{opt}}{hv}}$$
(4)

où  $I_{ph}$  est le photocourant généré par l'absorption d'un faisceau incident de puissance  $P_{opt}$  constitué par des photons d'énergie hv.

Le rendement quantique externe peut également s'exprimer en fonction du rendement quantique interne  $\eta_{int}$  de la façon suivante :

$$\eta_{ext} = (1 - R) \eta_c \eta_{int} \quad (5)$$

où R est le coefficient de réflexion à l'interface air/semiconducteur, celui-ci peut être minimisé par l'adjonction d'une couche anti-reflet augmentant ainsi  $\eta_{ext}$ .  $\eta_c$  est le coefficient de couplage fibre/photodiode dans le cas d'un éclairement par fibre optique. En fonction de la dimension de la photodiode et/ou de l'éloignement de la fibre vis-à-vis de celle-ci, ce coefficient peut rapidement diminuer  $\eta_{ext}$ .

Dans le cas idéal, couche antireflet parfaite et rendement de couplage fibre/photodiode unitaire, le rendement externe est égal au rendement interne.

#### 1.3.2.3. Coefficient de réponse

Le coefficient de réponse  $(\Re)$ , exprimé en A/W, est donné comme le rapport entre le photocourant et la puissance optique incidente :

$$\Re = \frac{I_{ph}}{P_{opt}} = \frac{q}{h\nu} \eta_{ext} = \frac{\lambda}{1.24} \eta_{ext} = \frac{\lambda}{1.24} (1-R) \eta_{c.} \eta_{int} = \frac{\lambda}{1.24} (1-R) \eta_{c.} (1-R) \eta_{c.} (1-R) \eta_{c.} (1-R) \eta_{c.} \eta_{int} = \frac{\lambda}{1.24} (1-R) \eta_{c.} \eta_{int} = \frac{$$

Le coefficient de réponse doit être bien entendu le plus élevé possible. Nous avons tracé sur la figure II-5 le coefficient de réponse  $\Re$  à 1,55µm en fonction de l'épaisseur du GaInAs en nous plaçant dans le cas idéal où R=0 et  $\eta_c$ =1.

#### Modélisation du sommateur opto-hyperfréquence en optique intégrée



Figure II-5 : Evolution du coefficient de réponse en fonction de l'épaisseur de la zone absorbante

Dans le cas idéal d'une diode de plusieurs microns d'épaisseur avec un rendement de couplage unitaire et pour un coefficient de réflexion nul, on pourra atteindre la limite théorique de 1,25 A/W à 1,55µm correspondant à la conversion d'un photon en une paire électron-trou.

#### **1.3.3.** Limitations fréquentielles

Deux facteurs principaux peuvent limiter la largeur de la bande passante de la photodiode PIN [5]:

• le temps de transit des porteurs photocréés à travers la région de déplétion

• la constante de temps RC correspondant au temps pris par la capacité du dispositif pour se décharger à travers le circuit de charge extérieur

#### 1.3.3.1. Temps de transit des porteurs

Les porteurs photogénérés dans la région de déplétion sont évacués en un temps fini, appelé temps de transit, dépendant de la vitesse de dérive des porteurs et de la largeur de la région de déplétion W. Le temps de transit fixe la limite extrême de fonctionnement de la photodiode. La fréquence de coupure ft liée au temps de transit peut s'exprimer par [13] :

$$f_{t} = \frac{3.5\overline{v}}{2\pi .W} \quad (7)$$

$$\frac{1}{\overline{v}^{4}} = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{v_{nsat}^{4}} + \frac{1}{v_{psat}^{4}} \right] \quad (8)$$

avec

où  $\overline{v}$  est une vitesse équivalente qui tient compte des vitesses de saturation des électrons et des trous.

La fréquence de coupure  $f_t$  augmente donc avec la vitesse des porteurs et diminue avec l'épaisseur de la zone déserte W.

## 1.3.3.2. Effet de la capacité de la diode

La photodiode PIN peut être modélisée par le circuit équivalent simplifié de la figure II-6. Ce modèle va nous permettre de donner une première valeur approximative de la bande passante liée à la charge et à la décharge de la capacité intrinsèque  $C_i$  dans la charge  $R_c$ .

Un générateur de courant, relatif au photocourant  $I_{ph}$ , est en parallèle à une capacité  $C_j$ , associée à la zone déplétée de la jonction PIN. La résistance série  $R_s$ , en première approximation égale à 10 $\Omega$  [14], nous permet de tenir compte de la résistance des couches épitaxiales et des contacts P et N. Le photocourant est enfin débité sur une charge Rc égale à 50 $\Omega$ .



Figure II-6 : Schéma électrique équivalent d'une photodiode

Ce circuit équivalent est un filtre passe-bas, ainsi la fréquence de coupure associée à la capacité de la photodiode  $f_{RC}$  s'écrit [15] :

$$f_{RC} = \frac{1}{2\pi C_{i}(R_{S} + R_{C})}$$
(9)

La zone de charge d'espace d'une photodiode PIN peut être comparée à un condensateur plan dont les armatures sont espacées de l'épaisseur de la couche absorbante W. La capacité  $C_j$  de la photodiode PIN s'écrit dans ce cas :

$$C_j = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 S}{W} \quad (10)$$

avec  $\varepsilon_r$  la permittivité relative du matériau absorbant ( $\varepsilon_r = 13.4$  pour le GaInAs [16]), et S la surface de la photodiode. (W étant toujours l'épaisseur de la zone intrinsèque) Par suite, la fréquence de coupure  $f_{RC}$  liée à la capacité peut également s'exprimer par :

$$f_{RC} = \frac{W}{2\pi\varepsilon_r\varepsilon_0 S(R_S + R_c)}$$
(11)

La fréquence de coupure  $f_{RC}$  augmente avec l'épaisseur de la zone déserte W et diminue avec la surface de la photodiode S.

#### 1.3.3.3. Bande passante

La fréquence de coupure qui résulte de ces deux phénomènes peut s'exprimer par [13] :

$$\frac{1}{f_{-3dB}^2} = \frac{1}{f_t^2} + \frac{1}{f_{RC}^2} \qquad (12)$$

soit :

$$f_{-3dB} = \left[ \left( \frac{2\pi W}{3.5\overline{v}} \right)^2 + \left( \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r (R_s + R_c)S}{W} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}}$$
(13)
La prépondérance de l'un ou l'autre de ces termes dépend de la surface S de la photodiode et de l'épaisseur de la zone déserte W.

Nous présentons sur la figure II-7 l'évolution de la fréquence de coupure  $f_{.3dB}$  d'une photodiode du type GaInAs / InP en fonction de l'épaisseur de la zone intrinsèque W pour une surface de photodiode égale à 100 $\mu$ m<sup>2</sup>.



**Figure II-7 :** Evolution de  $f_t$ ,  $f_{RC}$  et  $f_{-3dB}$  en fonction de l'épaisseur de la zone intrinsèque W pour S=100 $\mu$ m<sup>2</sup>

Pour de faibles épaisseurs de la zone intrinsèque, la réponse fréquentielle de la photodiode est limitée par sa capacité. Pour les valeurs importantes, le temps de transit des porteurs devient le facteur prépondérant. Pour les valeurs intermédiaires, les deux effets régissent le fonctionnement de la photodiode.

Nous pouvons résoudre l'équation (13) pour la surface S de la photodiode [17] :

$$S = \frac{W}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r(R_s + R_c)}\sqrt{\frac{1}{f_{-3dB}^2} - \left(\frac{2\pi W}{3.5\overline{v}}\right)^2}$$
(14)

Ceci nous permet, en fixant une fréquence de coupure, de pouvoir tracer les contours S (W) qui lient les dimensions de la diode à cette fréquence de coupure.



Figure II-8 : Dimensionnement d'une photodiode en fonction de sa fréquence de coupure

Le graphique représenté figure II-8 illustre les liens qui associent la fréquence de coupure de la diode PIN à ses dimensions physiques. Nous pouvons en déduire qu'à surface constante, l'augmentation de l'épaisseur de la couche intrinsèque diminue la fréquence de coupure de la diode. Tandis qu'à épaisseur constante de la zone intrinsèque, l'augmentation de la surface du composant diminue la valeur de la fréquence de coupure.

Nous pouvons également constater qu'il est possible d'atteindre des fréquences de coupure élevées, supérieures à 60 GHz, pour des épaisseurs de couche absorbante relativement faibles (inférieures à 0.4µm). Cependant, dans de telles conditions, le coefficient de réponse de la photodiode se trouve fortement amoindri car d'une part la surface photosensible est trop réduite, et d'autre part l'épaisseur de zone absorbante est trop faible.

#### 1.3.4. Compromis coefficient de réponse - bande passante

Lorsque l'on utilise des épaisseurs de GaInAs de 2 à 3  $\mu$ m, ce type de photodiode convient bien pour des bandes passantes de 10GHz, en permettant d'obtenir des coefficients de réponse de 0.8-1A/W, avec des capacités de l'ordre de 30 à 40 fF pour un diamètre photosensible typique de 30  $\mu$ m [18]. Le couplage optique entre la fibre monomode et la photodiode est peu critique dans ce cas. Les limitations de ce type de diode apparaissent lorsque la bande passante augmente. Il devient en effet nécessaire de réduire l'épaisseur de la zone intrinsèque en GaInAs pour diminuer les temps de transit des porteurs photogénérés vers les zones de contact.

La figure II-9 représente l'évolution du coefficient de réponse et de la fréquence de coupure d'une photodiode PIN à éclairage frontal en fonction de l'épaisseur de la zone absorbante W.



**Figure II-9 :** Compromis coefficient de réponse / bande passante en fonction de l'épaisseur de la zone absorbante

On voit que les deux grandeurs varient en sens inverse, et qu'il est impossible de conserver un coefficient de réponse élevé lorsqu'on souhaite augmenter la bande passante. Pour une bande passante de 20 GHz par exemple, le coefficient de réponse d'une photodiode à éclairage frontal ne peut dépasser 0.8A/W. Cependant, au-dessus de 40 GHz, il paraît difficile d'obtenir des coefficients de réponse supérieurs à 0.5 A/W. En visant 60 GHz, on ne peut attendre guère plus que 0.35 A/W. La photodiode PIN à éclairement par le dessus ne peut donc être, à la fois, rapide et sensible. Les travaux tirés de la littérature confirment cette tendance **[19-24]**.

### 1.3.5. Courant d'obscurité

Le courant d'obscurité est la somme de plusieurs contributions : courant de diffusion, courant de génération non radiative nécessitant un apport d'énergie, courant tunnel et courants de fuite surfaciques [25].

La figure II-10 illustre ces différentes sources de courant d'obscurité [26].



Figure II-10 : Illustration des sources de courant d'obscurité dans une photodiode PIN

La génération non radiative est particulièrement active à la surface des composants où la densité de défauts est très élevée. Elle peut être réduite par un traitement de passivation. Contrairement au silicium dont l'oxyde natif  $SiO_2$  est un excellent passivant, les semiconducteurs III-V se couvrent à l'air de différents oxydes instables, sources de pièges et dérivant dans le temps. Il est donc nécessaire, après une désoxydation de surface, de déposer un matériau d'excellente qualité diélectrique, tel que le nitrure de silicium.

La contribution du courant tunnel au courant d'obscurité est importante essentiellement pour les photodiodes possédant des matériaux à petite bande interdite. En effet, dans ce cas, les électrons peuvent également être transportés à énergie constante par effet tunnel à travers la barrière de potentiel triangulaire présente à la jonction, si elle est suffisamment fine.

Le courant d'obscurité dépend également de la qualité et de l'épaisseur des couches épitaxiées et du type de gravure utilisé lors de la définition du mesa P-I.

# 1.3.6. Courant de saturation

Au-delà d'une certaine puissance optique incidente, même si le photodétecteur possède un coefficient de réponse donné en A/W, il ne peut y avoir plus de porteurs générés par les photons que la structure du matériau n'a de centres excitables. Ceci induit une diminution du coefficient de réponse lorsque la puissance optique augmente, et à terme le nombre de porteurs générés par seconde reste constant. La courbe du photocourant  $I_{ph}$  en fonction de la puissance optique incidente, représentée figure II-11, tend donc vers une constante  $I_{max}$ .



Figure II-11 : Evolution du photocourant en fonction de la puissance optique

Cette limitation du photocourant est due à des phénomènes électriques et thermiques. On décrira premièrement les éventuels désagréments causés par la présence de nombreux porteurs dans la zone déserte [27-28]. On présentera ensuite les limitations thermiques du photocourant.

#### 1.3.6.1. Claquage en champ

Sous polarisation inverse suffisante, règne un champ électrique élevé dans la zone absorbante séparant efficacement les paires électrons-trous. Ainsi, les porteurs photocréés, électrons et trous, transitent respectivement vers les couches dopées N et P et peuvent atteindre leur vitesse de saturation sous l'action de ce champ électrique.

Nous supposons pour simplifier que leurs vitesses de saturation sont égales et notées v.

La densité moyenne  $\Delta n$  des électrons dans la zone déserte d'épaisseur W et de surface S s'écrit [29] :

$$\Delta n \approx \frac{I_{ph}}{qSv} \qquad (15)$$

Un champ de dépolarisation interne  $\Delta E$ , opposé à celui appliqué au composant par le générateur extérieur, est créé lors de la séparation spatiale des électrons et des trous :

$$\Delta E \approx \frac{q}{\varepsilon_0 \varepsilon_r W} \Delta n \qquad (16)$$

Ainsi, d'après les formules (15) et (16), plus le photocourant  $I_{ph}$  sera important, plus le nombre des porteurs dans la zone déserte sera grand et par suite plus le champ de dépolarisation interne sera élevée. Cependant la dépolarisation ne peut dépasser le champ de claquage  $E_c$  qui vaut 200 kV/cm dans le matériau GaInAs [30].

On en déduit donc la limite suivante sur le photocourant pour une dépolarisation maximale Ec:

$$I_{ph\max} \approx S.W.\varepsilon_0 \varepsilon_r v E_c \qquad (17)$$

Cette formule **[29]** nous permet d'évaluer qualitativement l'influence de différents paramètres sur le fonctionnement en puissance des photodiodes.

Ainsi, nous voyons que le photocourant maximal  $I_{phmax}$  évolue proportionnellement à la surface de la photodiode S. La surface maximale diminuant fortement lorsque la fréquence de coupure augmente, le photocourant maximal en régime linéaire diminue également rapidement avec l'augmentation de la bande passante.

Nous déduisons également de la formule (17) que le photocourant  $I_{ph}$  évolue proportionnellement à la vitesse des porteurs. Une vitesse de porteurs élevée favorise ainsi le fonctionnement en puissance des photodiodes. Cette propriété est notamment exploitée dans les photodiodes UTC (Uni-Travelling-Carrier) **[31-35]**, où seuls les électrons photogénérés participent aux mécanismes de transport électrique. La collection d'un seul type de porteurs permet également d'éviter l'accumulation de porteurs et l'écrantage habituel du champ électrique résultant.

#### 1.3.6.2. Claquage thermique

Les phénomènes thermiques limitent également le fonctionnement en puissance des photodiodes. Ainsi sous fort échauffement, les photodiodes ne peuvent plus fonctionner correctement [36-37].

La puissance  $Pj \approx V.i$  fournie par le générateur est en partie dissipée par la zone intrinsèque. La variation de température  $\Delta T$  en fonction de la résistance thermique de la photodiode notée  $R_J$  est donnée par la formule suivante:

$$\Delta T \approx R_J P_J$$
 (18)

Les échanges thermiques entre la zone intrinsèque et le substrat sont favorisés lorsque la surface de la photodiode augmente et lorsque la zone intrinsèque est mince de sorte que :

$$R_{J} \approx \frac{W}{K.S} \qquad (19)$$

avec K la conductivité thermique.

On en déduit la limite suivante sur le photocourant pour un échauffement maximal  $\Delta T_c$  et une tension de polarisation V [30]:

$$I_{ph} \approx \frac{S}{W} \frac{K\Delta T_c}{V}$$
(20)

Cette formule nous permet d'évaluer qualitativement l'influence de différents paramètres sur le fonctionnement en puissance des photodiodes.

Nous pouvons en déduire que les grandes surfaces favorisent le fonctionnement en puissance. Ainsi les efforts de recherche afin d'augmenter la surface seront donc simultanément bénéfiques sur le plan thermique et électrique.

Nous voyons également que le photocourant  $I_{ph}$  évolue inversement à la tension de polarisation V, ainsi une faible tension de polarisation inverse est requise pour limiter l'échauffement du composant.

Enfin une bonne conductivité thermique K favorise l'obtention d'un photocourant élevé. Celle-ci dépend fortement du matériau considéré, elle vaut par exemple  $0.048 \text{ W.cm}^{-1}$ .K<sup>-1</sup> dans le cas du GaInAs [29] et 0.7 W.cm<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> pour l'InP [38].

#### 1.4. Etude d'une photodiode évanescente

Les photodiodes à couplage évanescent intégrées avec des guides de façon monolithique permettent d'optimiser indépendamment les performances de couplage, de coefficient de réponse, de bande passante et de saturation. En effet, les photodiodes évanescentes, utilisant plus efficacement la surface en répartissant la génération de manière plus uniforme sur toute la longueur de la photodiode, permettent d'éviter les fortes accumulations de porteurs dans les premiers microns et d'obtenir ainsi plus facilement un fonctionnement en puissance.

Comme nous l'avons mentionné en préambule, nous envisageons ce type de structures pour réaliser la fonction sommation de signaux hyperfréquences par voie optique. Après en avoir défini le principe de fonctionnement [39], nous détaillerons l'historique des recherches basées sur les photodiodes à couplage évanescent.

#### 1.4.1. Principe de fonctionnement



Figure II-12 : Schéma de principe des photodiodes évanescentes

Une photodiode à couplage évanescent, illustrée figure II-12, est constituée de :

- un guide d'onde monomode de cœur
- une couche d'adaptation optique dopée N facilitant le couplage de la lumière du guide vers la zone absorbante intrinsèque, et améliorant ainsi le rendement quantique interne de la diode
- une couche absorbante I en GaInAs d'épaisseur W
- une couche de type P jouant en plus le rôle de couche d'espacement pour éviter l'absorption de la lumière par la métallisation.

Le flux lumineux, couplé dans le guide en amont de la structure, se propage en restant confiné sous le ruban du guide grâce à une différence d'indice. Afin de faciliter le transfert de l'énergie optique entre le guide et la zone absorbante (I), une couche d'adaptation optique a été introduite. Elle peut être prolongée du côté de l'entrée du guide d'une longueur d'adaptation M afin d'avoir un changement progressif de l'indice effectif et d'éviter ainsi le changement abrupt d'indice lors de la transition guide-détecteur. Enfin l'énergie optique incidente couplée est absorbée dans la couche intrinsèque en GaInAs. Hormis ce procédé d'absorption, différent de celui utilisé pour la photodiode à éclairage frontal, les caractéristiques précédemment mentionnées pour celles-ci sont applicables à la photodiode évanescente.

#### 1.4.2. Etat de l'art

Au milieu des années 1980, de nombreux travaux ont étudié la possibilité d'intégrer monolithiquement un guide optique et un photodétecteur. Parmi ces travaux, citons ceux réalisés à l'I.E.M.N sur substrat GaAs [40].

En 1987, l'intégration monolithique sur substrat  $N^+$  d'un guide optique présentant un ruban en AlGaInAs avec une photodiode de type P-N en InGaAs a été démontrée [41]. Ces premiers résultats ont permis d'obtenir un coefficient de réponse de 0.25 A/W et une fréquence de coupure de 0.6 GHz. L'utilisation d'un guide épais en InP a permis d'étendre la bande passante à 7 GHz avec un coefficient de réponse de seulement 0.09 A/W [42]. Cependant l'utilisation de ces guides épais présentant des modes élargis est désirable afin de faciliter le couplage en entrée avec la fibre monomode, mais est incompatible pour des schémas

d'intégration guide-photodiode large bande. En effet des modes élargis réduisent le couplage guide-diode dans les structures évanescentes, ce qui a pour conséquence soit un faible coefficient de réponse dû à une absorption insuffisante, soit une faible bande passante due à la longueur de diode nécessaire. L'introduction d'une couche d'adaptation en GaInAsP dopée N située entre le guide et la couche absorbante a amélioré le couplage entre le guide épais en InP et le détecteur, ce qui a permis de diminuer la longueur de la photodiode et par suite d'obtenir une fréquence de coupure de 11.2 GHz associée à un coefficient de réponse de 0.36 A/W **[43]**. Utilisant cette approche, mais cette fois en introduisant un guide en GaInAsP, une fréquence de coupure de 38 GHz associée à un coefficient de réponse de 0.22 A/W ont été démontrés **[44]**. De plus, une faible dépendance du rendement du détecteur à la longueur d'onde et à la polarisation a été démontrée, contrairement aux résultats précédents.

Les travaux de recherche se sont ensuite attachés à réduire les dimensions des composants, qui par effet capacitif limitaient leurs performances dynamiques, et à augmenter le coefficient de réponse de la photodiode.

Ainsi avec un guide monomode en GaInAsP, un coefficient de réponse de 0.2 A/W et une fréquence de coupure de 45 GHz ont été obtenus [45]. L'absence de saturation de la puissance hyperfréquence à 45 GHz a été démontrée jusqu'à une puissance optique de 5 mW. Dû à une faible efficacité de couplage, le coefficient de réponse est seulement de 0.3 A/W [46], mais il peut être amélioré à 0.7 A/W [47] et à 0.8 A/W [48] en intégrant un adaptateur de mode. Comparées aux photodiodes éclairées par la tranche, les photodiodes évanescentes sont plus robustes sous une puissance élevée à cause de l'absorption distribuée de la lumière le long du détecteur, et l'intégration d'un adaptateur de mode apporte une réponse au problème de packaging rencontré. Ainsi, les tolérances d'alignement à -1dB augmentent jusqu'à 2.5µm, autorisant ainsi des techniques de packaging moins onéreuses [47]. L'étape critique de réalisation de l'adaptateur de mode peut être remplacée par un guide d'onde multimode à gradient d'indice. Utilisant cette approche, une réponse de 0.96 A/W et une fréquence de coupure de 40 GHz [49] ont été démontrées. Cependant, les photodiodes évanescentes présentent souvent une dépendance à la polarisation de la lumière car celle-ci doit transiter du guide inférieur jusqu'à la couche absorbante supérieure. Pour surmonter ce problème, une photodiode évanescente intégrant un double niveau d'adaptation de mode avec un guide d'entrée dilué a montré une dépendance à la polarisation de 0.2 dB combinée à un courant de saturation quatre fois plus élevé que celui d'une photodiode à éclairage latéral [50]. Récemment, l'utilisation d'un guide dilué et d'une face gravée a montré un coefficient de

réponse de 0.73 A/W couplé à une fréquence de coupure de 47 GHz et à un courant de saturation de 16mA **[51]**. Une approche similaire utilisant un guide dilué et deux couches de préadaptation de mode a montré un coefficient de réponse de 1.02 A/W associé à une fréquence de coupure de 48 GHz **[52]**.

Ces derniers résultats montrent que les photodiodes évanescentes possèdent les caractéristiques pour surmonter les nouveaux challenges des applications analogiques à bande passante élevée et également ceux concernant les applications numériques à 40 Gb/s :

- Elles peuvent opérer à des niveaux de puissance élevée. La fonction régénération du signal peut être réalisée par l'utilisation de préamplificateur optique à fibre dopée erbium autorisant la photodiode à piloter directement le circuit de décision. Comme l'amplificateur électrique usuel peut être éliminé, le rapport signal sur bruit peut être augmenté sensiblement. Dans le cas des applications numériques à 40 Gb/s, la photodiode doit supporter une puissance optique d'environ +10dBm, correspondant à un courant de saturation de 10 mA pour des tensions de sortie élevées.
- Elles peuvent fournir des modules photorécepteurs à coefficient de réponse élevé et bas coût. Le coût d'un module est principalement lié aux tolérances d'alignement de la fibre par rapport au photodétecteur.

Ces derniers résultats montrent également que les photodiodes évanescentes possèdent les caractéristiques en bande passante, coefficient de réponse et courant de saturation pour réaliser la fonction sommation envisagée.

Le tableau II-3 regroupe tous ces travaux cités et tirés de la littérature.

Référence	Laboratoire	Matériaux	Topologie	Réponse R (A/W)	Fc (GHz)	Saturation
[41]	CSELT	AlGaInAs/GaInAs	Jonction P/N + Guide avec ruban en AlGaInAs	0.25	0.6	
[42]	Bellcore	InP/GaInAs	Guide avec ruban en InP	0.09	7	
[43]	Fujitsu	InP/GaInAs	Guide avec ruban en InP + couche d'adaptation	0.36	11.2	
[44]	Fujitsu	GaInAsP/GaInAs	Guide en GaInAsP + couche d'adaptation	0.22	38	
[45]	Heinrich-Hertz- Institut	GaInAsP/GaInAs	Guide en GaInAsP	0.2	45	P <sub>sat</sub> >5mW
[46]	Heinrich-Hertz- Institut	GaInAsP/GaInAs	Guide en GaInAsP	0.3	70	10 dBm
[47]	Heinrich-Hertz- Institut	GaInAsP/GaInAs	Adaptateur de mode + gravure en V	0.7	50	
[48]	Fujitsu	GaInAsP/GaInAs	Adaptateur de mode	0.8	45	
[49]	NEC	InAlGaAs/GaInAs	Guide à gradient d'indice	0.96	40	10 mA
[50]	OPTO +	GaInAsP/GaInAs	Deux adaptateurs de mode	0.6	40	11 mA
[51]	OPTO +	GaInAsP/GaInAs	Guide dilué + couche d'adaptation + face gravée	0.73	47	16 mA
[52]	University of Texas	GaInAsP/GaInAs	Guide dilué et deux couches d'adaptation	1.02	48	11 mA

 Tableau II-3 : Etat de l'art des photodiodes évanescentes

#### 1.5. Cahier des charges d'une photodiode dédiée à la fonction sommation

Le cahier des charges des photodiodes utilisées pour la fonction sommation est le suivant :

- une bande passante égale à 20 GHz (bande Ku)
- un coefficient de réponse élevé (combiné à une longueur d'absorption la plus courte possible)
- un fonctionnement linéaire sous forte illumination afin d'augmenter le nombre de voies à sommer
- un faible courant de fuite (diminution du bruit de grenaille)
- un faible coût (module de couplage)
- la fiabilité, soit la reproductibilité et la stabilité dans le temps des performances

Les photodiodes évanescentes répondent à ces différents critères et nous allons désormais présenter les modélisations optiques et électriques réalisées ainsi que les différentes topologies de sommateur à 2,4 et 8 voies envisagées.

# 2. Etude d'une photodiode évanescente : application à la fonction de sommation

La solution en optique intégrée consiste donc à réaliser un circuit optoélectronique constitué d'une photodiode PIN couplée par onde évanescente à différents guides optiques distincts de largeur  $4\mu$ m. Il faut ainsi trouver un compromis entre les pertes optiques dues aux longueurs totales des guides, celles dues aux rayons de courbure des trajets des guides (la face d'entrée du composant étudié présentera un écartement interguide compatible avec celui d'un ruban de fibres), le rendement quantique de la photodiode, sa fréquence de coupure ainsi que le nombre de voies sommables proportionnel à sa surface, comme le montre la figure II-13. Il s'agit également de déterminer la distance d, séparant deux guides optiques, nécessaire afin d'éviter le couplage entre les guides et par suite le mélange des ondes optiques.

#### Modélisation du sommateur opto-hyperfréquence en optique intégrée





# 2.1. Limitations fréquentielles : application à la fonction de sommation

Les deux principales grandeurs à définir lors de la conception électrique d'une photodiode sont l'épaisseur de la zone intrinsèque et la surface active de la photodiode ; ces 2 valeurs étant, comme nous l'avons mentionné précédemment, intimement liées au coefficient de réponse et à la fréquence de coupure  $f_{.3dB}$ .

Dans le cas du sommateur, nous cherchons à avoir la surface de photodiode la plus grande possible, proportionnelle aux nombres de voies à sommer, associée à la fréquence de coupure  $f_{.3dB}$  visée (20 GHz). Comme nous l'avons vu dans le paragraphe 1.3.3.3, la surface S de la photodiode peut s'exprimer par :

$$S = \frac{W}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r (R_s + R_c)} \sqrt{\frac{1}{f_{-3dB}^2} - \left(\frac{2\pi W}{3.5\bar{v}}\right)^2} \quad (21)$$

Nous avons tracé sur la figure II-14 l'évolution de la surface S en fonction de l'épaisseur de zone absorbante W pour une fréquence de coupure de 20GHz.



**Figure II-14 :** Evolution de la surface de la photodiode en fonction de l'épaisseur de zone intrinsèque W pour  $f_{-3dB} = 20$ GHz

Pour une application à 20GHz, la surface maximale de la photodiode, proportionnelle aux nombres de voies à sommer, est donc égale à  $800\mu m^2$  associée à une épaisseur de zone déserte appartenant à l'intervalle [0,9µm; 1.15µm].

#### 2.2. Modélisation optique

La structure a été optimisée à l'aide d'un logiciel de BPM 3D réalisé dans le groupe Optoélectronique [7] et en illuminant le guide d'entrée de la photodiode évanescente, de largeur 4µm, par les modes TE et TM de la structure préalablement simulés.

# 2.2.1. Paramètres à optimiser

Les paramètres de la photodiode évanescente à optimiser, représentés sur la figure II-15, sont :

- l'épaisseur de zone intrinsèque W en GaInAs
- la longueur L de la photodiode

- l'épaisseur, le type de matériau ainsi que la longueur d'adaptation M définissant la couche d'adaptation optique dopée N
- l'épaisseur h de la couche de confinement supérieur en InP du guide
- l'épaisseur et le type de quaternaire GaInAsP pour définir le cœur du guide



## Figure II-15 : Paramètres à optimiser de la photodiode évanescente

Ces paramètres à optimiser doivent répondre aux caractéristiques exigées, à savoir :

- un rendement quantique interne élevé à la longueur d'onde 1.55µm liée à une longueur de photodiode L la plus courte possible
- une insensibilité à la polarisation optique (TE et TM)

# 2.2.2. Rendement quantique

Les différents paramètres à optimiser étant interdépendants, nous présenterons l'influence de chacun de ces paramètres sur le rendement quantique interne de la structure optimisée finale.

#### 2.2.2.1. Epaisseur de zone intrinsèque

Le couplage évanescent est basé sur le principe en partie analogue au couplage optique de proximité qui permet de transférer un faisceau optique d'un guide passif à un autre. Dans le cas d'un couplage évanescent, le transfert a lieu, non pas entre deux guides distincts, mais au sein d'un même guide entre deux couches de matériaux d'indices élevés séparées par une

couche d'indice moindre. En effet le détecteur « posé » sur les guides peut être assimilé lui aussi à un guide. Ce dernier est constitué, comme les guides, de trois couches principales de matériaux dont l'une d'indice optique plus fort constitue le cœur. Cette couche est en plus absorbante dans ce cas. Au niveau du détecteur, nous nous trouvons donc en présence de deux couches pouvant interagir entre elles, séparées par une troisième constituée de matériau de plus faible indice. Il s'agit donc d'un transfert vertical, alors que le couplage de proximité est horizontal.

L'onde propagée à travers le guide est ainsi attirée par évanescence dans le cœur du détecteur où elle est absorbée. Ce phénomène se produit quelle que soit la longueur de mise en relation de ces deux couches, mais plus cette longueur est importante plus l'onde guidée sera absorbée. Il est à noter que la couche absorbante ne doit pas nécessairement être en contact direct avec la couche guidante pour observer un couplage évanescent. Son efficacité sera simplement inversement proportionnelle à l'éloignement de ces deux couches comme dans le cas du couplage de proximité.

Sur la figure II-16, nous avons tracé l'évolution du rendement quantique interne en fonction de l'épaisseur de zone intrinsèque pour une longueur de photodiode de 50µm.



**Figure II-16 :** Evolution du rendement quantique  $\eta_{int}$  en fonction de l'épaisseur de zone intrinsèque W pour une longueur de photodiode de 50 $\mu$ m

Les simulations effectuées en mode TE et TM montrent ainsi qu'il existe des valeurs discrètes pour l'épaisseur de zone déserte (0.2; 0.6 et 1.1µm) pour lesquelles le rendement quantique

interne  $\eta_{int}$  passe par un maximum pour une longueur de photodiode de 50µm. Ce caractère oscillatoire du rendement quantique en fonction de l'épaisseur de la zone absorbante est dû à l'apparition de modes successifs dans le guide superficiel constitué par les trois couches P-I-N [53].

#### 2.2.2.2. Compromis coefficient de réponse / surface maximale

Nous allons déterminer dans ce paragraphe l'épaisseur de zone intrinsèque W permettant de résoudre le compromis entre un coefficient de réponse élevé et une surface de photodiode maximale associée à une fréquence de coupure f<sub>-3dB</sub> égale à 20 GHz. Nous avons reporté les courbes issues des figures II-14 et II-16 et nous avons tracé sur la figure II-17 l'évolution du rendement quantique interne et de la surface de photodiode associée à une bande passante de 20GHz en fonction de l'épaisseur de zone intrinsèque W.



**Figure II-17 :** Evolution du rendement quantique  $\eta_{int}$  et de la surface de photodiode associée à une fréquence de coupure de 20 GHz en fonction de l'épaisseur de zone intrinsèque W

Nous pouvons remarquer sur la figure II-17 que pour une épaisseur de 1.1 $\mu$ m de zone intrinsèque appartenant à l'intervalle [0,9 $\mu$ m-1.15 $\mu$ m], nous obtenons une bonne corrélation entre la surface maximale associée à une fréquence de coupure égale à 20 GHz et le rendement quantique interne  $\eta_{int}$  de l'ordre de 90% (injection des modes TE et TM).

# 2.2.2.3. Longueur de photodiode

Le nombre de voies à sommer étant proportionnel à la largeur de la photodiode, comme l'illustre la figure II-18, nous devons trouver une structure de photodiode évanescente présentant un rendement quantique élevé combiné à une longueur d'absorption la plus courte possible.



Figure II-18 : Illustration du compromis surface - nombre de guides

Nous avons ainsi cherché la longueur de photodiode L la plus courte possible permettant d'obtenir un rendement quantique interne élevé et fixé à 90%. La figure II-19 représente l'évolution du rendement quantique interne en fonction de la longueur de la photodiode L pour l'épaisseur de zone intrinsèque définie précédemment  $(1.1\mu m)$ .



**Figure II-19 :** Evolution du rendement quantique  $\eta_{int}$  en fonction de la longueur de photodiode pour une épaisseur de zone intrinsèque W égale à  $1.1 \mu m$ 

Nous pouvons remarquer que pour une longueur de  $35\mu m$  associée à une épaisseur de zone intrinsèque égale à  $1.1\mu m$ , nous obtenons un rendement quantique interne de l'ordre de 90% pour les polarisations TE et TM.

La surface maximale admissible étant égale à  $800\mu m^2$  pour 20 GHz, nous pouvons en déduire que la largeur maximale correspondante est 22.85 $\mu m$ . Cette largeur, comme l'illustre la figure II-18, correspond à :

$$l \arg eur = n * l \arg eur_{guide} + (n-1) * \acute{ecartement}_{int \ erguide}$$
(22)

avec n le nombre de guides et largeur<sub>guide</sub> égale à  $4\mu$ m. Cette largeur maximale détermine donc, selon l'écartement entre les guides nécessaire, le nombre de voies sommables, comme nous le verrons dans le paragraphe B.3.2.

La figure II-20 montre la propagation de la lumière dans le guide d'entrée et sous la photodiode (Z=longueur de propagation sous la photodiode) pour la polarisation TM.



Figure II-20 : Profil du champ BPM 3D, vu en coupe pour un Z donné

Nous pouvons remarquer sur la figure II-20(e) que la majorité de la lumière a été absorbée au bout de 35µm de photodiode, ce qui confirme le rendement quantique interne de 90% calculé.

## 2.2.2.4. Influence de la couche dopée N

Nous étudions dans ce paragraphe l'influence d'une couche d'adaptation optique sur le transfert de l'énergie optique entre le guide et la zone absorbante [43-54-55]. Nous avons ainsi analysé l'influence du matériau définissant la couche N (figure II-21(a)), de son épaisseur (figure II-21(b)) et de la longueur d'adaptation M (figure II-21(c)) sur le rendement quantique interne.



**Figure II-21 :** Influence de la couche dopée N (matériau, épaisseur et longueur d'adaptation) sur le rendement quantique interne

A la lumière de ces résultats, nous avons choisi un quaternaire GaInAsP de gap  $\lambda_g$ =1.3µm dopé N à 1\*10<sup>18</sup> at/cm<sup>3</sup>, d'épaisseur égale à 0.4µm et possédant une longueur d'adaptation M nulle, afin de conjuguer un contact N de bonne qualité et un rendement quantique élevé. Une étude [56] a en effet démontré qu'il était possible de réaliser des contacts ohmiques sur GaInAsP aux qualités sensiblement équivalentes à celles du GaInAs.

# 2.2.2.5. Epaisseur du ruban du guide

Nous allons déterminer dans ce paragraphe l'épaisseur (h) du ruban du guide défini en InP, illustré figure II-22(c), qui est le résultat d'un compromis entre les pertes optiques et le rendement quantique interne. En effet plus le ruban du guide sera épais, plus les pertes seront faibles mais, inversement, moins le rendement quantique interne sera élevé.

La figure suivante montre l'évolution du rendement quantique interne de la photodiode (figure II-22(a)) et des pertes optiques (comprenant les pertes de couplage et de propagation) sur 2mm (figure II-22(b)) en fonction de l'épaisseur h du ruban du guide.



(c) Vue par la tranche de la structure du guide

Figure II-22 : Influence de l'épaisseur du ruban sur le rendement quantique  $\eta_{int}$  et sur les pertes optiques des guides

Afin d'obtenir le nombre de voies sommables le plus grand, nous avons choisi le parti d'étudier l'absorption maximale sur une longueur d'absorption minimale. Nous avons donc décidé au vu des courbes obtenues de prendre une épaisseur du ruban de guide égale à 0.3µm. Pour cette épaisseur de ruban, nous obtenons un rendement quantique interne de 90% combiné à des pertes optiques (comprenant les pertes de couplage et de propagation) égales à 2.5dB pour 2mm. Cependant ces pertes risquent d'être plus importantes du fait de la rugosité des flancs du guide liée à la technologie de gravure.

#### 2.2.3. Guides droits

Les pertes de couplage seront optimisées de manière à être compatibles avec des fibres lentillées. Ce guide devra être monomode et indépendant à la polarisation TE/TM. Il est à noter que nous avons optimisé le guide en rapport avec la fonction sommation visée à savoir optimiser la transition guide-photodiode afin d'obtenir la longueur d'absorption minimale assurant un rendement quantique élevé.

Les paramètres déterminants du guide sont l'épaisseur et la nature des couches constituant le cœur du guide et la couche de confinement supérieur. Comme nous l'avons vu précédemment, le guide d'entrée est défini par un ruban en InP de  $0.3\mu$ m afin d'assurer d'une part le confinement latéral du faisceau et d'optimiser d'autre part le couplage entre le guide et la zone absorbante sur une longueur d'absorption minimale. Pour déterminer le type de matériau constituant le cœur du guide, nous avons simulé deux matériaux quaternaires de gap  $\lambda_g=1.15\mu$ m et  $1.3\mu$ m (figure II-23(a)) en prenant  $0.3\mu$ m comme hauteur de ruban. Le confinement vertical est alors assuré par la différence d'indice entre le GaInAsP (cœur) et l'InP (confinement supérieur) (figure II-23(b).



Figure II-23 : Pertes optiques dans un guide droit

A la lumière de ces résultats de modélisation, nous avons choisi une couche fine  $(0.12\mu m)$  de GaInAsP<sub>1.3µm</sub> en cœur de guide afin d'avoir un bon rendement de couplage entre le guide et la fibre lentillée. Nous obtenons ainsi des pertes optiques de l'ordre de 2.5dB pour 2mm, comprenant les pertes de couplage (de l'ordre de 2dB) et de propagation (de l'ordre de 0.5dB/mm).

La figure II-24 illustre le profil du champ électromagnétique des modes TE et TM du guide optique.



Figure II-24 : Profil du champ électromagnétique : (a) mode TE – (b) mode TM

# 2.2.4. Désalignement guide-photodiode

L'alignement des guides optiques devant la photodiode ne se faisant pas de manière autoalignée, cette étape pourrait s'avérer critique lors de la réalisation technologique. Nous avons donc étudié sur la figure II-25(a) l'influence d'un désalignement sur le rendement quantique interne du photodétecteur.



**Figure II-25 :** Influence d'un désalignement entre le guide et la photodiode sur le rendement quantique interne

Un décalage de  $1.5\mu m$ , illustré figure II-25(b), entraîne ainsi une diminution de 15% du rendement quantique  $\eta_{int}$ . Cette étape sera réalisée à l'aide du masqueur électronique permettant un alignement précis (<0.1 $\mu$ m).

# 2.2.5. Structure de l'épitaxie optimisée

La structure épitaxiale, optimisée par BPM3D, est illustré figure II-26 où l'on retrouve les résultats des différentes études présentées auparavant. Cette épitaxie représente la structure classique d'une photodiode P (InP) – I (GaInAs) – N (GaInAsP) surmontant un guide non dopé constitué d'un cœur en GaInAsP<sub>1.3µm</sub> et d'un ruban en InP.

#### Modélisation du sommateur opto-hyperfréquence en optique intégrée



Figure II-26 : Design de la photodiode évanescente optimisée

La photodiode à couplage évanescent optimisée, de longueur  $35\mu m$  et de largeur  $4\mu m$ , est donc constituée de :

- un guide d'onde monomode de cœur en quaternaire GaInAsP<sub>1.3µm</sub> d'épaisseur 0.12µm et d'un ruban en InP d'épaisseur 0.3µm
- une couche d'adaptation optique dopée N définie en GaInAsP<sub>1.3µm</sub> d'épaisseur 0.4µm
- une couche absorbante I en GaInAs d'épaisseur 1.1µm
- une couche de type P définie en InP jouant également le rôle de couche d'espacement pour éviter l'absorption de la lumière par la métallisation. Une épaisseur de 0.5μm se révèle être suffisante pour éviter l'absorption de la lumière par la métallisation et dans la couche de contact P<sup>+</sup> définie en GaInAs et d'épaisseur 0.1μm.

La photodiode évanescente, optimisée par BPM 3D, est donc insensible à la polarisation et possède un rendement quantique interne de 90% en mode TE et TM, combiné à des pertes optiques du guide égales à 2.5dB pour 2mm (comprenant les pertes de couplage de l'ordre de 2dB et de propagation de l'ordre de 0.5dB/mm).

# B. Etude du sommateur opto-hyperfréquence

# 1. Structure guidante

La partie passive du sommateur opto-hyperfréquence est constituée de guides droits et de guides courbes. L'écartement entre les guides décroît entre la face d'entrée (côté fibres optiques - face clivée du wafer) et la zone d'arrivée sur le détecteur. Ainsi une solution pour le sommateur à 2 voies consiste à utiliser des guides courbes de largeurs 4 µm couplés à une seule photodiode et espacés de 250µm du côté des fibres (espace inter-fibre d'un ruban) et de la distance d du côté du détecteur, comme illustré sur la figure II-27.



Figure II-27 : Illustration d'un sommateur à 2 voies

L'objectif de ce paragraphe est de déterminer les caractéristiques des guides courbes d'entrée.

Les caractéristiques exigées sont :

- des pertes liées à la courbure les faibles possibles (BPM 2D)
- un écartement d, nécessaire entre les guides afin d'éviter le couplage de proximité, le plus faible possible afin d'augmenter le nombre de voies sommables
- une indépendance à l'état de polarisation TE/TM de la lumière

# 1.1. Guides courbes

# 1.1.1. Principe

Les guides courbes ont, par nature, des modes en partie guidés et en partie radiatifs. Non guidée, la lumière se propage naturellement en ligne droite. Dans un guide courbe, on fait suivre à une partie de la lumière une trajectoire courbe, mais on ne peut empêcher une certaine proportion de s'échapper du guide. La part guidée est d'autant plus grande que le confinement dans le guide est important et que la courbure est faible (i.e le rayon de courbure est grand). Il existe bien entendu des limites d'utilisation de tels guides en termes de rayon de courbure maximal, au-delà duquel la lumière sera perdue par rayonnement. En fait, il y a deux origines aux pertes lors d'un changement de direction par une courbure : d'une part, les pertes par rayonnement tangentiel (à l'extérieur de la courbure) et d'autre part les pertes de couplage entre le guide linéaire et le guide courbe.

# 1.1.2. Résultats

Nous avons eu recours à un logiciel de BPM 2D [7], uniquement dans le plan horizontal parallèlement à la couche guidante pour simuler la propagation de la lumière dans les guides courbes. Nous illuminons le guide courbe par les modes TE et TM du guide droit préalablement simulé.

Nous simulons en fait des guides en S constitués de deux guides courbes et de deux guides droits en entrée et en sortie de ceux-ci (figure II-28(a)). Nous avons optimisé le rapport entre la longueur et la hauteur de courbure afin d'obtenir des pertes optiques dues à la courbure les plus faibles possibles (figure II-28(b)).



Figure II-28 : Pertes dans les guides courbes

L'évolution des pertes optiques en fonction de ce rapport nous montre qu'il faut un rapport au moins égal à 10 entre la longueur et la hauteur de courbure afin de diminuer les pertes optiques dues à la courbure (<1dB).

Le tableau II-4 regroupe quelques exemples de hauteurs de courbure et de longueurs associées nécessaires pour réaliser les sommateurs à N voies. Ces valeurs sont imposées en entrée par le diamètre des fibres optiques et en sortie par l'écartement minimal d entre deux guides optiques, calculé dans le paragraphe 1.2, pour éviter le mélange des voies.

Hauteur de courbure (µm)	Longueur de courbure (µm)	Pertes (dB)
114	1449	0.2
123	1563	0.3
303	4333	0.56
339	4307	0.7

Tableau II-4: Valeurs des hauteurs et des longueurs de courbures requises pour nos structures

A cette longueur de courbure, il faut rajouter les longueurs des guides droits en entrée et sortie pour obtenir la longueur totale de chaque guide. Les guides droits sont indispensables afin de stabiliser la propagation du mode optique en entrée, après l'injection de la lumière à l'aide de la fibre optique, et en sortie, après la courbure, pour permettre la réalisation du couplage entre le guide et la zone absorbante dans les meilleures conditions. Nous avons pris dans notre cas des longueurs de guides droits d'environ 500µm en entrée et en sortie. Cependant les simulations ne prennent pas en compte les phénomènes de diffusion surfacique. La diffusion surfacique est due à la rugosité des surfaces délimitant le guide et issue du procédé de fabrication. Dans la structure de guide droit, le mode s'y propageant est très proche des flancs du guide mais sans être en contact direct avec ceux-ci. Lors du passage de la lumière dans la courbure, le mode ne s'adapte pas instantanément à la courbure et se rapproche de l'un des bords du guide, entraînant des pertes par diffusion surfacique. Les pertes sont donc essentiellement dues aux phénomènes de réfraction et de diffusion surfacique.

#### **1.2. Ecartement entre les guides**

La réalisation d'un sommateur opto-microondes effectuant la somme des signaux hyperfréquences modulant chaque porteuse optique détectée nécessite la décorrélation totale des faisceaux optiques d'entrée, évitant ainsi le couplage optique de proximité.

## 1.2.1. Principe

Pour expliciter ce phénomène, prenons le cas simple de deux guides identiques monomodes. Si la distance les séparant devient suffisamment faible pour qu'ils se couplent, la propagation devient alors bimodale.

La figure II-29 illustre le phénomène de couplage de modes.





Au début du couplage, l'énergie optique est maximale dans le guide supérieur de la figure (les deux modes s'ajoutent) et nul dans le guide inférieur (les deux modes s'annihilent).

Sachant que la vitesse de propagation d'une onde électromagnétique dans un milieu solide est fonction de sa constante de propagation, et puisque les vitesses de propagation des deux modes dans la zone d'interaction sont différentes, les deux modes vont se déphaser au cours de la propagation. Au bout d'une certaine distance de propagation, le déphasage entre les deux modes sera de  $\pi$  radians, nous nous trouverons ainsi dans le cas inverse, i.e avec un maximum de lumière dans le guide inférieur. La distance au bout de laquelle ce déphasage est atteint correspond à la longueur de couplage L<sub>c</sub>.

En plus de leur indice, la condition de transfert entre deux guides dépend de leur écartement et de la nature de la zone intermédiaire entre les guides. En effet plus ils seront éloignés, moins ils interagiront, et plus la longueur de couplage sera grande (dans le cas limite d'un très grand écartement il n'y aura aucun couplage). De même cette longueur augmente lorsque la différence d'indice entre les guides et la zone adjacente augmente puisque cela signifie que l'onde optique qu'ils transportent y est plus confinée et s'étale donc moins jusqu'au guide voisin.

#### 1.2.2. Résultats

Nous avons eu recours à la BPM à 2 dimensions afin de déterminer l'écartement nécessaire d entre deux guides afin d'éviter le mélange des ondes optiques, comme illustré sur la figure II-30. Cet écart entre deux guides doit être le plus faible possible car comme nous l'avons vu dans le paragraphe A.2.2.2.3 la largeur maximale de la photodiode détermine, selon l'écartement entre les guides nécessaire, le nombre de voies sommables.





94

La figure II-31 représente l'évolution de la puissance optique couplée dans le 2<sup>ème</sup> guide en fonction de l'écartement entre le guide éclairé et ce 2<sup>ème</sup> guide.





Les simulations, effectuées en mode TE et TM, montrent que 5µm représente l'écartement minimum permettant d'éviter les problèmes d'hétérodynage optique.

# **1.3. Conclusions**

Les caractéristiques prévues de nos guides d'entrée (droits et courbes) sont les suivantes :

- des pertes optiques de l'ordre de 2.5dB pour un guide droit de 2mm (comprenant les pertes de couplage de l'ordre de 2dB et de propagation de l'ordre de 0.5dB/mm)
- des pertes de courbure inférieures à 1dB
- un écartement d entre les guides égal à 5µm évitant le couplage de proximité entre deux guides
- une indépendance à l'état de polarisation TE/TM

# 2. Conception complète du sommateur optimisé

La conception de la structure finale optimisée par BPM à deux et trois dimensions est illustrée figure II-32.



Figure II-32 : Dessin complet du sommateur à 2 voies

Ce sommateur à 2 voies est constitué de deux guides optiques de largeurs 4 $\mu$ m espacés d'une distance minimale de 5 $\mu$ m et surmontés d'une photodiode PIN de longueur 35 $\mu$ m et d'épaisseur de couche intrinsèque égale à 1.1 $\mu$ m. Le contact N est déporté de 5 $\mu$ m par rapport au ruban P-I de la photodiode et repose sur la couche en GaInAsP<sub>1.3 $\mu$ m</sub> dopée N. Pour nos structures, nous avons fait varier l'écartement entre les guides de 0 $\mu$ m à 20 $\mu$ m afin de voir l'influence du couplage entre deux guides sur les caractéristiques de sommation.

Le sommateur optimisé possède les caractéristiques optiques suivantes :

- Insensibilité à la polarisation
- Rendement quantique pour chaque voie égal à 90%
- Pertes optiques des guides droits de 2.5dB sur 2mm (comprenant les pertes de couplage de l'ordre de 2dB et de propagation de l'ordre de 0.5dB/mm)
- Pas de couplage de proximité pour un écartement entre les guides supérieur à 5µm

Nous allons étudier par la suite le compromis bande passante-nombre de voies sommables.

# 3. Géométries de sommateur envisagées

Nous présentons dans cette partie les différentes géométries de sommateur à 2, 4 et 8 voies envisagées pour l'application visée (20GHz).

### 3.1. Topologies

Différentes topologies ont été proposées pour réaliser les sommateurs opto-hyperfréquences et sont représentées figure II-33.



Figure II-33 : Topologies du sommateur envisagées dans le cas du sommateur à 4 voies

La topologie 1 consiste à coupler N guides courbes de largeur  $4\mu m$  à une seule photodiode PIN.

La topologie 2 est constituée de N blocs guide-photodiode et permet une décorrélation totale des signaux. Il s'agit ainsi de coupler N guides courbes à N rubans P-I de photodiode. Les N contacts P seront ensuite reliés entre eux lors de l'étape de reprise des contacts. La gravure

interruban P-I jusqu'à la zone N permet de diminuer la capacité de la photodiode et par suite d'augmenter le nombre de voies. Sur ces composants, les guides sont continués en sortie de photodiodes et sont surmontés en leur extrémité d'une structure d'absorption supplémentaire dans le but d'absorber une puissance optique résiduelle qui pourrait encore exister et perturber les autres signaux d'entrée.

La topologie 3 consiste à coupler N guides courbes à N/2 photodiodes PIN. Dans cette configuration, il existe un risque de mélange des ondes optiques du fait de l'illumination de chaque détecteur par les deux extrémités. Son influence sera déterminée par comparaison avec la topologie 2.

#### 3.2. Nombre de voies sommables selon les topologies

## **3.2.1.** Expression des capacités selon les topologies

Nous avons évalué le nombre N de voies sommables selon les topologies en calculant les capacités de chacune d'elles en fonction du nombre de guides éclairés. Le tableau II-5 regroupe la définition des capacités de la photodiode globale réalisée sur substrat semi-isolant pour les différentes topologies envisagées.

Topologie		Définition des capacités				
	t		$N\frac{\varepsilon_0\varepsilon_rS}{W} + (N-1)\frac{\varepsilon_0\varepsilon}{W}$	$\frac{rS'}{7}$ (23)		
2		$N\frac{\varepsilon_0\varepsilon_r S}{W} + (N-1)\frac{\varepsilon_0 S'}{e'}  (24)$				
3		$\left(\frac{N}{2}\right)\frac{\varepsilon_{0}\varepsilon_{r}S}{W} + \left(\frac{N}{2} - 1\right)\frac{\varepsilon_{0}S'}{e'}  (25)$				
- W (μm)	e' (µm)	ɛ <sub>r</sub> [16] (GaInAs)	S	S'		
1.1	2.2	13.4	Longueur PIN* largeur PIN	Longueur PIN* distance interguide d		

Tableau II-5 : Expression des capacités pour les 3 topologies sur substrat semi-isolant

avec N le nombre de voies,  $\varepsilon_r$  la permittivité relative du matériau absorbant (GaInAs),  $\varepsilon_0$  la permittivité de l'air, W et e' respectivement l'épaisseur de la zone intrinsèque et la hauteur

d'un ruban P-I, S la surface d'une photodiode élémentaire avec longueur PIN =  $35\mu m$  et largeur PIN =  $4\mu m$ , et S' la surface de la zone située entre deux photodiodes élémentaires.

Les capacités calculées sont exprimées en fonction du nombre de voies N et selon les configurations, la zone située entre deux photodiodes élémentaires  $(35*4\mu m^2)$  est gravée (topologies 2 et 3) ou non (topologie 1).

Le tableau II-6 regroupe les valeurs des capacités d'une diode élémentaire et de la zone interphotodiodes pour les trois topologies.

diode élémentaire (35*4µm²) (fF)	interguide (3	5*5µm²) (fF)
	topologie 1	topologie 2 et 3
15	18	0.7

**Tableau II-6 :** Comparaison entre les valeurs des capacités selon les topologies

Nous remarquons que la capacité due à la zone située entre deux photodiodes élémentaires est égale à 18fF pour la topologie 1 et à 0.7fF pour les topologies 2 et 3. Cette capacité parasite due au pont à air devient donc négligeable devant la capacité due à la photodiode élémentaire (environ 15fF) pour un écartement de 5µm. La gravure interruban P-I jusqu'à la zone N, dans le cas des topologies 2 et 3, permet donc de diminuer la capacité de la photodiode et par suite d'augmenter le nombre de voies pour la bande passante visée de 20GHz.

Afin de faciliter la compréhension des calculs de capacité, nous avons illustré sur la figure II-34 la vue par la tranche des topologies 1,2 et 3.



**Figure II-34 :** Vue par la tranche des topologies 1,2 et 3
Pour souci de simplicité, nous avons représenté sur le même schéma (figure II-34(b)) les topologies 2 et 3. Il est cependant à noter que ce dessin est inexact dans les 2 cas, en effet dans le cas de la topologie 2, le 2<sup>ème</sup> guide se situe à l'autre extrémité de la 2<sup>ème</sup> photodiode (ce qui est aussi vrai pour une photodiode unique de la topologie 1 représentée figure II-34(a)) et dans le cas de la topologie 3 nous n'avons pas représenté également les deux autres guides éclairant les deux photodiodes par l'autre côté. La figure II-34(b) représente donc un sommateur à 2 et 4 voies pour respectivement les topologies 2 et 3.

# 3.2.2. Nombre de voies sommables pour la structure optimisée

A l'aide des équations (23)-(24)-(25), et en tenant compte de la fréquence de coupure  $f_t$  liée au temps de transit, nous avons tracé sur la figure II-35 l'évolution de la fréquence de coupure  $f_{.3dB}$  en fonction du nombre de voies N pour les 3 topologies envisagées pour un écartement d entre deux guides de 5µm.



**Figure II-35 :** Evolution de la fréquence de coupure  $f_{-3dB}$  en fonction du nombre de voies sommables pour les 3 topologies envisagées et d=5 $\mu$ m

Le tableau II-7 regroupe le nombre de voies sommables envisageables selon les différentes topologies pour une application à 20GHz et un écartement entre les guides de 5µm.

Topologie	1	2	3
Nombre de voies sommables	3	5	10

Tableau II-7 : Nombre de voies sommables selon les topologies pour 20 GHz

Pour l'application envisagée (20GHz), le nombre de voies sommables possible est égal à 3, 5 et 10 pour respectivement les topologies 1,2 et 3. Nous pouvons donc envisager de sommer 10 voies pour une bande de fréquence de 0-20 GHz à l'aide de cette solution en optique intégrée. Cependant dans cette configuration (topologie 3), il existe un risque de mélange des ondes optiques du fait de l'illumination de chaque détecteur par les deux extrémités.

# 3.2.3. Influence de l'écartement sur le nombre de voies sommables

Nous avons également étudié sur la figure II-36 l'influence de l'écartement entre les guides sur la fréquence de coupure  $f_{-3dB}$  en fonction du nombre de voies sommables pour les 3 topologies envisagées. Nous avons ainsi étudié deux cas : l'écartement optimisé par la modélisation au niveau optique (5µm) et un écartement plus important de 20µm.



**Figure II-36 :** Influence de l'écartement entre guides sur la fréquence de coupure  $f_{-3dB}$  en fonction du nombre de voies sommables pour les 3 topologies envisagées

Comme le laissaient présager les équations (23)-(24)-(25), la valeur prise pour définir l'écartement entre les guides, définissant la capacité parasite due au pont à air pour les topologies 2 et 3, influe peu sur les fréquences de coupure de celles-ci contrairement à la topologie 1.

Le tableau II-8 regroupe les fréquences de coupure pouvant être atteintes pour le nombre de voies envisagé précédemment selon les différentes topologies pour des écartement entre les guides de 5µm et 20µm.

Topologie				2		3
Ecartement d (µm)	5	20	5	20	5	20
Nombre de voies		3		5	1	0
f. <sub>3dB</sub> (GHz)	20.6	12.1	21.2	20.3	21.2	20.3

**Tableau II-8 :** Influence de l'écartement entre les guides sur la fréquence de coupure  $f_{.3dB}$ pour le nombre de voies envisagées précédemment selon les différentes topologies

Nous remarquons que pour le même nombre de voies envisagé précédemment nous obtenons désormais des fréquence de coupure de 12.1 et 20.3 GHz pour respectivement les topologies 1, et 2-3.

Pour la réalisation des sommateurs opto-hyperfréquences dans les cas des topologies 2 et 3, nous avons décidé d'augmenter la distance séparant deux guides optiques afin d'éviter tout mélange optique nuisible à la fonction sommation. Nous prendrons donc par la suite un écartement entre les guides égal à 20µm pour les topologies 2 et 3. Dans la suite de cette étude, nous avons également décidé de concevoir des sommateurs à 2 voies (pour les 3 topologies), à 4 et à 8 voies (pour les topologies 2 et 3).

Le tableau II-9 regroupe les fréquences de coupure envisageables pour un nombre de voies égal à 2, 4 et 8 voies selon les différentes topologies et pour un écartement entre les guides de  $20\mu m$ .

Topologie	1		2			3	
Nombre de voies	2	2	4	8	2	4	8
f <sub>.3dB</sub> (GHz)	18.4	25.7	22.2	15.5	26.8	25.7	22.2

**Tableau II-9 :** Evolution de la fréquence de coupure  $f_{-3dB}$  selon le nombre de voies envisagées et pour les 3 topologies réalisées pour un écartement égal à 20 $\mu$ m

# **3.2.4.** Cas du substrat dopé N<sup>+</sup>

Par souci de simplicité lors de la réalisation technologique, nous avons également été amené à réaliser les sommateurs sur substrat  $N^+$ , comme nous le présenterons dans le chapitre 3. Cependant, dans ce cas, le plot d'épaississement de déport du contact P doit reposer sur un plot isolé du substrat afin d'éviter un court-circuit, comme illustré sur la figure II-37. Nous avons donc étudié l'effet de la capacité parasite due à ce plot de déport sur les fréquences de coupure des différents composants correspondant aux topologies présentées précédemment pour un écartement entre les guides de  $20\mu m$ .

D'un point de vue de la réalisation technologique, et comme nous le présenterons dans le chapitre 3, nous avons choisi de déposer un plot en résine SU8 [57] pour le report du plot de connexion.



**Figure II-37 :** Design d'un sommateur à 2 voies réalisé sur substrat dopé N<sup>+</sup> (topologie 2)

Au calcul des capacités sur semi-isolant du tableau, il faut donc rajouter la capacité parasite due à ce plot de déport en SU8 égale :

$$C_{plot} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r^* S^*}{e^*}$$
(26)

avec  $\varepsilon_r^{"}$  la permittivité relative de la résine SU8 définissant le plot (2.79) [57],  $S^{"}$  la surface du plot d'épaississement P reposant sur le plot SU8 (25700 $\mu$ m<sup>2</sup>) et  $e^{"}$  l'épaisseur du plot de déport en SU8 (2.8 $\mu$ m).

Cette capacité parasite, égale à 226fF, est prédominante devant la capacité intrinsèque de la photodiode et va donc grandement diminuer la fréquence de coupure.

A l'aide des équations (23)-(24)-(25), et en tenant compte de la capacité parasite due au plot de report du contact P (26), nous avons tracé sur la figure II-38 l'évolution de la fréquence de coupure  $f_{-3dB}$  en fonction du nombre de voies N pour les 3 topologies envisagées et pour un écartement d entre deux guides de 20µm, ceci pour des photodiodes élémentaires de surface  $35*4\mu m^2$  sur substrat dopé N<sup>+</sup>.



**Figure II-38 :** Evolution de la fréquence de coupure  $f_{.3dB}$  en fonction du nombre de voies sommables pour les 3 topologies envisagées et d=20µm sur substrat dopé N<sup>+</sup>

Les fréquences de coupure, calculées sur substrat  $N^+$ , en fonction du nombre de voies (2, 4 et 8) et des 3 topologies sont récapitulées dans le tableau II-10.

Topologie	1		2			3	
Nombre de voies	2	2	4	8	2	4	8
f <sub>-3dB</sub> (GHz)	7.7	9.6	8.5	7	10.2	9.6	8.5

**Tableau II-10 :** Evolution de la fréquence de coupure  $f_{-3dB}$  selon le nombre de voiesenvisagées et pour les 3 topologies réalisées sur substrat dopé  $N^+$ 

Sur substrat dopé  $N^+$ , et pour un écartement entre les guides de 20µm, les fréquences de coupure sont désormais inférieures ou égales à 10 GHz pour le nombre de voies envisagé. La capacité parasite due au plot de déport du contact P a ainsi divisé par plus de 2 la fréquence de coupure.

# Remarque

Nous n'avons pas optimisé le calcul des fréquences de coupure sur substrat dopé N, en effet nous avons utilisé les mêmes masques lors de la réalisation technologique que ceux sur semiisolant, ce qui explique une surface de plot SU8 égale à  $25700\mu m^2$ . En prenant une surface plus petite, par exemple  $2500\mu m^2$ , la capacité parasite due à ce plot serait égale à 22fF (au lieu de 226fF actuellement), et par suite la fréquence de coupure serait augmentée. L'influence d'une surface de plot égale à  $2500\mu m^2$  sur les fréquences de coupure calculées dans le tableau II-10 est illustrée dans le tableau II-11.

Topologie	1		2			3	
Nombre de voies	2	2	4	8	2	4	8
f <sub>-3dB</sub> (GHz)	16.5	23.6	19.9	14	25.3	23.6	19.9

**Tableau II-11 :** Evolution de la fréquence de coupure f.3dB selon le nombre de voiesenvisagées et pour les 3 topologies réalisées sur substrat dopé N

La diminution de la surface du plot de report de  $25700\mu m^2$  à  $2500\mu m^2$  permet de doubler la fréquence de coupure. Nous retrouvons ici, à une différence de 2GHz près, les mêmes valeurs de fréquences de coupure que sur substrat semi-isolant (tableau II-9). Un sommateur à 8 voies (topologie 3), possédant une bande passante de 20GHz, est donc aussi envisageable sur substrat dopé N.

### 3.3. Détail des structures envisagées

Dans cette partie, nous présentons en détail les différentes géométries de sommateur à 2, 4 et 8 voies envisagées. Nous donnons ainsi le nom de chaque structure, la topologie à laquelle elle appartient, et nous comparons les fréquences de coupure calculées sur substrat semiisolant et  $N^+$ .

# 3.3.1. Sommateur à 2 voies

26.8

Tous les sommateurs à 2 voies présentés figure II-39, mis à part la structure 11, possèdent des fréquences de coupure sur substrat semi-isolant supérieures à l'application visée (20GHz).

Topologie 3	Structure 1	Topologie 3	Structure 2	
35*	μm²	70*4µm²		
f 3ap (	GHz)	f 2m (GHz)		
Semi-isolant	N <sup>+</sup>	Semi-isolant	N <sup>+</sup>	
26.8	10.2	25.9	9.6	
Topologie 1	Structure 3	Topologie 1	Structure 4	
35*8		35*	11μm <sup>2</sup>	
<u>f.3dB</u>	GHz)	f <sub>-3dB</sub>	(GHz)	
Semi-isolant	N O C	Semi-isolant	N N	
25.9	9.6	24.9	9.3	
Topologie 2	Structure 5	Topologie 1	Structure 11	
35*4μ 35*4μ	m <sup>2</sup> 3μm m <sup>2</sup>		18μm 35*26μm²	
f.3dR (	GHz)	f_3dB	(GHz)	
Semi-isolant	$N^+$	Semi-isolant		
25.9	9.6	19.1	7.8	
Topologie 1	Structure 12			
	35*4µm²			
<b>f</b> <sub>-3dB</sub> (	GHz)			
Semi-isolant	$N^+$			

Figure II-39 : Illustration des sommateurs à 2 voies réalisés et fréquences de coupure associées

10.2

Les mesures du coefficient de réponse sur les structures 1, 2 et 3, en illuminant un seul guide d'entrée, nous permettront d'étudier l'influence de la longueur (35 et 70 $\mu$ m) et de la largeur de la photodiode (4 et 8 $\mu$ m) sur le coefficient de réponse et par suite de valider la longueur d'absorption de 35 $\mu$ m. L'effet de saturation des photodiodes, en fonction de la surface ainsi que de la topologie, devrait être analysé en comparant les courants de saturation des structures 1, 2 et 3 obtenus en illuminant un ou deux guides d'entrée.

Le principe de sommation sera ensuite démontré en mesurant l'évolution du signal en fonction du nombre de guides illuminés (1 ou 2).

En comparant les structures 1 et 2, éclairées par leurs deux extrémités, nous pourrions étudier l'influence de la longueur de la photodiode sur le phénomène de mélange des ondes optiques et quantifier cette raie de mélange par rapport à la raie correspondant au signal sommé. De même la comparaison entre les structures 1 et 3 devrait nous permettre d'appréhender l'effet de l'étalement optique lors de la transition guide-photodiode. En étudiant la structure 12, définissant un coupleur optique 2 vers 1 et donc une configuration d'hétérodynage optique, nous pourrions vérifier l'incidence du mélange des ondes sur la dynamique et de comparer ces résultas avec ceux obtenus pour les structures 1 et 2.

En comparant les structures 3, 4 et 11, nous pourrions quantifier l'écartement minimal nécessaire pour obtenir la séparation des ondes optiques avec respectivement un écart de 0, 3 et 18µm entre les guides optiques.

Toutes ces structures consistent donc à coupler deux guides optiques avec une seule photodiode élémentaire. Il existe cependant un risque de mélange des ondes optiques « sous » la photodiode pour toutes ces structures. L'étude de la structure 5, appartenant à la  $2^{eme}$  topologie, devrait nous permettra de valider le principe de sommation en éclairant deux guides couplés à deux photodiodes élémentaires et d'obtenir une décorrélation totale des faisceaux d'entrée si un écartement de 3µm entre les guides se révèle être suffisant.

### 3.3.2. Sommateur à 4 voies

Tous les sommateurs à 4 voies présentés figure II-40, mis à part la structure 6, possèdent des fréquences de coupure sur substrat semi-isolant supérieures à l'application visée (20GHz).

Topologie mixte 1-3	Structure 6	Topologie 3	Structure 7
35-22	1 μμπ <sup>2</sup>	35	4µm <sup>*</sup> ‡20µm 4µm <sup>*</sup>
f <sub>-3dB</sub> ((	GHz)	f <sub>-3dB</sub> (GHz)	
Semi-isolant	$N^+$	Semi-isolant	N <sup>+</sup>
19.1	7.8	25.7	9.6

Topologie 3	Structure 8	ture 8 Topologie 2 Structu			
70-4	20µm	35	4µm <sup>*</sup> ‡ 20µm 4µm <sup>*</sup> 4µm <sup>*</sup>		
<b>f</b> <sub>-3dB</sub> (	GHz)	f <sub>-3dB</sub> (	(GHz)		
Semi-isolant	N <sup>+</sup>	Semi-isolant	N <sup>+</sup>		
22.4	8.6	22.1	8.6		

Figure II-40 : Illustration des sommateurs à 4 voies réalisés

La structure 9, appartenant à la topologie 2, doit nous permettre de sommer 4 voies en évitant tout couplage de proximité entre les guides espacés de 20µm et tout mélange des ondes optiques sous la photodiode (la sommation se faisant à l'aide de 4 photodiodes élémentaires). Comme nous l'avons indiqué précédemment, il existe un risque de mélange des ondes optiques, sous la photodiode, s'il y a divergence de la lumière lors de la transition guide-photodiode pour la topologie 1 (structure 6), et par l'éclairement par les deux extrémités pour la topologie 3 (structure 7 et 8).

L'étude de ces sommateurs à 4 voies nous permettra donc d'étudier quelle topologie, parmi les trois envisagées, est la plus adaptée pour réaliser la fonction sommation.

### 3.3.3. Sommateur à 8 voies

Les sommateurs à 8 voies, appartenant à la  $3^{eme}$  topologie, permettent d'envisager la réalisation de sommateurs à 8 voies en bande Ku (0-20 GHz).



t. <sub>3dB</sub> (GHz)				
Semi-isolant	N <sup>+</sup>			
20.1	8			

Figure II-41 : Illustration des sommateurs à 8 voies réalisés

La structure 13 doit nous permettre de réaliser la sommation de 8 voies en évitant tout couplage de proximité mais seulement pour une bande passante de 15.5GHz. La structure 14 nous permettra d'étendre la bande passante à 20 GHz avec cependant un risque de mélange des ondes optiques. Enfin la structure 10 possède deux photodiodes en biais et la comparaison

de la sommation des voies 1-5 et 2-6 nous permettra d'observer l'influence des photodiodes en biais sur le mélange des ondes. Pour les structures 10 et 14, nous avons pris la longueur de photodiode maximale, compatible avec la bande passante de 20GHz, afin de diminuer l'influence d'un potentiel effet de mélange des voies optiques dans la configuration « éclairement face à face ».

# 3.3.4. Masque global

La vue globale du masque, utilisé lors de la réalisation technologique, est présentée figure II-42. Cette cellule élémentaire, de 3.2cm par 3.7cm, peut être divisée en quatre parties :

- La partie 1 regroupe les structures 1, 2 et 3 (sommateur à 2 voies) de longueurs 5 et 8mm
- La partie 2 est constituée des structures 4 et 5 (sommateur à 2 voies) et des structures
  6, 7 et 8 (sommateur à 4 voies) de longueurs 5 et 8mm
- La partie 3 regroupe les structures 11 et 12 (sommateur à 2 voies) de longueurs 2mm, la structure 9 (sommateur à 4 voies) de longueurs 5 et 8mm ainsi que la structure 10 (sommateur à 8 voies) de longueurs 8 mm.
- La partie 4 est constituée des structures 13 et 14 (sommateur à 8 voies) de longueurs 1cm.

Les longueurs des structures sont justifiées par les hauteurs de courbure nécessaires pour coupler les fibres optiques aux guides d'entrée et par suite par les longueurs de courbure des guides associées afin d'obtenir de faibles pertes liées à la courbure (<1dB).





Figure II-42 : Vue globale du masque

Le tableau II-12 détaille pour chaque structure leurs longueurs en mm ainsi que le nombre de composants disponibles sur le wafer. 56 composants seront ainsi fabriqués.

N° de la structure	Longueurs (mm)				
	2	5	8	10	
1		2	2		
2		2	2		
3		2	2		
4		2	2		
5		2	2		
6		2	2		
7		2	2		
8		2	2		
9		2	2		
10			4		
11	4				
12	4				
13				4	
14				4	

Tableau II-12 : Détail des structures envisagées

# 4. Effets liés à la conception des sommateurs

# 4.1. Déphasage hyperfréquence

La réalisation d'un sommateur opto-microondes effectuant la somme des signaux hyperfréquences modulant chaque porteuse optique détectée nécessite la sommation en phase des signaux de même amplitude. Cependant du fait des différences de courbure, il existe des différences de chemin optique  $\Delta L$  entre les voies.

Le calcul du déphasage hyperfréquence entre les deux voies, exprimé en radians, en fonction de la différence de chemin optique  $\Delta L$  est le suivant :

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi . n_{InP}.f}{C} \Delta L \quad (27)$$

avec  $n_{InP}\approx 3$ , C la célérité de l'onde dans le vide et f=20GHz.

Nous avons étudié le cas du sommateur à 8 voies (structure 14) qui constitue le cas où la différence de chemin optique est la plus grande. Elle est égale au plus à 15µm entre 2 voies distinctes, ce qui correspond à une différence de phase hyperfréquence égale à 1°. Nous pouvons en conclure que la différence des chemins optiques parcourus est négligeable et ne présente aucune incidence sur la phase hyperfréquence dans le cas de nos structures.

### 4.2. Augmentation de la dynamique

Nous avons étudié l'augmentation de la dynamique d'un sommateur à 2 voies en fonction des différences de pertes optiques entre les voies.

On notera par la suite x comme le rapport entre les photocourants générés Iphi par les deux

voies, soit :  $x = \frac{Iph_2}{Iph_1}$ 

A partir de l'équation (20) du 1<sup>er</sup> chapitre, la dynamique du sommateur à 2 voies par rapport à celle d'une voie peut s'exprimer par :

$$SNR_{2voies} = 10.\log\left[\frac{(1+x)^2}{1+x^2}\right] + SNR_{1voie}$$
 (28)

Le rapport x s'exprime en fonction des pertes optiques Pi des voies (en dB) par :

$$x = 10^{\frac{P_1 - P_2}{10}} \qquad (29)$$

Nous avons tracé sur la figure II-43 l'évolution de l'augmentation de la dynamique pour un sommateur à 2 voies en fonction de la différence de puissance optique entre les deux guides optiques d'entrée.



Figure II-43 : Augmentation de la dynamique par rapport à 1 voie pour un sommateur à 2 voies

Le tableau II-12 regroupe la valeur de l'augmentation de la dynamique pour les 2 voies par rapport à une voie pour différents déséquilibres optiques entre les voies.

déséquilibre optiques entre les 2 voies (dB)	0	1	3	10
Augmentation de la dynamique (dB)	3	2.95	2.55	0.8

Tableau II-12 : Gain en dynamique en fonction des pertes optiques entre les 2 voies

Nous pouvons en conclure que, quel que soit le déséquilibre entre les voies au niveau des pertes optiques, nous obtenons une augmentation de la dynamique pour 2 voies sommées par rapport à une voie, contrairement à la sommation en hyperfréquence. Ceci indique que même si les pertes optiques ne sont pas les mêmes selon les guides optiques et par suite les photocourants générés associés, nous obtenons quand même un gain de la dynamique pour les 2 voies sommées par rapport à une seule voie. Nous avons ainsi un gain de 3, 2.95 et 0.8dB pour respectivement une différence de pertes optiques égale à 0, 1 et 10 dB.

A la lumière des résultats de modélisation sur les guides courbes regroupés dans le tableau II-4, la différence de pertes optiques entre les guides présentant les différences de courbure les plus importantes prévues est égale à 0.5dB, qui équivaut à un gain en dynamique de 3dB. Cependant si le couplage fibre-guide n'est pas le même pour les 2 voies, la différence de pertes optiques va augmenter et par suite l'augmentation de la dynamique sera moindre.

# **C.** Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la solution en optique intégrée que nous proposons pour réaliser la fonction de sommation microonde et permettant de concilier simultanément une bande passante élevée, une décorrélation totale des signaux optiques ainsi qu'une puissance de sortie élevée. Elle consiste à réaliser un circuit intégré micro-optoélectronique constitué d'une photodiode PIN couplée par ondes évanescentes à N guides optiques.

Le sommateur optimisé répond aux différents critères du cahier des charges pour réaliser la fonction sommation et possède les caractéristiques optiques suivantes :

- Insensibilité à la polarisation
- Rendement quantique interne pour chaque voie égal à 90% pour une photodiode de surface 35\*4µm<sup>2</sup>
- Isolation optique des voies pour un écartement entre les guides supérieur à 5µm
- Pertes optiques des guides droits de 2.5dB sur 2mm (comprenant les pertes de couplage de l'ordre de 2dB et de propagation de l'ordre de 0.5dB/mm)
- Pas de déphasage hyperfréquence entre les voies

• Gain en dynamique de 3dB pour 2 voies si les pertes de couplage pour chaque voie sont égales

Les différentes géométries de sommateur à 2, 4 et 8 voies envisagées pour l'application visée (20GHz) ont ensuite été détaillées. Trois topologies ont ainsi été proposées et nous verrons dans le chapitre IV leur caractérisation.

La réalisation technologique de ce circuit est détaillée dans le chapitre suivant.

# REFERENCES

# [1] M. Quillec

# Materials for optoelectronics

Kluver Academic Publishers, Boston, 1996

[2] D.A. Humpreys, R.J. King, D. Jenkins and A.J. Moseley

Measurements of the absorption coefficient of  $Ga_{0.47}In_{0.53}As$  over the wavelength range 1-1.7  $\mu m$ 

Electronic Letters, 1985, Vol. 21, n° 25/26, pp. 1187-1189

[3] K.J. Cheng, A.Y. Cho, S.B. Christman, T.P. Pearsall and J.E. Rowe Measurement of the  $\Gamma$ -L separation in Ga<sub>0.47</sub>In<sub>0.53</sub>As by ultraviolet photoemission Applied Physics Letter, 1982, Vol. 40, n° 5, pp. 423-425

[4] P. Bourrel, J.L. Thobel, K. Bellahsni, M. Pernisek et R. Fauquembergue Etude théorique du transport électronique et du contrôle de charge dans AllnAs/GaInAs/InP

J. Phys., 1991, III1, pp. 511

J.E. Bowers and C.A. Burrus
 Ultrawide-Band Long-Wavelength p-i-n Photodetectors
 IEEE Journal of Lightwave Technology, 1987, Vol. LT-5, n° 10, pp. 1265-1281

[6] T.P. Pearsall GaInAsP alloy semiconductors John Wiley and sons, 1982

[7] V. Magnin
 Contribution à l'étude et à l'optimisation de composants optoélectroniques
 Thèse, Université Lille 1, 1998

[8] L. Chusseau, P. Martin, C. Brasseur and C. Alibert
 Carrier-induced change due to doping in refractive index of InP : Measurements at 1.3 and 1.5 μm
 Applied Physics Letter, 1006, Vol. 60, rg 20, rg, 2054 2056

Applied Physics Letter, 1996, Vol. 69, n° 20, pp. 3054-3056

[9] S. Demiguel

**Photodiodes rapides à adaptateur de mode intégré pour les liaisons optiques/radiofréquences à 60 GHz et les transmissions numériques à 40 Gb/s** Thèse, Université de Rouen, 2001

[10] H. Mathieu
 Physique des semiconducteurs et des composants électroniques
 Editions Masson, 2<sup>nde</sup> édition, 1990

M. Dentan and B. de Crémoux [11]

Numerical simulation of the nonlinear response of a p-i-n photodiode under high illumination

Journal of Lightwave Technology, 1990, Vol. 8, n° 8, pp. 1137-1144

[12] S.M. Sze **Physics of semiconductor devices** Second Edition, 1981

[13] K. Kato, S. Hata, K. Kawano and A. Kosen Design of Ultrawide-Band, High-Sensitivity p-i-n Photodetectors IEICE Trans. Electron., 1993, Vol. E76-C, n° 2, pp. 214-221

G. Wanlin, L. Giraudet, J.P. Praseuth, A. Miras and E. Legros [14] High responsivity side illuminated AlGaInAs PIN photodiode for 40 Gbit/s - 40 GHz application ECOC, 1997, Vol. 2, pp. 37-40

G. Lucovsky, R.F. Schwartz and R.B. Emmons [15] Transit-time considerations in p-i-n diodes J. Appl. Phys., 1964, Vol. 35, n° 3, pp. 622-628

[16] F. Fiedler and A. Schlachetzki **Optical parameters of InP-based waveguides** Solide State Electron., 1987, Vol. 30, n° 1, pp. 73-83

B. Cabon, J. Chazelas et D. Dolfi [17] **Optoélectronique hyperfréquence – Composants** Techniques de l'Ingénieur, traité Electronique, pp. E3 330-1 à E 3 330-19

L. Giraudet et E. Legros [18] Photodétecteurs et circuits associés L'écho des Recherches, 1996, n° 166, pp. 53-62

K.J. Williams, R.D. Esman, R.B. Wilson and J.D. Kulick [19] Differences in p-side and n-side illuminated p-i-n photodiode nonlinearities IEEE Photonics technology letters, 1998, Vol. 10, n° 1, pp. 132-133

[20] R.D. Esman and K.J. Williams Measurement of harmonic distorsion in microwave photodetectors IEEE Photonics technology letters, 1990, Vol. 2, n° 7, pp. 502-504

[21] J. Schlafer, C.B. Su, W. Powazinik and R.B. Lauer 20 GHz bandwidth InGaAs photodetector for long-wavelength microwave optical links Electronics Letters, 1985, Vol. 21, n° 18, pp. 469-471

D. Wake, R.H. Walling, I.D. Henning and D.G. Parker [22] Planar-junction, top-illuminated GaInAs/InP pin photodiode with bandwidth of 25 GHz Electronics Letters, 1989, Vol. 25, n° 15, pp. 967-969

### [23] J.E. Bowers, C.A. Burrus and R.J. McCoy

**InGaAs pin photodetecors with modulation response to millimeter wavelengths** Electronics Letters, 1987, Vol. 21, n° 18, pp. 812-814

[24] M. Agethen, D. Keiper, G. Janssen, A. Brennemann, P. Velling, C. Van Den Berg and R.M. Bertenburg

**InGaAs pin detectors for frequencies above 100 GHz** IPRM 2002, pp. 673-676

[25] D. Decoster et J. Harari

### Détecteurs optoélectroniques

Traité EGEM, série optoélectronique

[26] K. Nishikata, H. Shimizu, K. Hiraiwa, S. Yoshida, N. Yamanaka, M. Irikawa and A. Kasukawa

Low dark current AlGaInAs/InP waveguide photodiodes using hybrid MBE and MOCVD growth

Journal of Crystal growth, 1997, Vol. 175/176, pp. 990-993

[27] J. Harari, G. Jin, J.P. Vilcot and D. Decoster

**Theoretical study of p-i-n photodetectors' power limitations from 2.5 to 60 GHz** IEEE transactions on microwave theory and techniques, 1997, Vol. 45, n° 8, pp. 1332-1336

[28] K.J. Williams, R.D. Esman and M. Dagenais

**Effects of high space-charge fields on the response of microwave photodetectors** IEEE Photonics technology letters, 1994, Vol. 6, n° 5, pp. 639-641

[29] B. de CremouxLimites en puissance des photodiodes PINDocument interne THOMSON-CSF LCR, 1996

[**30**] K.J. Williams

**Comparisons between dual-depletion-region and uni-travelling-carrier p-i-n photodetectors** IEE Proc.-Optoelectron., 2002, Vol. 149, n° 4, pp. 131-137

[31] N. Shimizu, Y. Miayamoto, A. Hirano, K. Sato and T. Ishibashi **RF saturation mechanism of InP/InGaAs uni-travelling-carrier photodiode** Electronics Letters, 2000, Vol. 36, n° 8, pp. 750-751

[32] H. Ito, T. Ohno, H. Fishimi, T. Furuta, S. Kodoma and T. Ishibashi
60 GHz high output power uni-travelling-carrier photodiodes with integrated bias circuit

Electronics Letters, 2000, Vol. 36, n° 8, pp. 747-748

[33] T. Ishibashi, T. Furuta, H. Fushimi, S. Kodama, H. Ito, T. Nagatsuma, N. shimizu and Y. Miyamoto

InP/InGaAs uni-travelling-carrier photodiodes

IEICE Trans. Electron., 2000, Vol. E83-C, n° 6, pp. 938-949

[34] M. Yuda, K. Kato, R. Iga and M. Mitsuhara

High-input-power-allowable uni-travelling-carrier waveguide photodiodes with semiinsulating InP buried structure

Electronics Letters, 1999, Vol. 35, n° 16, pp. 1377-1379

[35] M. Achouche, V. Magnin, J. Harari, F. Lelarge, E. Derouin, C. Jany, D. Carpentier, F. Blache, D. Decoster

# High performance evanescent edge coupled waveguide unitraveling-carrier photodiodes for > 40 Gb/s optical receivers

IEEE Photonics Technology Letters, 2004, Vol.16, N°2, pp. 584-586

J. Paslaski, P.C. Chen, J.S. Chen, N. Bar-Chaim [36] High-Power microwave photodiode for high-dynamic-range analog transmission OFC, 1994, pp. 208-209

M.S. Islam, A. Nespola, M. Yeahia, M.C. Wu, D.L. Sivco and A.Y. Cho [37] Correlation between the failure mechanism and dark currents of high power photodetectors

IEEE LEOS, 2000, pp. 82-83

[38] S. Adachi

### Thermal conductivity of InGaAsP

Properties of Indium Phosphide, EMIS Datareviews n° 6, Inspec Publications

L. Giraudet, F. Banfi, S. Demiguel and G. Hervé-Gruyer [39] Optical design of evanescently coupled, waveguide-fed photodiodes for ultrawide-band

applications IEEE Photonics Technology Letters, 1999, Vol. 11, n° 1, pp. 111-113

J.F. Vinchant, F. Mallecot, D. Decoster and J.P. Vilcot [40] Photodetectors monolithically integrated with optical waveguides: theoretical and experimental study of absorbing layer effects

IEE Proceedings, Part J, 1989, Vol. 136, n°1, pp. 72-75

[41] P. Cinguino, F. Genova, C. Rigo, C. Cacciatore, A. Stano Monolithic integrated InGaAlAs/InP ridge waveguide photodiodes for 1.55µm operation grown by molecular beam epitaxy

Applied Physics Letters, 1987, Vol.50, pp. 1515-1517

[42] W.K. Chan, J.H. Abeles, K.C. Nguyen, R. Bhat, M.A. Koza Integration of high-speed optical taps with InP waveguides IEEE Photonics Technology Letters, 1989, Vol.1, N°3, pp. 65-67

R.J. Deri, N. Yasuoka, M. Makiuchi, H. Hamaguchi, O. Wada, A. Kuramata, R.J. [43] Hawkins

Integrated waveguide/photodiodes with large bandwidth and high external quantum efficiency

IEEE Photonics Technology Letters, 1990, Vol.2, N°7, pp. 496-497

[44] R.J. Deri, W. Doldissen, R.J. Hawkins, R. Bhat, J.B. Soole, L.M. Schiavone, M. Seto, N. Andreadakis, Y. Silberberg, M.A. Koza Efficient vertical coupling of photodiodes to InGaAsP rib waveguides

Applied Physics Letters, 1991, Vol.58, pp. 2749-2751

[45] A. Umbach, D. Trommer, G.G. Mekonnen, W. Ebert, G. Unterborsch Waveguide integrated 1.55µm photodetector with 45 GHz bandwidth Electronics Letters, 1996, Vol.32, N°23, pp.2143-2145

[46] A. Umbach, G. Unterborsch, D. Trommer, G.G. Mekonnen, R.P. Braun Waveguide-integrated photodetector for 60 GHz microwave transmission at 1.55µm Proceedings, 1997, pp. 111-114

[47] D. Trommer, D. Schmidt, A. Umbach, R. Steingruber, W. Ebert, G. Unterborsch Ultrafast, high-power waveguide fed photodetector with integrated spot size converter Proceedings IEEE, 2000, pp. 462-465

[48] N. Yasuoka, M. Makiuchi, M. Miyata, O. Aoki, M. Ekawa, N. Okazaki, M. Takechi, H. Kuwatsuka, H. Soda

High-efficiency PIN photodiodes with a spot-size converter for 40 Gb/s transmission systems

Proceedings ECOC, 2001, pp. 558-559

[49] T. Takeuchi, T. Nakata, K. Makita, T. Torikai A high-power and high-efficiency photodiodes with an evanescently coupled gradedindex waveguide for 40 Gb/s optical receivers Proceedings OFC, 2001, Vol.3, pp. WQ2.1-WQ2.3

[50] S. Demiguel, L. Giraudet, L. Joulaud, J. Decobert, F. Blache, V. Coupé, F. Jorge, P. Pagnod-Rossiaux, E. Boucherez, M. Achouche, F. Devaux

**Evanescently coupled photodiode integrating a double stage taper for 40 Gb/s applications-compared performance with side-illuminated photodiodes** Journal of Lightwave Technology, 2002, Vol.20, n°12, pp. 2004-2014

[51] M. Achouche, S. Demiguel, E. Derouin, D. Carpentier, F. Barthe, F. Blache, V. Magnin, J. Harari, D. Decoster

New all 2-inch manufacturable high performance evanescent coupled waveguide photodiodes with etched mirrors for 40 Gb/s optical receivers Proceedings OFC, 2003, Vol.1, pp. 341-342

[52] S. Demiguel, N. Li, X. Li, X. Zheng, J. Kim, J.C. Campbell, H. Lu, A. Anselm Very high-responsivity evanescently coupled photodiodes integrating a short planar multimode waveguide for high-speed applications

IEEE Photonics Technology Letters, 2003, Vol.15, N°12, pp. 1761-1763

[53] J.F. Vinchant

**Intégration monolithique de photodétecteurs et de guides optiques sur matériaux III-V** Thèse, Université Lille1, 1990

# [54] O. Rabii

Etude de photodétecteurs PIN-guide et MSM intégrés à un guide optique pour des applications en ondes millimétriques

Thèse, Université Lille1, 1995

[55] V. Magnin, L. Giraudet, J. Harari, J. Decobert, P. Pagnot, E. Boucherez, D. Decoster **Design, optimization, and fabrication of side-illuminated p-i-n photodetectors with high responsivity and high alignment tolerance for 1.3- and 1.55-μm wavelength use** Journal of Lightwave Technology, 2002, Vol.20, n°3, pp. 477-488

[56] K.Blary

Matrices de commutation optique sur InP

Thèse, Université Lille 1, 2003

[57] www.microchem.com/products/pdf/SU8 2002-2025.pdf

# Réalisation du sommateur opto-hyperfréquence

La technologie sur semiconducteur n'est pas un « long fleuve tranquille » où tous les procédés existent et sont reproductibles tels quels sur nos composants. Cela ressemble plutôt à un travail de fourmi, demandant à chaque étape de nombreux essais technologiques. La réalisation de nos composants repose sur l'utilisation des « procédés technologiques » existants au sein du laboratoire et sur l'adaptation de ceux-ci à nos composants fortement non-planaires.

Dans ce chapitre, nous aborderons dans une première partie le procédé technologique complet de réalisation du sommateur opto-hyperfréquence sur substrat semi-isolant. Nous détaillerons en particulier le verrou technologique que constitue le procédé de reprise des contacts sur ces composants fortement non-planaires. Les caractérisations électriques I(V) des composants réalisés mettront en évidence la nécessité d'employer une combinaison entre la gravure sèche et humide lors de la définition du mesa P-I de la photodiode. Nous détaillerons ainsi dans une deuxième partie le nouveau procédé technologique sur substrat dopé N tenant compte de ces conclusions. Les caractérisations électriques statiques des composants réalisés permettront de valider ce nouveau procédé de réalisation.

# A. Réalisation du sommateur sur substrat semi-isolant

# 1. Structure épitaxiale réalisée

La structure épitaxiale, présentée dans le tableau III-1, est le résultat des modélisations optiques et électriques réalisées lors du chapitre précédent.

Elle a été réalisée par l'équipe Epitaxie de l'I.E.M.N dirigée par F. Mollot sur un substrat de deux pouces de diamètre dans le bâti d'épitaxie par jets moléculaires source gaz (GSMBE).

Couche	Matériau	Dopage (at/cm <sup>-3</sup> ) / Type	Epaisseur (Å)	
Contact	GaInAs	$1.10^{19}/p^{++}$	1000	<b> </b>
Р	InP	$1.10^{18} / p^+$	5000	
Espaceur	GaInAs	$1.10^{18}/p^+$	100	photodiod
I	GaInAs	- / i	11000	
Espaceur	GaInAs	$1.10^{18}/n^+$	100	
N	GaInAsP <sub>1.3µm</sub>	$1.10^{18} / n^+$	4000	
Couche d'arrêt	AlInAs	- / i	50	]
Ruban du guide	InP	- / i	1500	<b>}</b>
Couche d'arrêt	AlInAs	- / i	50	
Confinement supérieur	InP	- / i	1500	guide
Couche guidante	GaInAsP <sub>1.3µm</sub>	- / i	1200	
Buffer	InP	- / i	10000	
Substrat	InP	S.I	350 µm	

Tableau III-1 : Epitaxie du sommateur réalisée à l'IEMN

On retrouve au niveau de cette épitaxie les deux parties distinctes formant la photodiode évanescente : elle est constituée d'un guide en GaInAsP<sub>1.3µm</sub>, chargé par un ruban en InP, et surmonté d'une photodiode P (InP) – I (GaInAs) – N (GaInAsP).

Afin de réduire les parasites d'accès hyperfréquence, la croissance se fait sur un matériau semi-isolant. Sur ce substrat InP semi-isolant, nous faisons tout d'abord croître un « buffer »

qui permet d'absorber les défauts cristallins présents à la surface du substrat, et d'effectuer la croissance des couches ultérieures dans de bonnes conditions.

•La couche guidante est définie par l'alliage quaternaire GaInAsP<sub>1.3µm</sub> (0.12µm) adapté en maille sur InP, dont la composition correspond à une longueur d'onde de coupure de 1.3µm. Le confinement supérieur est composé de 0.3µm d'InP.

•La couche de type N est obtenue par la croissance de l'alliage quaternaire GaInAsP<sub>1.3µm</sub> (0.4µm). La zone intrinsèque I (non intentionnellement dopée) est réalisée en GaInAs (1,1µm) à teneur en gallium de 47%. Enfin la couche de type P en InP (0.5µm) est suivie d'une couche dite de contact en GaInAs (0.1µm), fortement dopée  $P^{++}$  afin de faciliter la réalisation du contact ohmique de type P.

Nous avons aussi introduit deux couches d'arrêt d'AlInAs qui permettront de contrôler la profondeur de gravure lors des gravures sèches RIE. La première servira lors de la gravure de la couche de GaInAsP dopée N, et la seconde sera utile lors de la définition du ruban des guides optiques.

# 2. Topologie des composants

La solution choisie pour la réalisation d'un sommateur opto-hyperfréquence en optique intégrée consiste donc à éclairer une photodiode PIN par des guides optiques distincts couplés par onde évanescente au photodétecteur.



Figure III-1: Représentation de face et de côté de la structure

Nous retrouvons, comme illustré sur la figure III-1, deux guides optiques de largeurs 4  $\mu$ m espacés de 20 $\mu$ m et surmontés chacun d'une photodiode PIN de longueur 35 $\mu$ m et d'épaisseur de couche intrinsèque I égale à 1.1 $\mu$ m. Le contact N, carré de 35 $\mu$ m par 35 $\mu$ m, est déporté de 5 $\mu$ m par rapport au ruban P-I de la photodiode et repose sur la couche en GaInAsP dopée N.

# 3. Récapitulatif des étapes technologiques

La réalisation du sommateur opto-hyperfréquence repose sur l'utilisation des équipements existants au sein de la salle blanche de l'I.E.M.N et nécessite l'accomplissement de neuf étapes technologiques. Nous allons tout d'abord présenter brièvement dans le tableau III-2 les principales étapes technologiques nécessaires à la réalisation des sommateurs opto-hyperfréquences, c'est-à-dire précédant les phases d'amincissement et de clivage avant de nous lancer dans une description plus exhaustive de chacune d'entre elles.

Par souci de clarté, nous avons vulgarisé l'épitaxie à une succession de couches de type P, I, N et cœur du guide sur substrat semi-isolant.





**Tableau III-2 :** Description schématique des étapes de réalisation dans le cas d'un sommateur opto-hyperfréquence à 2 voies réalisé sur substrat semi-isolant

# 1. Dépôt des contacts ohmiques de type P

Les contacts ohmiques de type P sont déposés sur la couche dite de contact en GaInAs fortement dopée  $P^{++}$ . Ces contacts ohmiques sont constitués de la séquence suivante de métaux (dans l'ordre de dépôt) :

# 2. Gravure du ruban de la photodiode (P et I)

La gravure du ruban se fait de façon auto-alignée par rapport aux contacts ohmiques de type P. Il s'agit ici de graver une épaisseur totale de 1.7µm et de s'arrêter sur la couche de GaInAsP dopée N. Etant donnée l'épaisseur à graver, l'objectif ici est aussi de définir la séquence de métaux permettant aux contacts de type P de ne pas être endommagés lors de cette gravure.

# 3. Dépôt des contacts ohmiques de type N

La reprise du contact de type N se fait sur l'alliage quaternaire GaInAsP<sub>1.3µm</sub>. La séquence métallique choisie est la suivante : Ni / Ge / Au / Ni / Au.

# 4. Gravure de la couche dopée N<sup>+</sup>

L'objectif ici est triple, il s'agit ainsi de :

- graver la couche de GaInAsP<sub> $1.3\mu m$ </sub> dopée N<sup>+</sup> de 0.4 $\mu m$  d'épaisseur
- masquer lors de la gravure les zones dopées N<sup>+</sup> situées entre les rubans de photodiode et prolongées jusqu'au contact ohmique de type N afin de collecter les électrons du dispositif global
- arrêter la gravure exactement sur la couche de confinement supérieure du guide d'InP à l'aide d'une couche d'arrêt d'AlInAs.

# 5. Définition des guides optiques

Lors de cette étape, nous définissons la partie optique passive du sommateur. L'utilisation d'une couche d'arrêt d'AlInAs se révèle également nécessaire afin de contrôler la profondeur de gravure ( $0.15\mu m$  d'InP).

### 6. Gravure du mesa d'isolation

L'isolation électrique des composants est réalisée par la gravure de  $0.15\mu m$  d'InP, de  $0.12\mu m$  de GaInAsP de la couche guidante et de  $1\mu m$  d'InP, constituant le buffer, afin de descendre sur le substrat semi-isolant.

### 7. Définition du support du pont d'interconnexion

Afin de connecter la photodiode PIN, il nous faut réaliser des accès sur le substrat semiisolant. Il faut donc reprendre les contacts ohmiques de type P, présents au sommet de chaque ruban de photodiode, ainsi que les contacts de type N et les ramener au niveau du substrat semi-isolant. Nous avons mis au point une technique originale [1] basée sur l'utilisation d'un pont diélectrique réalisé en polymère assurant le déport des contacts P et N sur le substrat semi-isolant.

#### 8. Report des contacts P et N

A ce stade de la réalisation du composant, il reste à déposer les plots d'épaississement des contacts ohmiques de type P et N sur le substrat semi-isolant.

### 9. Définition des ponts à air

La réalisation de pont à air permet de minimiser les capacités parasites du composant et se fait en supprimant le support polymère du pont d'interconnexion défini lors de l'étape de reprise de contact.

### Remarque

Ces trois dernières étapes ont été des verrous technologiques importants lors de la réalisation du composant, en effet le dénivelé entre le contact ohmique de type P et le substrat semi-isolant est de l'ordre de  $4\mu m$  !

### ♦ Amincissement

L'amincissement du wafer est indispensable afin de faciliter l'étape de clivage nécessaire pour caractériser optiquement les composants et à moindre mesure de permettre une bonne évacuation de la chaleur dégagée lors du fonctionnement du composant.

#### ♦ Clivage

C'est l'étape cruciale, car de la qualité des facettes d'injection dépend la propagation de la lumière et toutes les mesures possibles. Elle est hélas encore très rudimentaire au laboratoire !

# 4. Description des masques

Pour réaliser les différentes configurations de sommateurs opto-hyperfréquences, sept étapes lithographiques sont nécessaires parmi lesquelles deux se font à l'aide du masqueur électronique (notées 1 et 4 dans le tableau III-3).

N° de lithographie	Etape	Utilisation
1	Dépôt contact P	<ul> <li>Dépôt contact P (1)</li> <li>Gravure du ruban P-I (1.7μm) (2)</li> </ul>
2	Dépôt contact N	• Dépôt contact N (3)
3	Gravure de la zone N	<ul> <li>Protection couche dopée N</li> <li>Gravure N (0.4µm) (4)</li> </ul>
4	Définition des guides	<ul> <li>Protection couche dopée N</li> <li>Gravure du ruban (0.15µm) (5)</li> </ul>
5	Mesa d'isolation	<ul> <li>Protection composant</li> <li>Gravure jusqu'au substrat semi-isolant (1.4µm) (6)</li> </ul>
6	Support du pont d'interconnexion	• Définition des ponts d'interconnexion et des ouvertures au-dessus des contacts (7)
7	Report des contacts P et N	• Dépôt des plots de report P et N (8)

Tableau III-3 : Récapitulatif des masques permettant la réalisation du sommateur

# 5. Verrou technologique

Lors de la réalisation du sommateur opto-hyperfréquence, un verrou technologique important a été soulevé. Etant donné l'importante non-planarité des composants (4 $\mu$ m), il concerne l'étape de reprise des contacts P et N. Nous avons mis au point une technologie globalement basée sur :

- l'utilisation d'un pont diélectrique réalisé en résine optique assurant le déport du contact sur le substrat semi-isolant
- l'utilisation d'un contact électrolysé réalisant le pont d'interconnexion et les plots de contact P et N
- le retrait de la résine optique afin de réaliser un pont à air

# 5.1. Support du pont d'interconnexion

A ce niveau de réalisation, les composants sont terminés, et il s'agit donc de définir un pont d'interconnexion afin de reprendre les contacts P et N, comme l'illustre la figure III-2.



Figure III-2 : Définition du support du pont d'interconnexion

Cette étape peut se faire de diverses manières :

• L'utilisation d'un pont en polyimide [2-3] pour réaliser la reprise pose problème lors du clivage, en effet le polyimide est un matériau amorphe et se déchire lors de cette étape. L'expérience [4] a ainsi montré qu'il joue le rôle d'un nœud occasionnant la divergence de la

direction de propagation de la fissure lors de l'étape de clivage. D'autre part, des problèmes de décollement des plots de métallisation ont également été observés.

• L'utilisation d'un matériau de planarisation tels que le BCB [5-6] ou la silice [7] présente également des inconvénients. En effet ces techniques entraînent l'augmentation de la capacité parasite et des inhomogénéités d'épaisseur du matériau de planarisation ont été observées.

Toutes ces techniques requièrent l'utilisation des techniques de gravure sèche dans le but de créer des ouvertures au-dessus des métallisations et se pose alors le problème des inhomogénéités d'épaisseur sur le wafer entier. Ainsi une étude précédente [8] a montré lors de cette étape que la silice a été ouverte sur les plots métalliques plus rapidement sur les bords qu'au centre de la plaquette et des écarts importants au niveau des dénivelés étaient présents au cours du procédé.

• En tenant compte de toutes ces contraintes, nous avons mis au point une technologie globalement basée sur l'utilisation d'un pont diélectrique réalisé en résine optique assurant le déport du contact sur le substrat semi-isolant [1].

#### 5.1.1. Choix des résines optiques

Le processus développé repose sur la propriété physique de fluage de la résine optique PMGI lors du recuit à 250°C. Celle-ci permet d'adoucir la pente du pont d'interconnexion en résine entre les contacts ohmiques de type P et le substrat semi-isolant.

Il s'agit ici de trouver les paramètres lithographiques permettant à la PMGI de recouvrir les rubans des photodiodes de  $4\mu m$  de hauteur et d'ouvrir cette résine au-dessus des contacts ohmiques de type P et de type N (tableau III-4 (c)).

#### 5.1.2. Lithographie optique

### 5.1.2.1. Procédé existant

Le procédé, établi au sein de l'I.E.M.N **[9]**, repose d'une part sur l'utilisation de la PMGI SF11, sensible uniquement aux UV profonds, et d'autre part sur l'emploi d'un masque intermédiaire en AZ1505 photosensible. Cependant il a été développé sur substrat dopé  $P^+/N^+$ 

- 133 -

pour des composants non-planaires avec des hauteurs de mesa de l'ordre de  $2\mu m$ . Nous avons donc adapté ce processus à nos hauteurs de composant et sur substrat semi-isolant.

### 5.1.2.2. Procédé adapté au composant

Nous avons remplacé la PMGI SF11 par la PMGI SF19 **[10]** présentant les mêmes caractéristiques physiques mais permettant de déposer des épaisseurs plus importantes de résine. Nous avons employé un masque intermédiaire en AZ1518 au lieu de l'AZ1505 afin d'avoir une meilleure définition des ouvertures.

Etant donnée l'épaisseur de résine déposée  $(7\mu m)$ , un détourage est ici nécessaire afin d'assurer un bon plaquage du masque lors de l'insolation de la résine AZ1518.





**Tableau III-4** : Enchaînement des étapes pour la définition des ponts d'interconnexion en résine PMGI

- 134 -

Schématiquement, l'effet du fluage est représenté sur la figure III-3 concernant d'une part un pont entre deux motifs de même hauteur et d'autre part un déport de plot sur substrat semiisolant. Concernant le premier, on peut observer l'effet de comblement des éventuels interstices existants entre le dépôt PMGI et les deux motifs. Concernant le second, le même effet peut être observé avec en plus l'obtention d'une pente douce permettant la descente de la métallisation, sans risques de rupture, sur le substrat semi-isolant.



Figure III-3 : Propriété du fluage

On peut remarquer sur la figure III-4 (a) que les ouvertures sont plus grandes ou « débordent » des zones de reprise de contacts prévues avant fluage. Le fluage permet de « combler » les éventuels débordements des zones d'ouverture de PMGI et est obtenu par un post-recuit très court (250°C pendant 30s) qui a pour effet de faire « gonfler » le film et simultanément de combler les éventuels « trous » pouvant exister. Ainsi aucun débordement n'est visible après fluage (figure III-4 (b)).



(a) Avant fluage

(b) Après fluage


Nous avons effectué une coupe dans le pont en utilisant un faisceau d'ions focalisé (FIB). La figure III-5 montre clairement qu'aucun « trou » n'est visible de part et d'autre des rubans supportant les contacts de type P. On remarque également l'absence de résine PMGI sur les contacts métalliques. Enfin on discerne la forme bombée du pont faisant suite à l'opération de fluage.



Figure III-5 : Photographies prises au FIB du pont de PMGI après fluage

#### Remarque :

Il est à noter que le dépôt de PMGI est égal à 6.7µm après fluage alors qu'il n'était que de 5µm avant. On voit donc bien cet effet de gonflage de la résine lors de son recuit à 250°C.

# 5.2. Définition du report des contacts P et N

Une fois le pont diélectrique réalisé, il reste à faire le report des contacts électriques P et N qui sera effectué par électrolyse. Cette technique de dépôt permet de faire croître des épaisseurs relativement importantes (jusqu'à quelques micromètres), et ce de manière beaucoup moins onéreuse que par évaporation sous vide. La figure III-6 illustre schématiquement le composant après le report des contacts P et N.



Figure III-6 : Coupe schématique du composant après le dépôt des plots de report P et N

#### 5.2.1. Pulvérisation d'or

La pulvérisation d'une couche de 400 Å d'or pleine plaque est indispensable car elle va servir de couche d'accrochage lors de l'électrolyse. Elle se fait à une puissance de 150W pendant 3 minutes sur le bâti de pulvérisation cathodique Alcatel disponible à l'I.EM.N.

#### 5.2.2. Choix des résines optiques

On définit lors de cette étape les moules d'AZ4562 dans lesquels va croître l'or électrolysé afin de réaliser les plots de report des contacts de type P et N.

Il s'agit également ici de trouver les paramètres lithographiques permettant à la résine épaisse AZ4562 de recouvrir la zone comprise entre le contact ohmique de type P et le contact ohmique de type N afin d'éviter un court-circuit après l'étape d'électrolyse (tableau III-5 (a)). Le détourage est ici indispensable afin d'assurer d'une part un bon plaquage du masque lors de la définition des motifs en AZ4562 et d'autre part de dérésiner une zone servant alors de contact entre la couche d'accrochage d'or pulvérisé et l'anneau de contact électrique utilisé lors de l'électrolyse.

L'enchaînement des étapes pour réaliser la reprise des contacts à l'aide de ponts à air est représenté dans le tableau III-5:



Tableau III-5 : Enchaînement des étapes pour la définition des ponts à air métallisés

# 5.2.3. Définition du masque en AZ4562 (tableau III-5 (a))

Cette étape se fait en employant la lithographie optique.



Figure III-7 : Photographies prises au microscope optique des moules en AZ4562

Nous voyons sur la figure III-7 la réalisation des ouvertures de résine AZ4562 définissant les plots de report P et N ainsi que l'écartement entre les moules « de type P et N ».

#### **5.2.4.** Electrolyse (tableau III-5 (b))

#### 5.2.4.1. Principe

Le passage d'un courant électrique, dans une solution d'électrolyte, s'accompagne de réactions chimiques au voisinage des électrodes, ce qui constitue le principe de l'électrolyse. L'échantillon à métalliser est fixé sur la cathode car les ions Au sont positifs. Si l'échantillon n'est pas conducteur, il faut le rendre conducteur en y déposant un mince film conducteur. C'est ce que nous faisons avec la couche de 400Å d'or pulvérisé. Le système de dépôt disponible au laboratoire utilise un bain PUR A GOLD 402 [11]. Cette solution assure des revêtements d'or pur à 99.99% d'une parfaite uniformité et conduit à une structure de dépôt extrêmement fine.

Le système de dépôt électrolytique est représenté sur la figure III-8.



Figure III-8: Description schématique du système de dépôt électrolytique

# 5.2.4.2. Réalisation technologique

Nous effectuons ici un dépôt électrolytique d'or pur en courant continu afin de réaliser les plots de report des contacts de type P et N. Nous plongeons le wafer dans le bain électrolytique pendant 35 minutes sous un courant de 20mA.





Nous voyons sur la figure III-9 que la croissance électrolytique a suivi la forme des moules en AZ4562. Nous remarquons également que les contacts P et N électrolysés ne se touchent pas. Avec ce procédé, nous avons déposé 2µm d'or.

## 5.2.5. Retrait des couches de résine AZ4562 et d'accrochage en or

Nous retirons la résine AZ4562 en plongeant le wafer dans l'acétone qui est son solvant. Pour graver la couche d'accrochage d'or, nous utilisons la solution KI/I<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O. La vitesse de gravure de l'or dans cette solution étant importante, cette étape ne prend que quelques secondes.



Figure III-10: Photographies prises au microscope optique des contacts reportés

A ce stade de la réalisation, les contacts de type P ont été interconnectés et reportés sur le substrat semi-isolant à l'aide de ponts en PMGI SF19, comme le montre la figure III-10. Nous avons fait de même avec les contacts de type N.

# 5.3. Définition des ponts à air (tableau III-5 (c))

Afin de réaliser les ponts à air, il ne reste plus qu'à retirer la résine de type PMGI, comme l'illustre la figure III-11 :



Figure III-11 : Coupe schématique du composant après la définition des ponts à air

L'obtention de ponts à air est en fait assez simple. Il suffit juste de plonger pendant 3 heures le wafer dans l'EBR PG qui est le solvant de la PMGI SF19 [12].



Figure III-12: Photographies prises au microscope optique des ponts à air

A ce stade de la réalisation, les contacts de type P ont été interconnectés et reportés sur le substrat semi-isolant à l'aide de ponts à air, comme représenté figure III-12. Nous avons fait de même avec les contacts de type N.

#### 5.4. Conclusions sur cette étude

Nous avons donc mis au point un procédé reproductible de reprise des contacts sur substrat semi-isolant adapté à nos composants fortement non-planaires (4µm de dénivelé) et adaptable quelles que soient les dimensions des composants. Ainsi il est à noter que ce procédé fonctionne quelle que soit la hauteur du ruban (il suffit pour cela de déposer l'épaisseur de résine PMGI SF11 ou SF19 suffisante) et quelle que soit la distance séparant deux rubans à interconnecter. Dans le cas de nos structures, elle varie de 3µm pour la structure 5 à 20µm pour les structures à 8 voies. Ainsi ce procédé est adaptable quelles que soient les distances verticales et horizontales requises et le passage à des largeurs submicroniques est envisageable.

## 6. Description détaillée des étapes

Nous détaillerons ici la démarche que nous avons adoptée dans le choix des différents paramètres technologiques et la succession des différentes étapes technologiques aboutissant à la réalisation des sommateurs opto-hyperfréquences. Afin d'illustrer schématiquement ces différentes étapes, nous avons choisi d'étudier le cas d'un sommateur à 4 voies constitué de 4 guides optiques couplés à deux photodiodes PIN (structure 7).

#### 6.1. Dépôt des contacts ohmiques de type P

Cette étape est primordiale car de sa bonne définition découlera toutes les suivantes. En effet lors de cette étape, mis à part les contacts ohmiques de type P, sont déposées les marques d'alignement nécessaires à la superposition des masques suivants.

#### 6.1.1. Choix de la séquence métallique

De nombreux alliages sont susceptibles de réaliser un contact ohmique sur une couche GaInAs dopée  $P^{++}$ . De très bons résultats ont été montrés [13] à partir du contact non allié Pt/Ti/Pt/Au (100/400/100/4000 Å) déposé par évaporation sous vide. Ce dernier mène à une résistance de contact de 0.1  $\Omega$ .mm.

Comme ces contacts servent de masque de gravure lors de la définition du ruban de la photodiode, une couche métallique de protection a été rajoutée afin d'éviter leur dégradation. Une étude sur les vitesses de gravure de différents métaux dans le plasma  $CH_4/H_2/Ar$ , utilisé lors de cette gravure, nous amène à utiliser une couche supplémentaire en Titane de 200 Å, en effet la vitesse de gravure du Titane dans un tel plasma est de l'ordre de 0.5 Å/min.



#### 6.1.2. Dessin du masque

Figure III-13: 1<sup>er</sup> niveau de masquage (cas de la structure 7)

# 6.1.3. Lithographie électronique

Compte tenu de la précision demandée dans la définition des motifs d'alignement, indispensables pour la suite de la réalisation du composant, nous nous sommes tournés vers la lithographie électronique pour réaliser cette étape. En effet un premier essai s'est révélé être infructueux en lithographie optique.

#### 6.1.3.1. Enduction

Le procédé employé lors du dépôt des contacts de type P est celui du profil en casquette explicité figure III-14:



Figure III-14: Procédé du profil en casquette

Il requiert l'utilisation d'un bicouche de résines électroniques : une résine copolymère de type EL et une résine PMMA ; la première résine déposée étant la résine copolymère. Les deux résines ne sont pas sensibles de la même façon aux électrons rétro-diffusés, ce qui permet la création de la casquette. L'épaisseur de la résine copolymère de type EL est déterminée en fonction de l'épaisseur de métal désirée.

Nous avons choisi la résine EL 13% (MMA 8.5) car elle permet de déposer une épaisseur de 6680 Å, ce qui est suffisant pour le contact métallique envisagé de 4800 Å d'épaisseur. Nous déposons ensuite la PMMA 3% (495K) ce qui définit ainsi le bicouche de résines.



Figure III-15: Photographies prises au microscope optique des ouvertures en casquette des motifs

Sur la figure III-15, nous pouvons voir l'excellente définition des motifs d'alignement ainsi que des ouvertures des contacts de type P.

## Remarque :

Lors de l'écriture électronique, il est important que ce premier niveau soit correctement aligné par rapport au méplat de façon à ce que les composants soient parallèles aux directions cristallines, ce qui sera impératif pour assurer un bon clivage des composants.

#### 6.1.3.2. Métallisation

La métallisation est réalisée par évaporation sous vide et la séquence déposée est donc la suivante :

Pt / Ti / Pt / Au / Ti (100 / 400 / 100 / 4000 / 200 Å)

# 6.1.3.3. Lift-off

Pour effectuer le lift-off, nous utilisons l'acétone qui est un solvant des résines employées dans ce bicouche. Après 45 minutes d'immersion dans un bain d'acétone, le film métallique se décolle et les motifs apparaissent (figure III-16).



Contacts P métallisés (structure 13)

Marque d'alignement métallisée



## 6.1.3.4. Recuit-flash

Afin de donner toutes leurs propriétés aux contacts ohmiques de type P, nous effectuons un recuit « flash » permettant d'allier les différents métaux. Il se fait à 430°C pendant 40 secondes dans un four à recuit à flash.

# 6.1.3.5. Mesure de l'épaisseur déposée

L'épaisseur mesurée au profilomètre est égale à 4500Å.

# 6.2. Gravure du ruban de la photodiode (P et I)

Cette étape consiste à définir le ruban des photodiodes comme illustré sur la figure III-17.



Figure III-17: Coupe schématique du composant après la gravure du ruban P-I

Pour cette étape, aucune étape lithographique n'est nécessaire puisque la gravure se fait de façon auto-alignée par rapport aux contacts ohmiques de type P. Le ruban à graver est constitué de :  $0.1\mu$ m de GaInAs (couche de contact), de  $0.5\mu$ m d'InP (P) et  $1.1\mu$ m de GaInAs (I) soit une épaisseur totale de  $1.7\mu$ m. Nous devons en outre arrêter la gravure sur la couche en GaInAsP dopée N.

Par souci de simplicité, de reproductibilité et afin d'éviter les problèmes de sous-gravure, nous nous sommes tournés vers la gravure sèche RIE [14-15] afin de réaliser les rubans P-I. Cette technique de gravure est bien maîtrisée au sein du laboratoire et plus particulièrement pour les matériaux de la filière InP [16]. Le plasma utilisé est un mélange de méthane, d'hydrogène et d'argon ( $CH_4/H_2/Ar$ ).

Le bâti dont nous disposons est un bâti de gravure RIE Plasmalab 80 OXFORD contrôlé par PC. Un système d'interférométrie laser est adjoint au système de gravure pour le contrôle de fin d'attaque.

# 6.2.1. Cycle de gravure

L'épaisseur à graver étant relativement importante  $(1.7\mu m)$ , les temps de gravure sont par conséquent assez longs. Nous fragmentons le temps total de gravure en plusieurs cycles de 10

- 147 -

minutes afin d'assurer l'évacuation des espèces gravées. En effet l'utilisation du méthane entraîne la formation de polymères modifiant les conditions de gravure et qu'il convient donc de retirer par plasma oxygène [17]. Une gravure s'effectue donc en une suite de cycles élémentaires permettant l'élimination au fur et à mesure des polymères formés en cours de gravure :

- pompage jusqu'à la pression de base
- gravure des matériaux par plasma CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/Ar (10 minutes)
- retrait des polymères par plasma oxygène (3 minutes)

Il faut ainsi 18 cycles de 10 minutes de gravure et 18 cycles de 3 minutes de plasma oxygène pour définir les rubans P-I des photodiodes. Nous pouvons donc en déduire les vitesses de gravure des matériaux utilisés qui correspondent à nos motifs:

- 85 Å/ min pour le GaInAs
- 140 Å/ min pour l'InP



Figure III-18: Photographies prises au MEB des gravures RIE des rubans de photodiode

Sur les photographies prises au MEB (figure III-18), nous voyons que la couche de Ti (200Å) a résisté lors de la gravure RIE et que l'état de surface est lisse. Nous notons de plus la présence d'aspérités verticales sur les flancs des rubans dues au plasma de gravure et/ou à la définition du masque métallique.

# 6.2.2. Plasma de gravure

Le plasma utilisé est donc un mélange de méthane, d'hydrogène et d'argon [16].

Les paramètres du plasma de gravure sont regroupés dans le tableau III-6:

Plasma de gravure	Débit (sccm)	Puissance (W)	Pression (Torr)
CH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> Ar	6 50 10	225	0.050
Temps de gravure	18 X 10 minutes		

Tableau III-6 : Paramètres du plasma de gravure RIE du ruban P-I de la photodiode

## 6.2.3. Plasma oxygène

Les paramètres du plasma oxygène sont les suivants (tableau III-7):

Plasma de gravure	Débit (sccm)	Puissance (W)	Pression (Torr)
O <sub>2</sub>	50	100	0.1
Temps de gravure	18 X 3 minutes		

 Tableau
 III-7 : Paramètres du plasma oxygène

# 6.2.4. Inhomogénéité de gravure

Malgré une bonne maîtrise des vitesses de gravure lors de cette étape, un des problèmes majeurs est de pouvoir stopper la gravure sur la couche désirée et également de limiter les inhomogénéités d'épaisseur entre le centre du substrat et sa périphérie.

En effet, dans le cas de la structure 13 large de 750 µm et longue de 1 cm, ce genre d'inhomogénéité peut s'avérer critique. Nous avons ainsi constaté lors de cette étape des écarts de l'ordre de 0.25µm au niveau de la hauteur des rubans P-I des photodiodes entre les bords de la plaquette et le centre. Ainsi, ce composant qui s'étend du centre de la plaque vers ses extrémités comportera dans sa structure des variations d'épaisseur non négligeables. De plus, l'épitaxie présente également des inhomogénéités d'épaisseur des couches entre le centre et la périphérie qui aggravent encore plus les différences d'homogénéités sur la plaquette [18].

#### 6.3. Dépôt des contacts ohmiques de type N

Après avoir défini le ruban P-I de la photodiode, les contacts ohmiques de type N sont déposés sur la couche de GaInAsP dopée N<sup>+</sup> (figure III-19).

#### 6.3.1. Choix de la séquence métallique

De très bons résultats ont été montrés à partir du contact allié Ni/Ge/Au/Ni/Au (150/195/390/500/4000 Å) déposé par évaporation sous vide et suivi d'un recuit « flash » à 310°C dans un four pendant 20 secondes, en effet une résistance de contact de  $0.01\Omega$ .mm a été obtenue [4].



#### 6.3.2. Dessin du masque

Figure III-19: 2<sup>ème</sup> niveau de masquage (cas de la structure 7)

## 6.3.3. Choix des résines optiques

Cette étape *a priori* facile a nécessité de nombreux essais. En effet le choix des résines permettant le dépôt des contacts ohmiques de type N est dicté par deux contraintes ; le bicouche de résines optiques utilisé doit, comme le montre la figure III-20:

- recouvrir les rubans des photodiodes de 2.2µm de hauteur
- définir un profil en casquette



Figure III-20: Profil en casquette pour le dépôt du contact de type N

## 6.3.4. Lithographie optique

Etant donnée la hauteur des rubans, nous avons mis au point un procédé tricouche de résines optiques **[19]** permettant de recouvrir totalement les rubans et ne nécessitant qu'une seule insolation aux UV pour obtenir le profil en casquette. Les deux résines utilisées sont la LOR 10A et la S1818 qui seule est photosensible. On dépose d'abord deux couches de LOR 10A puis une couche de S1818. Une seule insolation est nécessaire car le développeur MF 319 révèle la résine insolée S1818 puis dissout et sous-grave la résine LOR 10A, définissant ainsi un profil en casquette.

# 6.3.4.1. Enduction des résines optiques



Figure III-21 : Vues au microscope optique des motifs du premier niveau recouverts de résine avant insolation

Sur la figure III-21, nous voyons que la première contrainte a été respectée car la résine recouvre totalement les rubans de photodiode.





Figure III-22: Photographies prises au microscope optique des ouvertures en casquette des motifs

Nous voyons sur la figure III-22 (a) que la révélation n'est pas totalement terminée après 3mn45s de révélation (il reste encore de la résine au fond des motifs) et nous vérifions

également la présence du profil en casquette par un liseré clair qui suit le contour du motif une fois la révélation terminée après 4 minutes (figure III-22 (b)).

## 6.3.4.3. Métallisation

La métallisation est réalisée par évaporation sous vide et la séquence déposée est la suivante :

Ni / Ge / Au / Ni / Au (150/195/390/500/4000 Å)

#### 6.3.4.4. Lift-off

Pour effectuer le lift-off, nous utilisons le « nanoremover PG » qui est un solvant des résines employées lors de ce tricouche. Après deux heures d'immersion dans un tel bain, le film métallique se décolle et les motifs apparaissent. Pour accélérer le lift-off, on peut soumettre l'échantillon aux ultrasons.



Figure III-23: Photographies prises au MEB des contacts ohmiques de type P et N

Sur les photographies prises au MEB (figure III-23), nous voyons la réalisation de la partie active du sommateur constituée de 4 et 8 rubans de photodiode P-I pour respectivement la structure 10 et 13. Chaque structure possède un contact N déporté de 5  $\mu$ m par rapport au contact P le plus proche.

# 6.3.4.5. Recuit-flash

Le recuit se fait à 310°C pendant 20 secondes dans un four à recuit flash.

## 6.4. Gravure de la couche dopée N

L'objectif ici est triple, il s'agit ainsi de :

- graver la couche de GaInAsP<sub>1.3μm</sub> dopée N et d'épaisseur 0.4μm
- protéger les zones dopées N, situées entre les rubans de photodiode et prolongées jusqu'au contact de type N, afin de collecter les électrons du dispositif global (figure III-24 (a))
- arrêter la gravure exactement sur la couche de confinement supérieure du guide (InP)
   en employant une couche d'arrêt d'AlInAs (50 Å)



#### 6.4.1. Dessin du masque

Figure III-24: 3<sup>ème</sup> niveau de masquage (cas de la structure 7)

#### 6.4.2. Rôle du masque de protection

Le masque doit lors de cette étape recouvrir les rubans de photodiode (dénivelé de 2.2µm) et protéger les zones situées entre ces rubans et prolongées jusqu'au contact ohmique de type N (figure III-24 (a)). Il doit aussi bien entendu ne pas être endommagé lors de la gravure RIE de

la couche dopée N. Enfin, après cette gravure, son retrait total doit être facilement réalisable afin de poursuivre la suite de la réalisation dans de bonnes conditions.

# 6.4.3. Masque défini en silice SiO<sub>2</sub>

Pour toutes ces raisons, nous décidons d'employer un masque intermédiaire de 1000 Å de silice. Celle-ci est déposée pleine plaque par PECVD. Les motifs sont d'abord définis à l'aide du procédé tricouche LOR 10A-S1818 précédemment utilisé lors du deuxième niveau. Une première gravure permet de reporter les motifs sur la silice et cette dernière fait ensuite office de masque pour la gravure du GaInAsP<sub>1.3µm</sub> dopé N.

## 6.4.3.1. Définition du masque en silice SiO<sub>2</sub>

Le tableau III-8 illustre l'enchaînement des étapes nécessaires à la réalisation de la gravure de la couche de GaInAsP<sub>1.3µm</sub> dopé N :





Tableau III-8 : Enchaînement des étapes pour la gravure de la couche dopée N

Nous avons décidé d'utiliser le procédé de tricouche de résines optiques LOR 10A-S1818 car, même si ce procédé est plutôt employé pour définir un profil en casquette lors de dépôt métallique, nous savons qu'il permet de recouvrir les rubans de nos composants. Afin d'obtenir une bonne d'adhérence des motifs en résine sur la silice, nous utilisons le promoteur d'adhérence HMDS.



Figure III-25: Vues au microscope optique du masque intermédiaire de protection en silice

Nous voyons sur la figure III-25 que le masque en  $SiO_2$  recouvre bien les rubans des photodiodes et protège les zones dopées N situées entre les contacts P et N.

Le masque intermédiaire en silice étant réalisé, nous pouvons passer à la gravure de la couche de GaInAsP<sub>1.3µm</sub> dopée N de  $0.4\mu m$  d'épaisseur.

## 6.4.3.2. Gravure de la couche dopée N (tableau III-8 (f))

La couche de GaInAsP<sub>1.3µm</sub> dopée N a été gravée en RIE à l'aide du plasma CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/Ar (35 minutes), puis la couche d'arrêt en AlInAs a été enlevée avec une gravure chimique H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O sélective sur InP. Le retrait du masque de protection défini en silice se fait à l'aide du plasma fluoré CF<sub>4</sub> / CHF<sub>3</sub>.



Figure III-26: Vues au microscope optique du composant après la gravure de la couche N

Nous voyons sur la figure III-26 que les zones en GaInAsP<sub>1.3µm</sub>, situées entre les rubans de photodiode et prolongées jusqu'au contact N, ont bien été protégées lors de la gravure. Nous pouvons de plus noter le retrait total du masque en silice.

## **Remarque :**

Le suivi interférométrique a permis de visualiser la présence de la couche d'arrêt d'AlInAs, ce qui nous permet après son retrait d'être sur la couche de confinement des guides en InP.

#### 6.5. Définition des guides optiques

Maintenant que nous avons défini la partie active du sommateur opto-hyperfréquence à savoir la photodiode PIN, nous allons réaliser la partie passive i.e les guides optiques (figure III-27 (c)). Une mauvaise définition de cette partie passive serait très dommageable pour la propagation de la lumière et engendrerait une augmentation des pertes par rayonnement. Elle est constituée, selon les configurations de sommateurs, de guides droits, de guides courbes et de coupleurs. La précision d'alignement requise entre chaque guide et la photodiode correspondante nous conduit à utiliser le masqueur électronique pour réaliser cette étape.



#### 6.5.1. Dessin du masque

**Figure III-27:** 4<sup>ème</sup> niveau de masquage (cas de la structure 7)

Les guides optiques, illustrés figure III-27 (b), sont constitués de trois couches :

- la couche d'InP définissant le ruban du guide notée pour la suite InP<sub>1</sub>
- la couche d'arrêt d'AlInAs permettant de contrôler la profondeur gravée
- la couche de confinement inférieur d'InP notée InP<sub>2</sub>

#### Dimensions des guides optiques :

La largeur des guides optiques est de  $4\mu m$  et l'espacement entre deux guides varie selon les structures de  $3\mu m$  à  $20\mu m$ .

#### 6.5.2. Rôle du masque de protection

Le masque doit :

- servir à définir les guides de 4μm de largeur
- protéger, lors de la gravure RIE du ruban du guide, les zones dopées N précédemment masquées lors du 3<sup>ème</sup> niveau (figure III-27 (a)) ainsi que les rubans P-I des photodiodes (2.6µm de hauteur).

Enfin, après cette gravure, son retrait doit être facilement réalisable afin de poursuivre le procédé de réalisation. Pour toutes ces raisons, nous allons utiliser comme précédemment un masque de protection en silice.

#### 6.5.3. Définition du masque

Une contrainte, inhérente à l'utilisation de l'écriture électronique et aux motifs à réaliser, nous oblige à utiliser une résine négative pour définir les guides, en effet le temps d'écriture serait beaucoup trop long dans le cas d'une résine positive. Le procédé employé repose sur l'utilisation de la résine négative électronique SAL 601 et d'un masque de protection en silice  $SiO_2$  [8].

Le tableau III-9 illustre l'enchaînement des étapes nécessaires à la définition des guides optiques:

- 159 -



**Tableau III-9 :** Enchaînement des étapes pour la gravure de la couche InP<sub>1</sub> des guides optiques

# 6.5.3.1. Définition du masque en SAL 601 (tableau III-9 (c))

La réalisation de cette étape nécessite de trouver la dose adaptée à notre composant afin d'obtenir une bonne reproduction des motifs originels. En effet une des difficultés à résoudre avec l'écriture électronique est de réduire au maximum les effets de proximité qui surviennent lors de l'écriture successive de deux zones très proches. Un effet de charge de la résine insolée crée une interaction entre ces zones et cela a pour conséquence immédiate une insolation partielle de la résine située dans cette zone qui ne sera donc pas révélée (figure III-28).



Écriture du deuxième guide

**Figure III-28 :** Schéma de l'effet de proximité lors de l'écriture au masqueur électronique : insolation partielle de la zone située entre les deux guides

Les deux paramètres à optimiser sont :

- > la dose d'écriture en  $\mu$ C/cm<sup>2</sup>
- le temps de révélation de la résine dans le développeur MF 322

Ne connaissant pas le comportement de cette résine lors de l'écriture électronique de nos motifs et l'influence des rubans de photodiode sur celle-ci, nous avons testé plusieurs doses d'écriture.

Il faut savoir que la qualité de l'inversion se révèle proportionnelle à la dose reçue par la résine. Cependant une dose trop forte encourage les effets de proximité. Une dose trop faible, quant à elle, ne peut réaliser une bonne inversion post-écriture de la résine, ce qui entraîne la disparition des motifs. Tout est donc question de compromis

# a) Dose de 8µC/cm<sup>2</sup>



Figure III-29: Vues au microscope optique du masque des guides défini en SAL 601

Nous observons sur la figure III-29 que les dimensions des motifs sont plus grandes que les dimensions théoriques et les angles mal définis. De plus nous pouvons remarquer que les effets de proximité sont importants pour une dose de  $8\mu$ C/cm<sup>2</sup>. Nous décidons donc de diminuer la dose d'écriture.

# b) Dose de 5µC/cm<sup>2</sup> et révélation pendant 50 mn



Figure III-30: Vues au microscope optique du masque des guides défini en SAL 601

La bonne définition du coupleur 2 vers 1, comme illustré figure III-30, montre que la dose de  $5\mu$ C/cm<sup>2</sup> est suffisante, cependant la structure 5 montre que la zone située entre deux guides rapprochés n'a pas été révélée. Il y a une interaction entre le faisceau électronique du

masqueur et les contacts métalliques. Nous avons donc décidé de modifier le masque en conséquence en imposant les coefficients de proximité adéquats à ces endroits.





Figure III-31: 4<sup>ème</sup> niveau de masquage associé aux masques 8 et 9 (cas de la structure 5)

Nous avons ainsi scindé le masque en trois parties, afin de tenir compte de la présence des contacts métalliques et par suite d'attribuer les coefficients de proximité adéquats aux masques 8 et 9 ; ces trois parties sont :

- la structure guidante loin des photodiodes (masque 4)
- la structure guidante près des photodiodes (proches des structures métalliques) (masque 8)
- la protection des couches dopées N située entre les rubans et le contact N (masque 9)



**Figure III-32:** Vues au microscope optique du masque des guides défini en SAL 601 avec le nouveau masque d'écriture après 50 mn de révélation

Désormais nous pouvons voir sur la figure III-32 que les effets de proximité sont inexistants, les dimensions bien respectées et que les angles très fins sont bien ouverts sans la moindre trace de résine dans les intersections.

Nous adopterons donc par la suite la dose de  $5\mu$ C/cm<sup>2</sup> assortie au nouveau masque d'écriture et à un temps de révélation de 50mn pour définir les guides optiques.

Le masque en résine négative électronique SAL 601 étant défini, nous allons le reporter sur la silice.

#### **6.5.3.2. Définition du masque en silice** (tableau III-9 (e))

Le transfert du masque défini en SAL 601 sur la silice se fait à l'aide du plasma fluoré  $CF_4/CHF_3$ . Une fois ce transfert de masque effectué, on enlève la résine qui pourrait lors de la gravure de l'InP se dégrader et rajouter un risque de micromasquage. Ce retrait de la SAL 601 se fait à l'aide d'un plasma oxygène.



Figure III-33: Photographies prises au microscope optique du masque des guides défini en silice

Sur la figure III-33, nous remarquons l'alignement précis des guides en  $SiO_2$  par rapport aux rubans des photodiodes ainsi que la protection des zones dopées N situées entre les contacts P et N.

L'opération suivante consiste donc à graver  $0.15 \ \mu m d' In P_1$  autour du masque de silice tout en s'arrêtant sur la couche d'arrêt d'AlInAs.

## 6.5.4. Définition des rubans des guides optiques en InP (tableau III-9 (g))

La définition des rubans des guides en InP se fait en utilisant le plasma classique de gravure RIE  $CH_4/H_2/Ar$ . La profondeur gravée est maîtrisée par l'emploi d'une couche d'arrêt d'AlInAs (50Å).



Figure III-34: Photographies de guides optiques prises au microscope optique

Nous observons sur la figure III-34 la bonne définition des guides optiques combinée à un alignement précis entre les guides et les photodiodes. De plus, nous pouvons noter que les zones en GaInAsP<sub>1.3µm</sub>, situées entre les rubans et prolongées jusqu'au contact de type N, ont bien été protégées lors ce cette gravure.

#### Remarque :

La couche d'arrêt d'AlInAs (50 Å) a été repérée lors du suivi interférométrique in situ dans le bâti de gravure RIE, ce qui nous permet après son retrait d'être sur la couche d'InP<sub>2</sub>.

#### 6.6. Gravure du mesa d'isolation

L'isolation électrique des composants est réalisée par la gravure de  $0.15\mu m$  d'InP, de  $0.12 \mu m$  de GaInAsP, qui constitue le cœur du guide, et de  $1\mu m$  de buffer en InP afin de descendre sur le substrat semi-isolant (figure III-35 (b)).

# 6.6.1. Dessin du masque



**Figure III-35:** 5<sup>ème</sup> niveau de masquage (cas de la structure 7)

# 6.6.2. Rôle du masque de protection

Lors de cette étape, le masque doit recouvrir la partie active de la photodiode, la hauteur des rubans étant désormais égale à 2.75µm, ainsi que la partie optique passive et ne pas être endommagé par le plasma de gravure RIE (figure III-35 (a)). Ayant eu de bons résultats lors de la gravure de la couche dopée N, nous allons employer exactement le même procédé pour définir le masque de protection. Ce procédé s'obtient par le report du masque défini par le tricouche de résines optiques LOR 10A-S1818 sur la silice.

## 6.6.3. Définition du masque

Le tableau III-10 illustre l'enchaînement des étapes nécessaires à la définition du mesa d'isolation:





**Tableau III-10 :** Enchaînement des étapes pour la définition du mesa d'isolation sur substratsemi-isolant

# 6.6.4. Réalisation du masque de protection en silice (tableau III-10 (e))

Sur la figure III-36, nous voyons la définition du mesa d'isolation par le masque en silice.



Figure III-36: Vues au microscope optique du mesa d'isolation défini par le masque en silice

Le masque en silice étant défini, nous pouvons procéder à la gravure jusqu'au substrat semiisolant.

## **6.6.5.** Définition du mesa d'isolation (tableau III-10 (g))

Nous avons gravé 0.15  $\mu$ m d'InP, 0.12  $\mu$ m de GaInAsP et 1 $\mu$ m du buffer InP à l'aide du plasma de gravure RIE classique CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/Ar .



**Figure III-37:** Vues au microscope optique du mesa d'isolation après les gravures sèche et humide

Nous remarquons sur la figure III-37 que l'isolation électrique de chaque composant a bien été réalisée. Nous pouvons de plus noter le retrait total du masque en silice.







**Figure III-38**: Photographies prises au MEB de différentes structures de sommateur avant l'étape de reprise des contacts P et N

Sur les photographies prises au MEB (figure III-38), différentes géométries de sommateurs basées sur le principe de photodiodes évanescentes sont représentées. Les guides optiques de largeurs 4  $\mu$ m sont ainsi surmontés par des photodiodes PIN. Le contact N, déporté par rapport au ruban P-I de la photodiode, repose sur la couche en GaInAsP<sub>1.3µm</sub> dopée N.

A ce niveau-là de réalisation, les composants sont terminés et font  $4\mu m$  de hauteur. Il faut dorénavant reprendre les contacts et déposer les plots de report des contacts de type P et N sur le substrat InP semi-isolant.

# 6.7. Définition de la reprise des contacts P et N

Cette étape a été traitée en détail dans la partie consacrée au verrou technologique et repose sur l'utilisation de la résine optique PMGI.

## 6.7.1. Support du pont d'interconnexion



#### 6.7.1.1. Dessin du masque

Figure III-39: 6<sup>ème</sup> niveau de masquage (cas de la structure 7)

# 6.7.1.2. Réalisation du support du pont d'interconnexion

Sur la figure III-40, nous pouvons voir le pont d'interconnexion défini en résine PMGI fluée et les ouvertures réalisées au dessus des zones de contact P et N.

#### Réalisation du sommateur opto-hyperfréquence



Figure III-40: Photographies prises au microscope optique du pont de PMGI après fluage

# 6.7.2. Définition du report des contacts P et N

Une fois le pont diélectrique réalisé, il reste à faire le report des contacts électriques qui sera effectué par électrolyse. Nous déposons 2µm d'or électrolysé.



# 6.7.2.1. Dessin du masque


**Figure III-41:** 7<sup>ème</sup> niveau de masquage (cas de la structure 7)



## 6.7.2.2. Réalisation technologique

Figure III-42: Photographies prises au microscope optique des contacts reportés

A ce stade de la réalisation, les contacts de type P ont été interconnectés et reportés sur le substrat semi-isolant à l'aide de ponts en PMGI SF19. Nous avons fait de même avec les contacts N, comme l'illustre la figure III-42.

## 6.7.3. Définition des ponts à air

Afin de réaliser les ponts à air, il ne reste plus qu'à retirer la résine de type PMGI, comme le représente la figure III-43 :



Figure III-43: Coupe schématique du composant après la définition des ponts à air

A ce stade de la réalisation, les contacts de type P ont été interconnectés et reportés sur le substrat semi-isolant à l'aide de ponts à air.



Structure 10 (8 voies)

Structure 13 (8 voies)

Figure III-44: Photographies prises au MEB de différentes structures finalisées

Sur les photographies prises au MEB (figure III-44), différentes géométries de sommateurs sont représentées. Le plot de report P déposé sur substrat semi-isolant vient interconnecter entre eux les contacts ohmiques de type P à l'aide de ponts à air. Sur la photographie de la structure 13, nous voyons concrètement que le contact métallique vient contacter le haut de chaque ruban de photodiodes. Le plot de déport N sur substrat semi-isolant vient également reprendre le contact de type N. Nous pouvons de plus remarquer le retrait total de la résine PMGI. Enfin nous pouvons noter que la hauteur finale du composant réalisé est de l'ordre de  $6\mu m$  !

A ce niveau de réalisation, les composants sont terminés et peuvent être caractérisés en partie électriquement. Les phases d'amincissement et de clivage seront nécessaires par la suite pour réaliser les caractérisations optiques.

#### 6.8. Caractérisations I (V)

Nous avons effectué des caractérisations I (V) sur ces premiers composants réalisés sur substrat semi-isolant (figure III-45).

#### 6.8.1. Résultats

Les mesures électriques I (V) obtenues ont été inattendues (figure III-45). En effet des courants d'obscurité très élevés ont été mesurés et des résistances de l'ordre de 100 k $\Omega$  ont été obtenues entre deux plots de report de type P déposés sur substrat semi-isolant.



Figure III-45: Mesures électriques I (V)

La valeur de la résistance obtenue entre 2 plots de report P, situés sur le substrat semi-isolant, est de 100 k $\Omega$ , alors qu'elle devrait être de l'ordre du M $\Omega$ , correspond à un dopage en surface du substrat égal à 10<sup>15</sup> at/cm<sup>3</sup>.

La caractéristique de la jonction P-N nous montre aussi clairement la présence d'une résistance parasite en parallèle sur la diode.

Nous avons dès lors cherché à expliquer ces phénomènes ; pour cela nous avons mené plusieurs expériences pour savoir quelle étape technologique détériorait les caractéristiques électriques des photodiodes :

- La présence d'un matériau conducteur sur tout le wafer semble l'explication la plus logique. Le seul matériau conducteur déposé pleine plaque au cours de ce procédé est l'or pulvérisé. Nous avons donc prolongé le temps d'immersion dans la solution d'attaque or (KI/I<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O) mais hélas sans résultat.
- Nous nous sommes demandés ensuite si les plots de report reposaient bien sur le substrat semi-isolant et non sur la couche de buffer en InP dopé à 10<sup>15</sup> at/cm<sup>3</sup>. Nous avons comparé les temps de gravure RIE avec les mesures effectuées au profilomètre, ce qui nous a permis de conclure que nous avions bien gravé 0.3µm dans le substrat semi-isolant.
- Nous avons ensuite comparé notre procédé de réalisation technologique avec celui qui a permis la fabrication de photodiodes éclairées par la tranche au laboratoire [4] et l'obtention de courant d'obscurité faible. La différence majeure entre ces deux procédés provient de l'utilisation systématique de gravures sèches RIE dans notre cas et notamment lors de la réalisation du ruban P-I de la photodiode. Il semblerait que des dégâts soient occasionnés par la gravure RIE [20], notamment dans le matériau GaInAs, qui modifient les propriétés électriques de cette couche [21]. Nous pensons donc que nos couches semiconductrices ont été dopées en surface par le carbone lors des gravures RIE CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/Ar. En effet, en épitaxie, le carbone est utilisé pour doper les matériaux soit de type P, soit de type N suivant les conditions. Ainsi la couche

intrinsèque GaInAs, élément primordial d'une photodiode PIN, serait dopée P en surface, ce qui engendreraient des courants de fuite surfaciques sur les bords du ruban P-I et par suite une augmentation du courant d'obscurité par la création d'une résistance en parallèle sur la jonction. Le substrat InP semi-isolant, quant à lui, deviendrait conducteur de type N, ce qui expliquerait les valeurs des résistances mesurées entre deux plots métalliques indépendants.

La solution serait donc de graver chimiquement les zones contaminées par ce dopage involontaire. L'attaque chimique devrait restaurer les propriétés électriques de la zone intrinsèque et du substrat semi-isolant qui ont été endommagées lors des gravures sèches, si ces dommages ne sont que superficiels.

#### 6.8.2. Gravures chimiques

Nous devons donc sous-graver chimiquement la couche GaInAs n.i.d et graver le substrat InP semi-isolant.

#### 6.8.2.1. Couche de GaInAs n.i.d

Nous avons plongé le wafer dans une solution  $H_3PO_4/H_2O_2/H_2O$  (5/1/40) [22], composée d'acide phosphorique et d'eau oxygénée, le tout dilué dans de l'eau, qui grave le GaInAs et est sélective par rapport à l'InP. Cependant, les mesures I (V) n'ont pas montré de changement notable; nous pensons que les ponts d'interconnexion métallisés empêchent la sous-gravure de s'effectuer.

Nous avons donc décidé d'enlever les ponts de report métallisés à l'aide de la solution d'attaque or  $(KI/I_2/H_2O)$  et nous avons recommencé l'attaque chimique précédente. Nous avons alors obtenu une amélioration notable des caractéristiques I (V), comme le montre la figure III-46.



**Figure III-46:** Mesures électriques I (V)

Cependant les guides définis en InP ont été également gravés lors de cette étape malgré la sélectivité infinie présumée de l'attaque chimique. Nous avons tout de même continué afin de voir l'influence de la gravure chimique du substrat semi-isolant sur les caractéristiques. Après la sous-gravure de la couche de GaInAs, nous obtenons toujours une résistance de 100 k $\Omega$  entre deux plots de report P.

### 6.8.2.2. Substrat InP semi-isolant

Nous avons protégé les composants (partie passive et active) par un masque en résine avant de plonger le wafer dans une solution composée d'acide phosphorique et d'acide chlorhydrique  $H_3PO_4/HCl$  [23] gravant l'InP. Nous avons obtenu une amélioration notable des caractéristiques I (V), mais toutefois insuffisante pour l'application envisagée.

De plus, la gravure des rubans des guides optiques définis en InP lors de l'étape de sousgravure de la couche de GaInAs (I) nous oblige à recommencer un nouveau procédé de réalisation.

## 7. Conclusion

En tenant compte des problèmes rencontrés avec nos photodiodes réalisées entièrement en gravure sèche, et à la lumière des différents résultats obtenus en gravures chimiques, nous avons donc décidé de relancer un nouveau procédé de réalisation technologique.

- 177 -

Nous proposons de combiner la gravure sèche RIE à la gravure humide lors de l'étape de définition du ruban P-I. L'anisotropie sera ainsi assurée par la gravure de la moitié de la couche de GaInAs intrinsèque (I) par RIE puis l'homogénéité de la profondeur de gravure sera ensuite réalisée avec la solution chimique ( $H_3PO_4/H_2O_2/H_2O$ ) lors de la fin de la gravure de la couche de GaInAs. Cette attaque chimique, sélective sur InP, permettra également de restaurer les propriétés électriques du GaInAs, qui a été endommagé lors la gravure RIE.

Nous procéderons de la même manière en employant les solutions chimiques adéquates lors des étapes de gravure suivantes : définition de la couche en GaInAsP dopée N et du mesa d'isolation.

Nous avons modifié l'épitaxie en conséquence afin d'introduire de nouvelles couches d'arrêt indispensables lors des gravures chimiques. Etant donnée la complexité de réalisation du sommateur opto-hyperfréquence sur substrat semi-isolant, nous avons également utilisé une épitaxie identique sur substrat dopé  $N^+$ .

#### Préambule

Lors de la réalisation du recuit-flash du contact P sur la nouvelle plaque sur substrat semiisolant, nous avons récupéré la plaque de couleur cramoisie. Le refroidissement lors de cette étape ne s'est pas effectué dans les conditions normales et les mesures I (V) ont montré que les contacts P n'étaient plus viables. Nous ne présentons donc dans cette deuxième partie que le procédé de réalisation du sommateur opto-hyperfréquence sur substrat N<sup>+</sup>.

# B. Réalisation du sommateur sur substrat dopé $N^+$

## 1. Structure épitaxiale réalisée sur substrat dopé N<sup>+</sup>

La structure épitaxiale (tableau III-11) a été réalisée par l'équipe Epitaxie de l'I.E.M.N dirigée par F. Mollot sur un substrat de deux pouces de diamètre dans le bâti d'épitaxie par jets moléculaires source gaz (MBE).

Couche	Matériau	Dopage (at/cm <sup>-3</sup> ) / Type	Epaisseur (Å)
Contact	GaInAs	$1.10^{19} / p^{++}$	1000
<u> </u>	InP	$1.10^{18}/\mathrm{p}^+$	5000
Espaceur	GaInAs	$1.10^{18}/p^+$	100
I	GaInAs	- / i	11000
Espaceur	GaInAs	$1.10^{18}/n^+$	100
Couche d'arrêt	InP	$1.10^{18}/n^+$	200
Ν	GaInAsP <sub>1.3µm</sub>	$1.10^{18}/n^+$	4000
Ruban du guide	InP	$1.10^{18} / n^+$	1500
Couche d'arrêt	AllnAs	$1.10^{18}/n^+$	50
Confinement supérieur	InP	$1.10^{18} / n^+$	1500
Couche guidante	GaInAsP <sub>1.3µm</sub>	$1.10^{18}/n^+$	1200
Buffer	InP	$1.10^{18} / n^+$	1000
Substrat	InP	$1.10^{18} / n^+$	350 µm

**Tableau III-11 :** Epitaxie du sommateur réalisée sur substrat dopé N<sup>+</sup>

Les modifications apportées par rapport à l'épitaxie précédente (tableau III-1) sont les suivantes:

✓ Une couche d'arrêt d'InP a été introduite entre la zone intrinsèque GaInAs et la couche dopée N en GaInAsP et sera utilisée lors de la gravure chimique de la zone intrinsèque. La sélectivité de la gravure chimique sur l'InP nous permettra de nous arrêter exactement sur la couche d'InP et d'assurer une bonne homogénéité de gravure

sur le wafer entier, contrairement à la gravure RIE. En effet, nous avions ainsi obtenu une différence d'épaisseur de 0.25µm entre le centre et les bords du wafer lors de la gravure sèche du ruban P-I de la photodiode.

 Nous avons enlevé la couche d'arrêt d'AlInAs présente initialement entre la couche de GaInAsP<sub>1.3µm</sub> dopée N et le ruban du guide en InP. Elle est désormais inutile du fait de la sélectivité de la solution chimique utilisée sur l'InP.

Nous avons également conservé la couche d'arrêt d'AlInAs entre les deux couches d'InP du guide afin d'obtenir une bonne définition du ruban du guide optique lors de la gravure sèche qui sera utilisée lors de cette étape.

Nous pouvons de plus remarquer que toutes les couches situées en dessous de la zone intrinsèque I définie en GaInAs sont dopées  $N^+$ .

# 2. Récapitulatif des étapes technologiques sur substrat dopé $N^+$

Le procédé de réalisation sur substrat dopé N est simplifié par l'absence des trois étapes technologiques suivantes (dépôt du contact de type N, définition de la zone située entre les contacts P et N et du mesa d'isolation) par rapport à celui sur substrat semi-isolant. Cependant, le dépôt du contact N se fera dans ce cas en face arrière après amincissement et sera une étape périlleuse étant donnée l'extrême fragilité des wafers amincis à 150 $\mu$ m. Le tableau III-12 illustre les principales étapes technologiques nécessaires à la réalisation des sommateurs opto-hyperfréquences sur substrat dopé N<sup>+</sup>.





**Tableau III-12 :** Description schématique des étapes de réalisation dans le cas d'unsommateur opto-hyperfréquence à 2 voies réalisé sur substrat  $N^+$ 

## 1. Dépôt des contacts ohmiques de type P

Les contacts ohmiques de type P sont déposés sur la couche dite de contact en GaInAs fortement dopée  $P^{++}$ . Ces contacts ohmiques sont constitués de la séquence de métaux suivante :

### 2. Gravure du ruban de la photodiode (P et I)

La gravure du ruban se fait de façon auto-alignée par rapport aux contacts ohmiques de type P. Il s'agit ici de graver une épaisseur totale de  $1.7\mu m$  et de s'arrêter sur la couche de GaInAsP<sub>1.3µm</sub> dopée N. Le ruban à graver est constitué de :  $0.1\mu m$  de GaInAs (P<sup>+</sup>), de  $0.5\mu m$  d'InP (P) et 1.1µm de GaInAs (I).

## 3. Gravure de la couche dopée N<sup>+</sup>

Il s'agit ici de :

- graver la couche de GaInAsP<sub>1.3µm</sub> dopée N (0.4µm) de façon auto-alignée par rapport au contact P
- arrêter la gravure exactement sur la couche d'InP définissant le ruban du guide

## 4. Définition des guides optiques

Lors de cette étape, nous définissons la partie optique passive du sommateur. L'utilisation d'une couche d'arrêt d'AlInAs se révèle nécessaire afin de contrôler la profondeur de gravure (0.15µm d'InP).

#### 5. Définition du plot de report des contacts P

Etant sur substrat  $N^+$ , nous définissons un plot en résine (SU-8) sur lequel reposera le plot d'épaississement de type P.

## 6. Support du pont d'interconnexion pour la reprise des contacts de type P

Nous définissons lors de cette étape le pont en résine PMGI reliant le plot de report (SU-8) aux contacts de type P.

## 7. Report des contacts de type P

A ce stade de la réalisation du composant, il reste à déposer les plots de report des contacts ohmiques de type P. Ces plots d'épaississement sont déposés sur le plot en résine (SU-8).

#### 8. Définition des ponts à air

La réalisation du pont à air permet de minimiser les capacités parasites du composant et se fait en supprimant le pont d'interconnexion défini lors de l'étape de reprise de contact.

## 9. Dépôt du contact N en face arrière

Ce dépôt est réalisé après l'étape d'amincissement du wafer. Le contact de type N est déposé face arrière par évaporation. A ce stade de la réalisation, les composants sur substrat  $N^+$  sont terminés.

## 3. Description des masques

Pour réaliser les sommateurs opto-hyperfréquences sur substrat  $N^+$ , cinq étapes lithographiques sont nécessaires ; les deux premières se faisant à l'aide du masqueur électronique (tableau III-13).

N° de lithographie	Etape	Utilisation
1	Dépôt contact P	<ul> <li>Dépôt contact P (1)</li> <li>Gravure du ruban P-I-N (2.2µm) (2) et (3)</li> </ul>
2	Définition des guides	• Gravure du ruban (0.15µm) (4)
3 et 4	Reprise du contact P	<ul> <li>Définition du plot de report P (5)</li> <li>Définition des ponts d'interconnexion et des ouvertures au-dessus des contacts P (6)</li> </ul>
5	Report des contacts P	• Dépôt des plots de report P (7)

**Tableau III-13 :** Récapitulatif des masques permettant la réalisation du sommateur sursubstrat  $N^+$ 

## 4. Description détaillée des étapes

Etant donné que le procédé de réalisation technologique sur substrat dopé  $N^+$  est similaire à celui sur substrat semi-isolant, nous ne détaillerons que les étapes modifiées par rapport au premier procédé de fabrication.

## 4.1. Gravure du ruban de la photodiode (P et I)

Cette étape consiste à définir le ruban des photodiodes et consiste donc à graver les couches dopées  $P^+$ , ainsi que la zone intrinsèque (I) comme illustré sur la figure III-47. Le ruban à graver de façon auto-alignée est donc constitué de : 0.1µm de GaInAs ( $P^+$ ), de 0.5µm d'InP (P) et 1.1µm de GaInAs (I) soit une épaisseur totale de 1.7µm. Nous devons en outre arrêter la gravure sur la couche de GaInAs $P_{1.3µm}$  dopée N.



Figure III-47: Coupe schématique du composant après la gravure du ruban P-I

Le ruban P-I formé doit répondre aux exigences suivantes :

- Comme les photodiodes doivent être de faible capacité et de petite taille (4\*35µm), la gravure doit être anisotrope afin d'assurer un contrôle précis des dimensions
- Les courants de fuite, consécutifs aux dommages engendrés par la gravure, aux redépôts ou à l'oxydation des flancs de la zone intrinsèque GaInAs, doivent être éliminés
- Malgré l'épaisseur totale importante à graver (1.7µm), les inhomogénéités d'épaisseur doivent être les plus faibles possibles afin d'assurer une définition précise et homogène des rubans P-I des photodiodes sur toute la plaque.

A la lumière des résultats précédents, nous proposons donc de combiner la gravure sèche RIE à la gravure humide lors de cette étape.

L'anisotropie et le contrôle des côtes sont ainsi assurés par une gravure RIE  $CH_4/H_2/Ar$ , contrôlée in situ par un suivi interférométrique laser, permettant de s'arrêter au milieu de la couche GaInAs intrinsèque. La gravure est terminée avec une solution chimique sélective sur InP ( $H_3PO_4/H_2O_2/H_2O$ ). Cette gravure chimique permet également de restaurer le GaInAs électriquement actif, qui a été endommagé par la gravure RIE.

L'utilisation de la fine couche d'arrêt en InP permettra notamment une bonne homogénéisation de la profondeur de gravure.

## 4.1.1. Gravure sèche RIE

Nous avons effectué 11 cycles de gravure de 10 minutes dans le plasma CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/Ar, associés à 11 cycles de 3 minutes de plasma oxygène afin d'éliminer les polymères formés au cours de la gravure. Lors du 1<sup>er</sup> procédé technologique, nous avions effectué 18 cycles de gravure afin de définir les rubans P-I des photodiodes.

Nous contrôlons l'homogénéité des profondeurs gravées sur le wafer entier au profilomètre (tableau III-14).

structure	1	6	9	14
Profondeur (µm)	1.53	1.57	1.56	1.55

Tableau III-14 : Profondeurs mesurées au profilomètre

Le contact P ayant une épaisseur de  $0.45\mu m$ , nous avons donc gravé  $1.1 \mu m$  de matériaux semi-conducteurs dont  $0.5\mu m$  de GaInAs intrinsèque. Il reste donc  $0.6\mu m$  de GaInAs à graver chimiquement.

## 4.1.2. Gravure chimique du GaInAs

La fin de la gravure de la couche de GaInAs est réalisée avec la solution chimique  $H_3PO_4/H_2O_2/H_2O$  sélective sur InP.

Le suivi de cette gravure s'effectue visuellement, en effet le profil de gravure est concentrique i.e la gravure chimique du GaInAs se fait du bord du wafer vers le centre. Quand le cercle disparaît, la gravure est terminée et l'homogénéisation des épaisseurs gravées est assurée par la sélectivité de la gravure par rapport à la couche d'arrêt d'InP (200Å).

Nous contrôlons l'homogénéité des épaisseurs gravées sur le wafer entier au profilomètre (tableau III-15).

structure		б	9	14
Epaisseur (µm)	2.15	2.16	2.16	2.15

Tableau III-15 : Epaisseurs mesurées au profilomètre

Les épaisseurs mesurées au profilomètre confirment cette homogénéité de gravure et l'utilité de la couche d'arrêt.

## 4.1.3. Retrait de la couche d'arrêt d'InP

Le retrait de cette couche d'arrêt d'InP est réalisé avec une solution chimique, composée d'acide phosphorique et d'acide chlorhydrique,  $H_3PO_4/HCl$  et sélective par rapport au GaInAsP<sub>1.3µm</sub> (définissant la couche N).

Cette gravure s'accompagne d'un dégagement gazeux et est caractérisée par un effet effervescent. La gravure est terminée lorsque cet effet disparaît à la surface du wafer.

## 4.1.4. Caractérisations I(V)

Après la gravure de la couche d'arrêt, nous avons effectué des mesures sous pointes I (V) (figure III-48).



Figure III-48: Mesures électriques I (V)

Nous avons obtenu un comportement I (V) de type MSM entre deux contacts P et une caractéristique de jonction P-N classique entre un contact P et la couche de GaInAsP<sub>1.3µm</sub> dopée N.

Ces mesures confirment l'intérêt d'utiliser la gravure chimique après la longue gravure sèche permettant ainsi de restaurer les propriétés électriques du GaInAs (I) lors de la définition des rubans P-I des photodiodes.

#### 4.2. Gravure de la couche dopée N

Etant sur substrat N<sup>+</sup>, aucune étape lithographique n'est nécessaire pour cette étape puisque la gravure se fait de façon auto-alignée par rapport aux contacts ohmiques de type P. La couche de GaInAsP<sub>1.3µm</sub> dopée N sera gravée au 3/4 en RIE à l'aide du plasma CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/Ar, puis terminée avec une gravure chimique H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O sélective sur InP (définissant le ruban du guide).

#### 4.2.1. Gravure sèche RIE

Nous gravons approximativement  $0.3\mu m$  de GaInAsP à l'aide du plasma CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/Ar pendant 30 minutes.

Nous contrôlons l'homogénéité des épaisseurs gravées sur le wafer entier au profilomètre (tableau III-16).

structure	1	6	9	14
Epaisseur (µm)	2.39	2.42	2.46	2.48

Tableau III-16 : Epaisseurs mesurées au profilomètre

Il existe une inhomogénéité des épaisseurs gravées, nous avons ainsi gravé entre 0.24 et  $0.33\mu m$  de GaInAsP<sub>1.3µm</sub>. Il reste donc entre 700 et 1600 Å de GaInAsP<sub>1.3µm</sub> à graver chimiquement.

## 4.2.2. Gravure chimique

La fin de la gravure est réalisée avec la solution chimique H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O sélective sur InP.

Nous contrôlons l'homogénéité des épaisseurs gravées sur le wafer entier au profilomètre (tableau III-17).

structure	1	6	9	14
Epaisseur (µm)	2.55	2.55	2.54	2.54

 Tableau III-17 : Epaisseurs mesurées au profilomètre

La mesure des épaisseurs au profilomètre confirme une bonne homogénéité de gravure et la sélectivité de la gravure chimique sur la couche d'InP définissant le ruban des guides.

## 4.2.3. Caractérisations I (V)

Après la gravure de la couche de GaInAsP<sub>1.3µm</sub> dopée N, nous avons effectué des mesures sous pointes I (V) sur nos composants (figure III-49). Nous avons ainsi caractérisé la jonction P-N de nos photodiodes.



Figure III-49: I (V) entre un contact P et la couche d'InP dopée N

La courbe obtenue nous montre un comportement classique en direct et en inverse de la jonction P-N caractérisée.

### 4.3. Définition des guides optiques

Le procédé utilisé sur substrat N+ est exactement le même que celui sur substrat semi-isolant et a été traité en détail dans la partie A.6.5. Il repose sur l'utilisation de la résine électronique négative SAL 601.

### 4.4. Reprise des contacts P

Le procédé de reprise des contacts de type P est sensiblement le même que celui sur substrat semi-isolant sauf que comme nous sommes sur substrat dopé  $N^+$ , les plots de contact de type P ne peuvent être reportés sur celui-ci. Nous créons donc des structures artificielles de report qui vont soutenir les plots de contact de type P.

La technologie que nous avons mis au point est globalement fondée sur :

• la définition des plots de report en résine optique

- la définition du support du pont d'interconnexion en résine PMGI fluée
- la réalisation d'un contact électrolysé assurant le pont d'interconnexion et le plot de contact
- le retrait de la résine PMGI fluée afin de réaliser un pont à air

#### 4.4.1. Définition des plots de report P

Les exigences pour ces plots de report sont :

- une bonne tenue mécanique
- une insensibilité aux solvants (acétone, alcool, révélateurs de résine photosensible) pouvant être utilisés dans la suite du processus technologique





Figure III-50: 3<sup>ème</sup> niveau de masquage (cas de la structure 7)

### 4.4.1.2. Lithographie optique

Pour répondre aux exigences imposées, nous avons retenu un polymère de type SU-8 qui a aussi l'avantage d'être une résine photosensible négative. Cette résine, en fait, est couramment utilisée dans la technologie des microsystèmes pour sa robustesse et convient donc parfaitement pour notre application.

Nous avons utilisé la formulation SU8-2002 **[24]** de cette résine qui permet de déposer un film dont l'épaisseur est égale à 2.7µm. La surface du plot de report est un peu plus grande que la surface du plot d'épaississement du contact P.

L'épaisseur de SU8 déposée est en relation directe avec la capacité parasite engendrée (se référer au paragraphe B.3.2.4 du chapitre 2).

A ce stade de réalisation, des plots de report en SU-8 sont donc disponibles en surface du semiconducteur pour le dépôt des métallisations de connexion. Ils sont espacés des contacts P d'environ une dizaine de microns.

## 4.4.2. Support des ponts d'interconnexion entre le plot de report et les contacts

La technique de réalisation des ponts d'interconnexion est celle présentée dans la partie consacrée au verrou technologique. Les ponts réalisés en PMGI permettent de relier les contacts P aux plots de report P définis en SU-8.

#### 4.4.2.1. Dessin du masque



**Figure III-51:** 4<sup>ème</sup> niveau de masquage (cas de la structure 7)

## 4.4.2.2. Lithographie optique

Sur la figure III-52, nous voyons le pont d'interconnexion en résine PMGI ouvert au dessus des contacts P, et reliant ceux-ci au plot de report P défini en SU-8.



Figure III-52 : Photographies prises au microscope optique du pont de PMGI après fluage

Sur les photographies prises à l'aide du FIB (figure III-53), nous observons que la résine PMGI est bien ouverte au dessus des contacts P et que le pont relie bien ces contacts P au plot de report défini en résine optique SU8.



Figure III-53 : Photographies prises au FIB du pont de PMGI après fluage

## 4.4.3. Report des contacts P

La réalisation des plots de contact P se fait comme détaillée précédemment (partie A.5.2) :

- ♦ définition d'une couche d'accrochage d'or (400 Å) par pulvérisation
- définition des moules en résine optique AZ4562

- ♦ dépôt électrolytique de 2µm d'or
- ♦ retrait des couches de résine AZ4562 et d'accrochage en or





Figure III-54 : 5<sup>ème</sup> niveau de masquage (cas de la structure 7)



## 4.4.3.2. Lithographie optique/électrolyse

Figure III-55 : Photographies prises au microscope optique des contacts reportés sur le plot de report

A ce stade de la réalisation, les contacts de type P ont été interconnectés et reportés sur le support défini en SU-8 à l'aide de ponts en PMGI SF19 (figure III-55).

## 4.4.3.3. Caractérisations I(V)

Après avoir défini les plots de déport de type P, nous avons effectué des mesures sous pointes I(V) sur nos composants (figure III-56).



Figure III-56 : Mesures électriques I (V) entre les contacts P reportés et l'InP dopé N<sup>+</sup>

La courbe obtenue nous montre un comportement classique en direct et en inverse de la jonction P-N caractérisée.

#### 4.4.4. Définition des ponts à air

L'obtention de ponts à air est assez simple. Il suffit juste de plonger pendant 3 heures le wafer dans l'EBR PG qui est le solvant de la PMGI SF19.

A ce stade de la réalisation, les contacts de type P ont été interconnectés et reportés sur le support défini en SU-8 à l'aide de ponts à air.



Structure 13 (8 voies)

Zoom sur la structure 13 (8 voies)

Figure III-57 : Photographies prises au MEB de différentes structures finalisées

Sur les photographies prises au MEB (figure III-57), différentes géométries de sommateurs sont représentées. Nous pouvons voir les guides optiques de largeurs 4µm surmontés par des photodiodes PIN. Les plots de contact P déposés sur le support défini en résine SU-8 viennent interconnecter entre eux les contacts ohmiques P à l'aide de ponts à air.

## 4.5. Caractérisations I (V)

Après avoir défini les ponts à air, nous avons effectué des mesures sous pointes I(V) sur nos composants (figure III-58).

#### Réalisation du sommateur opto-hyperfréquence



**Figure III-58 :** Mesures électriques I (V) entre les contacts P reportés et l'InP dopé N<sup>+</sup>

La courbe obtenue nous montre une caractéristique classique de jonction P-N.

A ce niveau de réalisation, il reste à déposer le contact N en face arrière après la phase d'amincissement.

#### 4.6. Amincissement

L'amincissement est une étape cruciale car de sa bonne réalisation dépendra en partie le clivage des composants.

L'épaisseur du substrat est d'environ 400 $\mu$ m et il faut l'amincir jusqu'à 150 $\mu$ m pour réussir des clivages corrects. Nous déposons une couche épaisse de résine AZ4562 pour protéger les composants face avant. L'échantillon est ensuite collé face avant sur un support en verre à l'aide d'une cire, ce qui permettra ensuite de manipuler la plaquette amincie. Pour assurer cette étape, nous disposons d'une machine de collage sous vide. Le tout s'insère et est maintenu par aspiration dans un support de polissage. L'amincissement se fait dans un premier temps par un rodage mécanique sur un disque de quartz, à l'aide d'une poudre d'alumine, en suspension dans de l'eau désionisée, de granulométrie variable allant de 15 $\mu$ m à 3 $\mu$ m. La qualité de la face rodée est dépendante de la vitesse de gravure. Des vitesses de gravure trop importantes peuvent induire des défauts qui se traduisent parfois par une fissure de la plaque. Nous commençons avec une poudre d'alumine de granulométrie 15 $\mu$ m qui permet d'amincir le substrat à la vitesse de 5 $\mu$ m/min. A 100 $\mu$ m de l'épaisseur désirée, on passe à une granulométrie plus fine (3 $\mu$ m) afin de contrôler la fin de gravure et l'état de surface. A 10 $\mu$ m de l'épaisseur finale, on réalise un polissage en utilisant un plateau recouvert

de feutrine et une solution d'hypochlorite de soude (eau de javel). Cette étape prend fin lorsqu'on atteint une qualité proche du poli « miroir ».

Le décollage se fait par dissolution de la cire dans la solution « Non Solvent Cleaning Fluid » chauffée à 70°C, puis la plaque est plongée dans une solution d'acétone pour dissoudre la couche de résine AZ4562 protectrice.

#### 4.7. Dépôt du contact N face arrière

Après la phase d'amincissement, le maniement de la plaque est particulièrement délicat. Nous collons l'échantillon face avant sur un substrat silicium 3 pouces à l'aide de la résine épaisse AZ4562. Nous procédons au dépôt du contact métallique pleine plaque face arrière par évaporation. Si nous ne déposons que de l'or, il y a de fortes chances que ce dernier n'adhère pas à l'InP. Aussi, pour prévenir ce risque, nous utilisons une couche d'accrochage en titane qui nous assurera une adhérence sur ce matériau.

La séquence déposée est donc la suivante : Ti / Au (300 / 4000 Å)

Les échantillons sont ensuite décollés du substrat silicium, nettoyés et prêts pour le clivage.

#### 4.8. Clivage

Afin d'assurer une bonne injection, nous devons définir des facettes d'entrée et de sortie des guides les plus parfaites possibles. La plaque amincie à 150 µm est particulièrement fragile. Une simple amorce permettra d'initialiser le clivage. Le clivage du matériau va se faire selon les plans denses du réseau cristallographique Zinc Blende identifié sur le substrat par les méplats par rapport auxquels les composants ont été alignés lors du 1<sup>er</sup> niveau de masquage électronique.

Pour effectuer cette opération, le substrat est placé sur un film autocollant et l'amorce est réalisée à l'aide d'une pointe diamant. Nous travaillons sous une loupe binoculaire et sur un dispositif de micro-positionnement pour définir la position du trait de cette amorce. Une fois l'amorce réalisée, nous recouvrons le substrat face avant d'un deuxième film autocollant et transparent. Le substrat est alors bien maintenu dans ce sandwich de films. Nous plaçons ensuite l'amorce de l'échantillon sur une arête et nous exerçons une légère contrainte vers le bas.

# **C.** Conclusion

Les deux procédés de réalisation technologique employés au cours de ce travail nous ont permis de tirer de nombreux enseignements :

- l'écriture électronique lors de la première étape a permis d'obtenir une excellente définition des marques d'alignement nécessaires pour réaliser les étapes suivantes,
- la couche sacrificielle de titane s'est révélée satisfaisante pour protéger la séquence métallique du contact ohmique de type P lors de la gravure sèche du ruban P-I de la photodiode,

- l'utilisation de ce masque métallique lors de la gravure RIE a engendré la présence d'aspérités verticales qui pourraient être néfastes dans le cadre d'un guide type mesa,
- l'emploi d'un masque en silice SiO<sub>2</sub> est conseillé lors des gravures sèches car, en plus de sa résistance au plasma et de son retrait total facile, les flancs de gravure obtenus ne sont pas rugueux,
- nous déconseillons fortement l'emploi de masque en résine lors de gravures sèches surtout si le masque doit recouvrir des zones métalliques car son retrait total est difficile,
- les couches d'arrêt d'AlInAs ont permis de contrôler la profondeur de gravure avec exactitude lors des gravures sèches, et elles permettent de plus d'atténuer les inhomogénéités de gravure et d'améliorer l'état de surface,
- la présence de zones métalliques interfère lors de l'écriture électronique,

- nous avons mis point un procédé reproductible permettant la reprise des contacts sur des composants « hauts ». Ce processus est adaptable à tous les composants quelles que soient leurs dimensions et le type de substrat dopé ou semi-isolant,
- la gravure sèche RIE cause des dégâts en surface des matériaux et par suite modifie les propriétés électriques des couches. Une attaque chimique est indispensable afin de restaurer ces propriétés,
- nous avons validé le nouveau procédé de réalisation sur substrat N<sup>+</sup>. Nous n'avons pu le valider sur substrat semi-isolant mais il devrait, a priori, apporter les mêmes conclusions.

Après la phase de clivage et après avoir vérifié les caractéristiques I(V) des diodes, 35 composants réalisés sur substrat  $N^+$  sont caractérisables. Ceux-ci permettront de caractériser toutes les structures envisagées mises à part les structures 10 et 14 (sommateurs à 8 voies). En effet ces dernières n'ont pu être menées à leur terme du fait de problèmes technologiques ou rencontrés lors du clivage.

Les composants réalisés sur substrat N<sup>+</sup> sont donc prêts à être caractérisés d'un point de vue optique.

Nous avons également obtenu des caractéristiques I(V) satisfaisantes sur quelques composants réalisés sur substrat semi-isolant, ce qui nous autorisent à réaliser des caractérisations électriques statiques et dynamiques (mesures C(V) et détermination des paramètres S) sur ces structures. Néanmoins, comme nous l'avons indiqué en conclusion du  $1^{er}$  procédé de réalisation technologique, les guides optiques ont été détériorés lors des étapes de sous-gravures chimiques, ce qui nous ne permet pas de caractériser ces structures d'un point de vue optique.

## REFERENCES

[1] G. Ulliac, S. Garidel, J.P. Vilcot and P. Tilmant

Metallic air-bridge report process for non-planar compound semiconductor devices Microelectronic Engineering, 2005, Vol. 81, pp. 53-58

[2] A. Umbach, D. Trommer, G.G. Mekonnen, W. Ebert, G. Unterborsch Waveguide integrated 1.55µm photodetector with 45 GHz bandwidth Electronics Letters, 1996, Vol.32, N°23, pp.2143-2145

[3] S.H. Hsu, F.G. Johnson, S.A. Tabatabaei, S. Agarwala, J.V. Hryniewicz, F.J. Towner, Y.J. Chen, D.R. Stone

InGaAs/InP p-i-n heterostructure photodiode arrays on AlGaAs/GaAs waveguide films by solid source molecular beam epitaxy

IEEE International Symposium, 1997, pp.409-412

[4] M. Fendler

**Composants de type guide d'ondes sur InP pour télécommunications mixtes fibre-radio** Thèse, Université Lille 1, 1999

[5] G.A. Patrizi, M.L. Lovejoy, P.M. Enquist, R.P. Schneider Jr, H.Q. Hou Multi-level interconnects for heterojunction bipolar transistor integrated circuit technologies

Thin Solid Films, 1996, 290-291, pp. 435-439

[6] F. Xia, J.K. Thomson, M.R. Gokhale, P.V. Studenkov, J. Wei, W. Lin, S.R. Forrest An asymmetric twin-waveguide high-bandwidth photodiode using a lateral taper coupler

IEEE Photonics Technology Letters, 2001, Vol.13, pp. 845-847

[7] R.J. Deri, W. Doldissen, R.J. Hawkins, R. Bhat, J.B. Soole, L.M. Schiavone, M. Seto, N. Andreadakis, Y. Silberberg, M.A. Koza
 Efficient vertical coupling of photodiodes to InGaAsP rib waveguides
 Applied Physics Letters, 1991, Vol.58, pp. 2749-2751

[8] K. Blary

Matrices de commutation optique sur InP Thèse, Université Lille 1, 2003

[9] S. Garidel, J.P. Vilcot, M. Zaknoune, P. Tilmant Versatile bondpart report process for non-planar compound semiconductor devices Microelectronic Engineering, 2004, Vol. 71, pp. 358-362

[10] www.microchem.com/products/pdf/pmgi\_resist.pdf

[11] S. Boret

Circuits intégrés en technologie coplanaire pour des applications de réception jusqu'à 110 GHz

Thèse, Université Lille 1, 1999

[12] www.microchem.com/products/pdf/ebr.pdf

[13] J. Van De Casteele

**Etude et réalisation de transducteurs opto-hyperfréquences sur matériaux III-V** Thèse, Université Lille 1, 2 octobre 1996

[14] A. Fathimulla, T. Loughran, J. Bates

**Reactive Ion etching of indium-based III-V materials using CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>-Ar mixtures Material Research Society Symposium Proceedings, 1989, Vol. 144, pp. 501-506** 

[15] J.E. Schramm, E.L. Hu, J. Merz

Highly selective reactive ion etch process for InP-based device fabrication using methane/hydrogen/argon

Journal of Vacuum Science and Technology, 1993, B11(6), pp. 2280-2283

[16] I. Cayrefourcq

Conception et fabrication de matrices de commutation optiques en vue de la réalisation de modules de synthèse de retards temporels

Thèse, Université Lille 1, 1998

[17] C.S. Whelan, T.E. Kazior, K.Y. Hur

High rate CH<sub>4</sub> : H<sub>2</sub> plasma etch processes for InP

Journal of Vacuum Science and Technology, 1997, B15(5), pp. 1728-1732

[18] Y. Hernandez

Etudes technologiques, expérimentales et par simulation pour la commutation optique sur InP

Thèse, Université Lille 1, 2001

[19] www.microchem.com/products/pdf/lor\_data\_sheet.pdf

International conference on InP and related materials, 1996, pp. 115-118

## [21] S. Demiguel

Photodiodes rapides à adaptateur de mode intégré pour les liaisons optiques/radiofréquences à 60 GHz et les transmissions numériques à 40 Gb/s Thèse, Université Rouen, 2001

[22] A. Stano

**Chemical Etching Characteristics InGaAs/InP and InAlAs/InP** Journal of the Electrochemical Society, 1987, Vol. 134, n°2, pp. 448-452

[23] A.R. Clawson

**Guide to reference on III-V semiconductor chemical etching** Materials Science and Engineering, 2001, Vol. 31, pp. 1-438

[24] www.microchem.com/products/pdf/SU8 2002-2025.pdf

Caractérisation du sommateur opto-hyperfréquence

**Caractérisation du sommateur opto-hyperfréquence** 

Ce chapitre s'articule autour de deux parties : les caractérisations des photodiodes évanescentes et celles des sommateurs opto-hyperfréquences réalisés sur substrat  $N^+$ .

Nous abordons dans un premier temps les caractérisations des guides optiques en présentant les mesures des pertes obtenues par les méthodes Fabry-Pérot et fibre à fibre, et en étudiant leur dépendance à l'état de polarisation TE/TM.

Les caractéristiques optiques (coefficient de réponse, dépendance à la polarisation, courant de saturation) et électriques (mesures I(V), C(V) et bande passante) des photodiodes évanescentes sont ensuite détaillées.

Dans une deuxième partie, nous abordons les caractérisations menées sur les sommateurs opto-hyperfréquences. Le principe de sommation statique a été démontré en analysant l'évolution du photocourant en fonction du nombre de voies éclairées. Nous avons également étudié l'évolution de la dynamique en fonction du nombre de voies éclairées afin de valider le principe de sommation en hyperfréquence. Nous avons enfin vérifié l'obtention ou non de mélange optique selon les différentes topologies proposées et son influence sur la dynamique.

# A. Photodiode évanescente

Nous présentons dans une première partie les caractérisations optiques des guides avant d'aborder les caractérisations optiques/électriques des photodiodes évanescentes dans une seconde partie.

## 1. Caractérisations des guides optiques

Afin de caractériser les guides optiques, nous avons utilisé trois techniques différentes : la technique en champ proche par visualisation des tâches optiques, les mesures fibre à fibre et enfin les mesures Fabry-Pérot.

#### 1.1. Rappel succinct des différentes sources de pertes optiques

Dans une structure réalisée sur matériau semiconducteur, les pertes associées trouvent leurs causes dans divers phénomènes physiques et peuvent être classées en deux catégories [1]:

- les pertes intrinsèques au matériau, qui sont dues essentiellement à deux mécanismes : les pertes par absorption de la couche guidante et du substrat, phénomène dépendant du dopage, de la densité de porteurs libres et des inhomogénéités locales, et les pertes par dispersion liées au volume de la couche guidante (inhomogénéité du matériau...) et à l'état de surfaces et interfaces des épitaxies
- les pertes dues à la structure même du guide optique : les pertes de couplage fibrecomposant et les pertes de rayonnement, pertes liées aux paramètres topologiques mais aussi technologiques.

Nous avons représenté sur la figure IV-1 les mécanismes des pertes optiques pour un guide en arête.



Figure IV-1 : Schéma d'un guide en arête et mécanismes des pertes associés

Ainsi les pertes totales d'insertion rassemblent à la fois les pertes de couplage et les pertes de propagation [2]. Les pertes de couplage sont dues à des réflexions et à la désadaptation des modes optiques à l'interface fibre/guide auxquelles peuvent éventuellement venir s'ajouter des pertes liées au désalignement de la fibre et du guide. En effet, la différence d'indice de propagation entre la fibre ( $n\approx1.45$ ) et le guide ( $n\approx3.1$ ) provoque un fort taux de réflexion (~30%) en entrée de guide qui se traduit directement en pertes dites de couplage. De plus le mode circulaire émanant d'une fibre clivée présente une répartition gaussienne sur un diamètre de 9µm alors que celui correspondant au mode guidé dans une structure classique en arête est plutôt elliptique de 2.5µm de haut sur 5µm de large ce qui induit également des pertes dites de désadaptation modale [3]. Les pertes de propagation, quant à elles, incluent les pertes intrinsèques et les pertes par rayonnement.

#### 1.1.1. Pertes intrinsèques

Les pertes qualifiées d'intrinsèques sont principalement dues à deux phénomènes distincts : l'absorption **[4-5]** et la dispersion ou diffusion.

L'absorption est fonction de nombreux paramètres dont la composition, le dopage et la densité de porteurs libres dans le milieu de propagation... A titre d'exemple, l'absorption intrinsèque de l'InP est de 0.6 cm<sup>-1</sup> à 1.55µm.

- Les pertes par dispersion ont généralement deux origines : la dispersion en volume et la dispersion en surface.
  - La dispersion de la lumière dans le volume que constitue le guide est liée aux imperfections du réseau cristallin telles que les impuretés, les défauts cristallins (lacunes, dislocations). Ces imperfections peuvent entraîner des variations locales de l'indice de réfraction dans la couche guidante. Des études faites sur les conséquences de ces variations locales de l'indice montrent que les pertes associées sont proportionnelles au nombre de ces défauts et dépendent fortement de la dimension de ceux-ci [6]. Leur existence montre qu'une importance particulière doit être donnée quant à la qualité de la croissance épitaxiale de la couche guidante.
  - La dispersion surfacique est due à la rugosité inévitable des surfaces délimitant la couche guidante. Les frontières entre les zones d'indice différent présentent des irrégularités qui perturbent la propagation des modes optiques. Ces imperfections de surface délimitant le guide jouent le rôle de centres de dispersion et une partie de la lumière est perdue par diffusion à chaque réflexion de celle-ci sur les surfaces. L'énergie initialement guidée fuit hors du guide par l'intermédiaire des modes rayonnés. Typiquement ces pertes sont comprises entre 0.3 dB/cm et 2dB/cm respectivement pour les guides monomodes et multimodes.

## 1.1.2. Pertes par rayonnement

Les pertes par rayonnement ont plusieurs origines:

- Elles peuvent être dues à la définition technologique des guides optiques. En effet les aspérités et discontinuités de surface peuvent être à l'origine des pertes lorsque le mode optique est en contact avec les flancs de gravure des guides. Il faut donc accorder une importance particulière à la qualité des flancs de gravure définissant les rubans des guides.
- La topologie même des guides peut être à l'origine de pertes radiatives. Notamment dans le cas de guides peu ou trop fort confinés. Quand le mode optique du guide est peu confiné, soit d'indice proche de celui du substrat servant de couche de confinement, il s'opère un transfert énergétique de ce mode vers les modes dits modes de substrat, non
guidés et radiatifs, qui vont disperser la lumière. Il faut éviter ce couplage optique du mode guidé vers ces modes radiatifs en confinant suffisamment le mode mais dans certaines limites. Avec un confinement trop important, il est possible de voir apparaître des modes d'ordre supérieur, d'indice plus faible, se rapprochant de celui du substrat et donc de ceux de modes non guidés. Le problème de transfert énergétique à partir de ces modes d'ordre supérieur se pose alors à nouveau.

## 1.2. Champ proche

Cette méthode qualitative permet de visualiser le champ proche en sortie des guides à l'aide d'une caméra infrarouge via un système de focalisation. Elle permet d'obtenir rapidement un résultat qualitatif quant aux propriétés de guidage des guides.

#### 1.2.1. Description du banc de mesure

Un laser émet un signal lumineux à la longueur d'onde  $\lambda$ =1.55µm. En entrée, une fibre lentillée permet d'injecter la lumière dans les guides tandis qu'en sortie un objectif, avec un grossissement de 40, est placé dans l'axe de la caméra et de l'échantillon. La caméra est reliée à un système d'acquisition informatique permettant de visualiser le champ proche en sortie des guides optiques. La fibre optique d'entrée est placée sur micro-déplacements piézoélectriques à 3 axes linéaires, afin de permettre un alignement précis de la fibre et du guide optique. Le guide optique à mesurer est situé, quant à lui, sur un positionneur 4 axes (1 linéaire et 3 angulaires). Un polariseur permet d'orienter la polarisation du faisceau incident. Le banc de mesure utilisé en champ proche est représenté schématiquement sur la figure IV-2.



Figure IV-2 : Banc de mesure en champ proche

#### 1.2.2. Mesures

Les mesures ont été effectuées sur différents guides de test prévus à cet effet sur le wafer.

## 1.2.2.1. Observations

Les photographies, figure IV-3, montrent les tâches optiques en sortie des guides observées à l'aide de la caméra.



Guide droit



Guide courbe



Ce type de caractérisations nous informe sur le nombre de modes se propageant dans la structure et sur l'intensité de confinement latéral des guides optiques. Nous pouvons remarquer que les guides sont monomodes et que les intensités lumineuses en sortie des guides droits et courbes sont à peu près identiques. Il semblerait donc que les courbures n'induisent pas de pertes élevées supplémentaires par rapport à un guide droit. Nous vérifierons cela à l'aide des mesures fibre à fibre.

#### 1.2.2.2. Dépendance à la polarisation

Nous avons également étudié l'influence de la polarisation sur les tâches optiques en sortie des guides à l'aide du polariseur. Nous pouvons remarquer sur la figure IV-4 une variation de l'intensité lumineuse en sortie des guides optiques en fonction de la polarisation : les guides ne sont donc pas indépendants à l'état de polarisation de la lumière. Les polarisations A et B correspondent respectivement au maximum et minimum d'intensité lumineuse sur la caméra.



Figure IV-4 : Faisceaux lumineux en sortie des guides droits et courbes en fonction de la polarisation

Afin d'étudier si les polarisations A et B correspondent aux polarisations TE/TM, nous avons utilisé le montage suivant :



Figure IV-5 : Schéma de montage pour mesurer la dépendance des guides à la polarisation

Après avoir aligné la fibre lentillée d'entrée, on cherche le maximum d'intensité lumineuse sur la caméra avec le polariseur 1. Une fois que le maximum de luminosité est atteint, le polariseur 2 permet de connaître la polarisation correspondante, en effet les positions 2 et 3 du  $2^{eme}$  polariseur correspondent respectivement à l'état de polarisation TM et TE de la lumière. On observe sur la caméra une variation de la luminosité du spot en fonction des différentes positions du polariseur 2. On fait de même pour le minimum d'intensité lumineuse.

Nous avons observé pour les guides optiques que:

lorsque l'intensité lumineuse est maximale sur la caméra, le spot est quasi éteint en position 2 (TM) du polariseur 2 et lumineux en position 3 (TE), le mode de propagation est alors TE
lorsque l'intensité lumineuse est minimale sur la caméra, aucune position du 2<sup>ème</sup> polariseur n'éteint le spot ou reproduit la même luminosité, le mode de propagation est alors un mixte des modes TE et TM.

Nous pouvons donc en déduire que les guides réalisées sont dépendants à la polarisation TE/TM et que leurs pertes optiques seront minimales en mode TE.

#### 1.3. Fibre à fibre/ Fabry-Pérot

#### 1.3.1. Description du banc de mesure

Ce banc de mesure est dédié à la mesure des pertes des guides optiques passifs. Il découle du banc précédent hormis qu'ici le guide optique est couplé avec deux fibres (lentillée en entrée et clivée en sortie) et la puissance optique est recueillie sur un wattmètre optique. Les fibres optiques d'entrée et de sortie sont placées sur micro-déplacements piézo-électriques à 3 axes linéaires, afin de permettre un alignement précis des fibres avec le guide optique.

Le banc de mesure utilisé est représenté schématiquement figure IV-6.



Figure IV-6 : Banc de mesure de pertes optiques fibre à fibre

Ce banc permet deux types de mesures :

- <u>les mesures fibre à fibre</u>: la valeur mesurée correspond à la somme des pertes de couplage entre les deux fibres et le guide et les pertes internes du guide
- <u>les mesures Fabry-Pérot</u>: en faisant varier la longueur d'onde du laser, la cavité formée par les faces clivées du guide, crée des interférences, qui modulent la puissance en sortie. L'amplitude des oscillations donne accès aux pertes internes des guides.

### 1.3.2. Mesures des pertes optiques dans les guides

#### 1.3.2.1. Fibre à fibre

La méthode consiste à mesurer sur le wattmètre optique la puissance lumineuse détectée à la sortie des guides optiques.

Pour un guide, la diminution de puissance lumineuse, après une propagation entre  $z_0$  et  $z=z_0+dz$  est proportionnelle à la puissance  $P_0=P(z_0)$  et à la distance parcourue, soit  $P(z)=P_0exp(-\alpha.dz)$  avec  $\alpha$  le coefficient d'absorption. Les pertes sont généralement exprimées en dB et données par :

$$Pertes(dB) = -10\log_{10}\frac{P}{P_0}$$
(1)

- 212 -

La puissance optique injectée à travers la fibre lentillée d'entrée est de 1.26mW. En sortie des guides droits de longueur 5mm, nous récupérons au maximum  $19.2\mu$ W. Les pertes totales fibre à fibre pour un guide droit de 5mm de long sont égales à -18.2dB. Pour les guides courbes utilisés dans la partie passive du sommateur (en fait deux guides courbes sont utilisés, formant un S qui s'inscrit dans un rectangle de  $120\mu$ m par  $1380\mu$ m), nous obtenons des pertes supplémentaires de l'ordre de seulement 0.1dB. Cette mesure corrobore la conclusion tirée de la méthode qualitative en champ proche et les résultats issus de la modélisation sur les pertes dues à la courbure du guide.

Le tableau IV-1 regroupe les mesures des pertes totales dans les deux types de guides. Ces pertes incluent les pertes de couplage et les pertes de propagation.

	Puissance optique (µW)	Pertes (dB)	Pertes des courbures (dB)
Guide droit	19.2	18.2	Х
Guide courbe	18.7	18.3	0.1

**Tableau IV-1 :** Mesures fibre à fibre des puissances transmises dans les guides droits et courbes et les pertes calculées pour 5 mm

Nous avons ensuite quantifié les différents types de pertes (couplage et propagation) dans nos guides réalisés sur substrat  $N^+$  grâce à la méthode Fabry-Perot.

#### 1.3.2.2. Fabry-Perot

Cette méthode de mesure par résonance Fabry-Perot permet d'obtenir les pertes de propagation dans un guide optique [7]. Cette méthode est basée sur l'étude des interférences de la cavité de Fabry-Perot constituée du guide et des deux faces clivées. La mise en évidence de l'interférence s'effectue en modifiant la longueur du chemin optique par changement d'un paramètre (température, longueur d'onde...). Pour cette technique, le montage est toujours dans la configuration fibre à fibre.

Une lumière monomode se propageant dans une cavité Fabry-Perot donnera lieu à des phénomènes d'interférences. En effet, l'onde en sortie du guide est la somme d'une partie directement transmise et de contributions ayant subi de multiples réflexions à l'intérieur de la cavité. Lorsque toutes ces contributions sont en phase, l'intensité détectée est maximale  $(P_{max})$ , et au contraire minimale  $(P_{min})$  lorsque les différentes parties sont en opposition de phase.

La mesure permet d'obtenir les pertes intrinsèques de propagation sans tenir compte de la valeur absolue de la puissance injectée à l'entrée [8]. Pour chaque guide, on fait varier la longueur d'onde autour de la longueur de fonctionnement (ici 1550 nm). Les pertes de propagation (en dB/cm) sont données par :

$$P = -\frac{10}{L} \log \left( \frac{1}{R} \left( \frac{\sqrt{t} - 1}{\sqrt{t} + 1} \right) \right) \quad (2)$$

où L est la longueur de guide (ou de cavité), R est le coefficient de réflexion (0.3) et t le contraste de puissance  $\frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{min}}}$ 

La figure IV-7 représente l'évolution de la puissance optique en fonction de la longueur d'onde pour un guide droit de longueur 5mm. Les mesures ont été effectuées entre 1548 et 1556nm. Nous pouvons remarquer au cours de la mesure une dérive de la valeur moyenne de la puissance en fonction de la longueur d'onde, cet effet est dû à un déplacement progressif de la fibre d'entrée au cours de la mesure.



Figure IV-7 : Spectre Fabry-Perot obtenu sur un guide droit de longueur 5mm

Nous déterminons ainsi les valeurs moyennes de la puissance minimale et maximale, ce qui nous permet en appliquant la formule (2) de calculer les pertes de propagation des guides réalisés sur substrat  $N^+$ . Nous obtenons ainsi des pertes de propagation de 20.4dB/cm pour un guide droit et 20.6 dB/cm pour un guide courbe. Ainsi la courbure des guides n'augmente que très peu les pertes de propagation.

Dans le cas d'un guide droit de 5mm, les pertes de propagation sont donc égales à 10.2dB. Etant donné que les pertes totales fibre à fibre sont égales à 18.2dB, nous pouvons donc en déduire des pertes de couplage de 8dB entre le guide et les fibres d'entrée et de sortie. Si nous admettons qu'elles sont identiques à l'entrée et à la sortie, nous obtenons des pertes d'injection de l'ordre de 4dB par face. Néanmoins, les conditions de couplage étant différentes en entrée et sortie, cette valeur ne peut être prise que comme une évaluation réaliste mais approximative.

Le tableau IV-2 synthétise les valeurs des différents types de pertes dans le cas de guide droit et courbe de longueur 5mm.

	Me	Mesures		
Types de pertes	guide droit	guide courbe		
Pertes totales fibre à fibre (dB)	18.2	18.3		
Pertes d'injection/ face (dB)	4	4		
Pertes de propagation (dB)	10.2	10.3		

Tableau IV-2: Récapitulatif des pertes optiques des différents guides de longueur 5mm

Les pertes de propagation mesurées sont élevées par rapport à celles obtenues en modélisation. Celles-ci peuvent s'expliquer par :

- le phénomène de dispersion surfacique due à la rugosité inévitable des surfaces délimitant la couche guidante,
- les pertes par absorption de la couche guidante et du substrat, dépendant du dopage et de la densité des porteurs libres. En effet, pour un dopage N de 10<sup>18</sup> cm<sup>-3</sup>, les pertes dues à l'absorption dans le matériau massif GaInAsP<sub>1.3µm</sub> sont de l'ordre de 5dB/cm [9]. Des pertes par absorption de l'ordre de 3.5dB/cm dues au substrat d'InP dopé N ont été mesurées [10].
- les pertes par rayonnement dues à la rugosité des flancs des guides.

## 2. Caractérisation des photodiodes évanescentes

Les caractéristiques optiques (coefficient de réponse, dépendance à la polarisation, courant de saturation) et électriques (mesures I(V) et C(V) et bande passante) des photodiodes évanescentes sont détaillées.

## 2.1. Caractérisations électriques

## 2.1.1. Caractérisations I(V)

Les composants ont été testés sous pointes en continu. Une caractéristique I(V) en obscurité est donnée figure IV-8.



Figure IV-8 : Caractéristique I(V) d'une photodiode évanescente sous obscurité

La photodiode présente une tension de seuil de 0.45V et une caractéristique en direct très « droite », représentative d'une résistance différentielle relativement faible. La polarisation inverse quant à elle, met en évidence une tension de claquage qui se situe au-delà de -8V et montre que le courant d'obscurité, à -3V par exemple, est inférieure à 1µA qui représente la limite de résolution du traceur de courbes utilisé.

### 2.1.2. Caractérisations C(V)

## 2.1.2.1. Sur substrat N<sup>+</sup>

Nous avons mesuré la capacité présentée par la photodiode PIN de la structure 14 réalisée sur substrat N<sup>+</sup> en fonction de la tension appliquée à ses bornes. La structure 14 est constituée de 4 photodiodes élémentaires espacées entre elles de  $20\mu m$  et présentant chacune un ruban d'une surface de  $45*4 \mu m^2$ . Cette mesure est présentée figure IV-9 :



Figure IV-9: Mesures C(V) de la structure 14 réalisées au capacimètre (à 1GHz)

On note ici que la caractéristique est quasiment horizontale à partir de -1V en inverse, ce qui corrobore le fait que la zone intrinsèque est très rapidement désertée.

La capacité mesurée est égale à 310fF à -3V et contient en fait la capacité intrinsèque du composant, due à la zone non intentionnellement dopée définie sous le ruban, ainsi que la capacité parasite, en grande partie due au support en SU8 [11]. Notre modèle développé dans le paragraphe C.3.3.2 du 2<sup>ème</sup> chapitre nous donne une capacité globale égale à 315fF, ce qui montre un bon accord théorie-expérience. D'après notre modèle, la capacité parasite due au support en SU8 est égale à 226fF, celle due au pont à air à 11fF et la capacité intrinsèque de la photodiode à 78fF. La fréquence de coupure f<sub>RC</sub> liée à cette capacité globale est égale à 8.4 GHz. Sur substrat N<sup>+</sup>, la fréquence de coupure due à la capacité étant prépondérante devant celle liée au temps de transit, comme nous l'avons vu dans le paragraphe C.3.3.2 du 2<sup>ème</sup> chapitre, la bande passante de la structure 14 est de l'ordre de 8GHz.

Sur substrat semi-isolant et donc sans la capacité parasite due au support en SU8, la fréquence de coupure  $f_{RC}$  serait égale à 30GHz, ce qui correspondrait à une bande passante de 20.1GHz en tenant compte du temps de transit.

#### 2.1.2.2. Sur substrat semi-isolant

Nous avons également mesuré la capacité présentée par la photodiode PIN de la structure 11 réalisée sur substrat semi-isolant en fonction de la tension appliquée à ses bornes. La structure 11 est constituée d'une photodiode élémentaire présentant un ruban de surface 35\*26µm<sup>2</sup>. Cette mesure est présentée figure IV-10:



Figure IV-10 : Mesures C(V) de la structure 11 réalisées au capacimètre (à 1GHz)

La capacité mesurée est égale à 135fF à -3V et contient donc la capacité intrinsèque du composant ainsi que la capacité parasite due au pont. La capacité mesurée est en relative bon accord avec la théorie, qui prévoyait une capacité de l'ordre de 100fF, compte tenu des difficultés technologiques rencontrées lors du 1<sup>er</sup> procédé de réalisation.

La fréquence de coupure  $f_{RC}$  liée à cette capacité globale est égale à 19.6 GHz, ce qui correspond à une bande passante de 15.9 GHz en tenant compte du temps de transit.

## 2.2. Caractérisation optique en éclairement continu

La photodiode est polarisée en inverse à -3V, et l'alignement de la fibre par rapport à la photodiode est effectué par la recherche du maximum de photocourant généré.

#### 2.2.1. Dépendance à la polarisation

Nous étudions tout d'abord l'influence de la polarisation TE/TM sur les performances des photodiodes évanescentes réalisées. Le schéma de montage est représenté figure.



Figure IV-11 : Montage pour mesurer la dépendance de la photodiode à la polarisation

Nous utilisons ici les structures 1,2 et 3 qui permettent d'obtenir à la fois une photodiode évanescente et un guide de sortie.

Après avoir aligné la fibre d'entrée, on cherche le maximum de photocourant  $Iph_{max}$  avec le polariseur 1. Sur la caméra, on récupère la lumière non absorbée et guidée dans le guide de sortie. Une fois que le maximum de photocourant est atteint, le polariseur 2 permet de connaître la polarisation correspondante, en effet les positions 2 et 3 du 2<sup>ème</sup> polariseur correspondent respectivement à l'état de polarisation TM et TE de la lumière. On observe sur la caméra une variation de la luminosité du spot en fonction des différentes positions du polariseur 2. On fait de même pour le minimum de photocourant Iph<sub>min</sub>.

Le tableau IV-3 regroupe les valeurs maximales et minimales du photocourant pour différentes structures. Ces mesures ont été réalisées avec des guides d'entrée de longueur 2.5mm.

Structure	Dimensions	Iph <sub>max</sub> (µA)	Iph <sub>min</sub> (µA)
1	35*4	150	94
2	70*4	155	105
3	35*8	150	127

**Tableau IV-3**: Evolution du photocourant en fonction de la polarisation pour différentes

 structures

Nous avons observé pour ces différentes structures que:

• lorsque le photocourant est maximum, le spot est quasi éteint en position 2 (TM) du polariseur 2 et lumineux en position 3 (TE), le mode de propagation est alors TE

• lorsque le photocourant est minimum, le spot est quasi éteint en position 3 (TE) du polariseur 2 et lumineux en position 2 (TM), le mode de propagation est alors TM.

Nous pouvons donc en déduire que les photodiodes réalisées sont dépendantes à la polarisation TE/TM et que leur coefficient de réponse sera maximum en mode TE et minimum en mode TM.

Une explication possible à la dépendance des photodiodes à la polarisation serait une hauteur de ruban des guides réalisée technologiquement différente de celle simulée, ce qui perturberait davantage la propagation des guides en mode TM qu'en mode TE et par suite augmenteraient les pertes optiques des guides en mode TM par rapport au mode TE.

#### 2.2.2. Mesure du coefficient de réponse

#### 2.2.2.1. Description du banc de mesure

La mesure du coefficient de réponse, réalisé selon le schéma expérimental de la figure IV-12, consiste à évaluer le rapport entre la valeur du courant lue sur l'ampèremètre et celle de la puissance optique incidente sur la photodiode. L'amplificateur optique permet de faire varier la puissance optique injectée dans le guide d'entrée tandis que le polariseur permet de modifier les états de polarisation de la lumière (TE/TM).



Figure IV-12 : Schéma du banc de mesure du coefficient de réponse

Afin de déterminer le coefficient de réponse, nous avons relevé la courbe du photocourant Iph en fonction de la puissance optique injectée Popt à l'entrée du guide. Nous en déduisons le rendement quantique externe à partir de la relation :

$$\eta_{ext} = \frac{I_{ph}}{\frac{P_{opt}}{hv}} = \frac{1.24}{\lambda} \Re \quad (3) \text{ d'où } \eta_{ext} = 0.8 * \Re \quad (4) \quad \text{à } \lambda = 1.55 \mu \text{m}$$

Il est à noter que celui-ci prend en compte les pertes du guide d'entrée.

#### 2.2.2.2. Cas de la structure 1

Les mesures ont été réalisées avec un guide d'entrée de  $300\mu m$  devant la photodiode présentant un ruban de surface de  $35*4\mu m^2$  (structure 1). La figure IV-13 regroupe les mesures en coefficient de réponse et dépendance à la polarisation TE/TM.

Caractérisation du sommateur opto-hyperfréquence



Figure IV-13 : Caractérisation du coefficient de réponse de la photodiode pour les 2 polarisations

Nous pouvons observer une évolution linéaire du photocourant en fonction de la puissance optique incidente pour les 2 polarisations. Comme il avait déjà été mentionné, le coefficient de réponse n'est pas la même pour les 2 polarisations. Nous remarquons également une absence de saturation du photocourant, la valeur du courant de saturation est donc supérieure à 11mA.

Le tableau IV-4 regroupe les valeurs des coefficients de réponse et des rendements quantiques externes de la structure 1 en fonction de l'état de polarisation.

Polarisation	9२ (A/W)	N <sub>ext</sub> (%)
ТЕ	0.358	28.6%
ТМ	0.11	8.8%

**Tableau IV-4 :** Evolution du coefficient de réponse et du rendement quantique en fonction de la polarisation

Ces résultats montrent donc que les photodiodes réalisées sont dépendantes à la polarisation TE/TM et que leur coefficient de réponse est maximal en mode TE (0.36 A/W) et minimal en mode TM (0.11 A/W). Cette dépendance des photodiodes à la polarisation était un résultat attendu du fait de la dépendance des pertes optiques des guides à l'état de polarisation.

Nous avons également calculé le rendement quantique interne  $\eta_{int}$  pour la polarisation TE. En effet, connaissant les pertes de propagation des guides optiques pour la polarisation TE (20.4dB/cm) et en prenant les pertes de couplage égales à 4dB, nous pouvons en déduire un rendement quantique interne égal à 83% pour un coefficient de réponse de 0.36A/W. Cette mesure est en accord avec la théorie qui prévoyait un rendement interne de 90% pour une longueur d'absorption de 35µm.

#### 2.2.2.3. Coefficient de réponse des autres structures

Nous avons étudié l'influence de la longueur et de la largeur de la photodiode sur le coefficient de réponse en comparant les structures 1,2 et 3 présentant respectivement un ruban de surface  $35*4\mu m^2$ ,  $70*4\mu m^2$  et  $35*8\mu m^2$ . La figure IV-14 regroupe les mesures en coefficient de réponse et dépendance à la polarisation TE/TM réalisées sur ces différentes structures. Les mesures ont été réalisées avec un guide d'entrée de 300 $\mu m$  devant chaque photodiode.



**Figure IV-14 :** Caractérisation du coefficient de réponse de différentes photodiodes selon la polarisation

Nous observons également une évolution linéaire du photocourant en fonction de la puissance optique incidente dans le cas des structures 2 et 3. Ces résultats montrent que ces structures sont aussi dépendantes à la polarisation TE/TM. Nous remarquons une absence de saturation du photocourant, la valeur du courant de saturation de la structure 3 est ainsi supérieure à 13mA.

Le tableau IV-5 regroupe les valeurs des coefficients de réponse et des rendements quantiques externes des différentes structures en fonction de l'état de polarisation.

	structure 1 (35*4µm²)		structure 2 (70*4µm²)		structure 3 (35*8µm²)	
Polarisation	ि श (A/₩)	η <sub>ext</sub> (%)	ℜ <b>(A/W)</b>	η <sub>ext</sub> (%)	ℜ (A/W)	η <sub>ext</sub> (%)
TE	0.358	28.6	0.364	29.1	0.372	29.7
ТМ	0.11	8.8	0.16	12.8	0.18	14.4

**Tableau IV-5 :** Evolution du coefficient de réponse  $\Re$  et du rendement  $\eta_{ext}$  en fonction du type de structures

La comparaison entre les structures 1 et 2 montre que le coefficient de réponse varie peu avec la longueur de la diode, en effet le doublement de la longueur de la diode n'implique seulement qu'une augmentation d'environ 1.5% du coefficient de réponse en mode TE. Nous pouvons donc en conclure que la majorité de l'absorption s'effectue sur les 35 premiers microns, ce qui confirme les simulations effectuées en mode TE. La comparaison entre les structures 1 et 3 montre que le coefficient de réponse par contre augmente un peu avec la largeur de la diode (4%). En effet, la structure 3 ( $35*8\mu m^2$ ) présente le meilleur coefficient de réponse (0.37 A/W); nous pouvons donc en déduire que l'absorption se fait verticalement mais également latéralement. Cela montre une divergence de la lumière lors de la transition guide-photodiode.

Pour la polarisation TE, nous avons également calculé les rendements quantiques internes des structures 2 et 3 qui sont égaux respectivement à 84% et 86%. Ces valeurs, comparées au

rendement quantique interne de 83% de la structure 1, confirment que la majorité de la lumière est absorbée sur une longueur de 35µm (le doublement de la longueur de photodiode n'augmente que de 1% le rendement quantique interne) et que l'absorption de la lumière se fait verticalement mais aussi latéralement (le doublement de la largeur de la photodiode s'accompagne d'une augmentation de 3% du rendement interne). Cette divergence de la lumière lors de la transition guide-photodiode risque de s'avérer ennuyeuse pour la fonction sommation, car elle peut entraîner le mélange des ondes optiques provenant de deux voies; c'est ce que nous analyserons dans le partie B de ce chapitre consacrée à l'étude de la fonction sommation.

#### 2.2.2.4. Influence de la longueur du guide sur le coefficient de réponse

Nous avons étudié l'influence de la longueur du guide d'entrée sur le coefficient de réponse de la photodiode de la structure 1 présentant un ruban de surface 35\*4µm<sup>2</sup>. Les mesures ont ainsi été réalisées avec des longueurs de guide d'entrée de 300µm, 2.5mm et 4mm.

La figure IV-15 regroupe les mesures en coefficient de réponse et dépendance à la polarisation TE/TM réalisées sur ces différentes structures.



**Figure IV-15 :** Evolution du photocourant en fonction de la puissance optique pour différentes longueurs du guide en entrée selon la polarisation

Le tableau IV-6 regroupe les valeurs des coefficients de réponse de la structure 1 en fonction de l'état de polarisation et de la longueur du guide d'entrée.

longueur du guide d'entrée (mm)	<b>ℜ (TE) (A/W)</b>	भ (TM) (A/W)
0.3	0.358	0.11
2.5	0.11	0.064
4	0.08	0.02

**Tableau IV-6 :** Evolution du coefficient de réponse  $\Re$  en fonction de la longueur du guided'entrée

Le tableau IV-6 montre une variation importante du coefficient de réponse de la diode par rapport à la longueur du guide d'entrée, en effet le coefficient de réponse varie de 0.08A/W à 0.358A/W en mode TE pour des longueurs de guide d'entrée respectives de 4mm et 300µm. Cette évolution attendue est due aux différences de pertes optiques de propagation dans les guides d'entrée en fonction de leur longueur.

Nous avons tracé sur la figure IV-16 l'évolution du coefficient de réponse en fonction de la longueur du guide d'entrée.



**Figure IV-16 :** Evolution du coefficient de réponse en fonction de la longueur du guide d'entrée selon la polarisation

## 2.2.2.5. Influence de la longueur d'onde sur le coefficient de réponse

Nous avons étudié l'influence de la longueur d'onde  $\lambda$  sur le coefficient de réponse de la photodiode de la structure 1 présentant un ruban de surface  $35*4\mu m^2$  et un guide d'entrée de 2.5mm. Les mesures ont ainsi été réalisées en faisant varier la longueur d'onde  $\lambda$  du laser de 1460nm à 1660nm par pas de 10nm. Le schéma de principe du banc de caractérisation réalisé est donné figure IV-17.



Figure IV-17 : Schéma de montage pour mesurer la dépendance de la photodiode à la longueur d'onde

La figure IV-18 montre l'évolution du coefficient de réponse en fonction de la longueur d'onde du laser.



Figure IV-18 : Influence de la longueur d'onde sur le coefficient de réponse

Nous pouvons déduire de ces résultats que les photodiodes réalisées sont peu sensibles à la longueur d'onde du laser, en effet le coefficient de réponse est de l'ordre de  $0.11 \pm 0.015$  A/W sur la gamme de longueur d'onde 1460-1660nm.

## 2.3. Mesures des bandes passantes sous faible éclairement

La caractérisation opto-hyperfréquence du composant nécessite la mise en boîtier de ce dernier. Les mesures ont été réalisées sur la structure 7, figure IV-19, constituée de 2 photodiodes élémentaires espacées entre elles de  $20\mu m$  et présentant chacune un ruban d'une surface de  $35*4 \mu m^2$  associé à 4 guides d'entrée de 2.5mm.



## Figure IV-19 : Topologie de la structure 7

Nous avons réalisé, à l'aide de ce boîtier, la mesure de la fréquence de coupure à -3dB de la photodiode de la structure 7. Le schéma de principe du banc de caractérisation réalisé est donné figure IV-20. Nous avons utilisé un modulateur externe pour réaliser cette mesure.



Figure IV-20 : Schéma de montage pour mesurer la fréquence de coupure de la photodiode

Ce banc de caractérisation optique en dynamique nous a permis d'aboutir à la caractéristique de la figure IV-21 montrant l'évolution de la puissance RF en fonction de la fréquence de la photodiode :



Figure IV-21 : Réponse dynamique de la structure 7

Nous pouvons déduire de cette courbe une bande passante de 10GHz pour la structure 7. En théorie, nous avions prévu une bande passante de 9.6GHz, ce qui démontre un bon accord théorie-mesure.

# **B. Sommateur opto-hyperfréquence**

Le banc de caractérisation, représenté figure IV-22 et disponible au moment de cette étude, nous a permis d'étudier la sommation de 2 voies. Nous avons ainsi éclairé chaque structure des deux côtés à l'aide de fibres optiques lentillées. Ces fibres optiques sont placées sur micro-déplacements piézoélectriques à 3 axes linéaires, afin de permettre un alignement précis des fibres et des guides optiques d'entrée.



Figure IV-22 : Photographies du banc de mesure

La mise en place d'un nouveau banc, représenté figure IV-23, permettra de caractériser les sommateurs à 4 et 8 voies en éclairant chaque guide d'entrée. Pour cela, la fibre d'entrée est

remplacée par un ruban de 4 fibres et les micro-déplacements sont ici des 6 axes (3 linéaires, 3 angulaires), l'échantillon étant, quant à lui, fixe.



Figure IV-23 : Photographies du nouveau banc de caractérisation

# 1. Caractérisations statiques

## 1.1. Evolution du photocourant en fonction du nombre de voies

## 1.1.1. Sommation incohérente

Nous avons tout d'abord étudié le principe de sommation statique en mesurant l'évolution du photocourant en fonction du nombre de voies éclairées (1 ou 2). Chaque voie est constituée d'un laser émettant à  $\lambda$ =1.55µm, d'un amplificateur optique, d'un polariseur et d'une fibre lentillée. Le schéma de principe du banc de caractérisation réalisé est donné figure IV-24. Les mesures ont été réalisées sur différentes structures.



Figure IV-24 : Schéma de montage pour démontrer la sommation statique incohérente

Nous présentons tout d'abord les résultats obtenus sur les structures 6 et 7 définissant des sommateurs à 4 voies. Les structures 6 et 7, représentées figure IV-25, sont constituées respectivement d'une photodiode  $(35*26\mu m^2)$  et de 2 photodiodes élémentaires  $(35*4\mu m^2)$  et présentant un écartement entre les guides respectivement de 18 et 20 $\mu$ m.



Figure IV-25 : Topologies des structures 6 et 7

Les mesures sont réalisées en illuminant les voies 1 et 3 (éclairement face à face) puis les voies 2 et 3 (éclairement décalé). Nous mesurons les valeurs du photocourant obtenues pour chaque voie puis lorsque les 2 voies sont éclairées en même temps. Ces mesures sont regroupées dans le tableau IV-7.

Iph (mA)	struc	ture 6	struc	ture 7
Iph <sub>1</sub>	5.96		2.91	
Iph <sub>2</sub>		5.9		2.56
Iph <sub>3</sub>	-4.26	4	3.09	3.02
<b>Iph</b> somme	10.22	9.9	6	5.58

Tableau IV-7 : Mesures du photocourant généré en fonction des voies illuminées

Cette expérience nous permet de valider le principe de sommation statique, en effet le photocourant sommé est la somme exacte des photocourants élémentaires. L'obtention de la sommation en continu à l'aide de la structure 7 nous permet d'entériner d'une part le procédé de reprise des contacts P et d'autre part l'utilisation de photodiodes élémentaires pour réaliser cette fonction. Cette gravure inter-ruban P-I entre les photodiodes élémentaires nous permet d'étendre la bande passante, en effet les bandes passantes calculées des structures 6 et 7 sont égales respectivement à 7.8GHz et 9.6 GHz sur substrat N<sup>+</sup> et 19.1GHz et 25.7GHz sur substrat semi-isolant. Lorsque la sommation est étendue à un nombre de voies plus important, on voit directement la limitation des structures identiques à la structure 6.

Nous avons obtenu les mêmes résultats en illuminant deux à deux les guides d'entrée du sommateur à 8 voies de la structure 13. Nous pouvons donc en déduire que ce principe de sommation statique validé pour 2 voies peut être étendu à 8 voies.

Dans cette expérience, nous avons démontré la sommation statique de deux signaux optiques issus de deux lasers différents à  $\lambda$ =1.55µm.

#### 1.1.2. Sommation cohérente

Nous avons également démontré le principe de sommation statique en utilisant un seul laser. Le schéma de principe du banc de caractérisation réalisé est donné figure IV-26. Le signal optique issu du laser est divisé en 2 à l'aide d'un coupleur optique inversé. Chaque sortie du coupleur est associée à un guide d'entrée.



Figure IV-26 : Schéma de montage pour démontrer la sommation cohérente statique

Les mesures ont été réalisées, comme précédemment, sur les structures 6 et 7 en illuminant les voies 1 et 3 puis les voies 2 et 3. Nous mesurons les valeurs du photocourant obtenues pour chaque voie puis lorsque les 2 voies sont éclairées en même temps. Ces mesures sont regroupées dans le tableau IV-8.

Iph (mA)	struct	ture 6	struc	ture 7
Iph <sub>1</sub>	3.3		2.5	
Iph <sub>2</sub>		3.1		2.7
Iph <sub>3</sub>	2.8	2.8	3.2	3.2
Iph <sub>somme</sub>	6.1	5.9	5.7	5.9

Tableau IV-8 : Mesures du photocourant généré en fonction des voies illuminées

Cette expérience nous permet de valider le principe de sommation statique, en effet le photocourant sommé est la somme exacte des photocourants élémentaires.

Dans cette expérience, nous avons démontré la sommation statique de deux signaux optiques issus du même laser à  $\lambda$ =1.55µm.

## 1.2. Détermination du courant de saturation

Nous avons également utilisé la configuration de la figure IV-24 pour déterminer les courants de saturation des photodiodes. En effet la saturation des diodes n'a pas été atteinte lors des mesures effectuées dans le paragraphe A.2.2.2.3 de ce chapitre en illuminant un seul guide d'entrée.

Nous éclairons donc chaque structure des deux côtés. Nous recherchons le maximum de photocourant Iph<sub>1</sub> généré par la voie 1 puis nous faisons varier le photocourant Iph<sub>2</sub> généré par la voie 2 en fonction de la puissance optique incidente à l'aide de l'amplificateur optique. Les mesures ont été réalisées sur les structures 1,2 et 3 présentant respectivement un ruban de surface  $35*4\mu m^2$ ,  $70*4\mu m^2$  et  $35*8\mu m^2$  et deux guides d'entrée de  $300\mu m$ , comme représenté figure IV-27.



Figure IV-27: Topologie des structures 1,2 et 3

La figure IV-28 représente l'évolution du photocourant sommé calculé et mesuré en fonction de la puissance optique incidente.



Figure IV-28 : Evolution du photocourant mesuré et calculé en fonction de la puissance optique

Nous pouvons remarquer un écart entre la valeur du photocourant mesuré et calculé (représentant la somme exacte des photocourants) sous forte illumination. On constate un phénomène de saturation lente qui se produit selon les structures pour différentes valeurs de courant : 14, 17 et 21mA pour respectivement les structures 1, 2 et 3. Ces mesures montrent

que la surface de la photodiode ainsi que sa topologie ont une influence sur ce phénomène de saturation lente.

De plus, comme nous l'avons vu dans le paragraphe A.2.2.2.3, la totalité de la lumière est quasiment absorbée sur les 35 premiers microns, la densité volumique de porteurs photogénérés est donc grossièrement 2 fois plus faible dans les structures 2 et 3 que dans la structure 1. C'est d'ailleurs pour celle-ci que la plus grande différence entre somme calculée et somme exacte est observée.

Ce phénomène de saturation lente peut s'expliquer par deux effets :

- la variation d'indice de la zone intrinsèque par la création de porteurs qui modifie le couplage et donc la répartition des porteurs photogénérés
- l'échauffement de la photodiode sous photocourants importants

La création de porteurs dans la zone intrinsèque peut en effet impliquer une variation d'indice de la zone intrinsèque et par suite une variation du couplage optique entre le guide d'entrée et la zone absorbante.

La densité de porteurs photocréés peut s'exprimer par :

$$\Delta n = \frac{I_{ph}}{q\overline{v}S} \quad (5)$$

avec S la surface de la photodiode, Iph le photocourant généré et  $\overline{v}$  la vitesse équivalente de saturation des porteurs

Nous avons ainsi tracé sur la figure IV-29 l'évolution de la densité de porteurs en fonction de la puissance optique.





La densité de porteurs photocréés sous forte illumination est de l'ordre de  $2.10^{16}$  cm<sup>-3</sup> pour la structure 1 et de  $1.10^{16}$  cm<sup>-3</sup> pour les structures 2 et 3.

L'évolution de l'indice effectif en fonction de la densité de porteurs [12] nous indique que la variation de l'indice effectif est faible (inférieure à  $10^{-3}$ ) pour ces densités de porteurs calculées. Ces faibles variations d'indice ne modifient donc que très légèrement le couplage entre la zone guidante et la zone intrinsèque, et ne peuvent à elles seules expliquer ce phénomène de saturation lente.

En ce qui concerne un potentiel effet lié à un échauffement de la photodiode sous forts photocourants, nous avons remarqué que le photocourant généré lors de la sommation sous forte illumination mettait environ 10 secondes avant d'atteindre une valeur stable. Ainsi la valeur affichée sur l'ampèremètre lorsque nous illuminons la diode des deux côtés est proche de la somme exacte dès l'injection optique puis diminue avant de se stabiliser. Cette constante de temps avant la stabilisation du photocourant sommé nous laisse penser à un effet thermique. En effet la conduction thermique est proportionnelle à  $T^{-3/2}$  si bien que les matériaux conduisent moins bien la chaleur quand on les chauffe et donc sous forte illumination. De plus les alliages ternaires (zone I) et quaternaires (zone N et cœur du guide) sont de mauvais conducteurs thermiques par rapport au matériau InP. La chaleur traverse donc la zone déserte puis les couches épitaxiales avant de diffuser dans le substrat InP.

Le fait d'éclairer les photodiodes à l'aide de deux guides décalés (structure 3) permet de mieux répartir sur toute la surface l'augmentation de température obtenue sous forte illumination et de faciliter l'évacuation de la chaleur vers le substrat. La puissance thermique dissipée dans la structure 3 est égale à 63mWatts.

Nous avons remarqué également une fois l'expérience terminée une dégradation du courant d'obscurité (1.25 $\mu$ A) à -3V après l'obtention de photocourants élevés. En effet, les courants de fuite augmentent avec la température ce qui peut expliquer ces écarts obtenus. Ce courant d'obscurité diminue au cours du temps écoulé sans réaliser d'expérience pour revenir aux valeurs initiales (<1 $\mu$ A).

Une solution pour améliorer la conductivité thermique globale et l'évacuation de la chaleur vers le substrat serait de remplacer la couche N en GaInAsP par l'InP, en effet la conductivité thermique du quaternaire est égale à 0.044 W.cm<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> tandis que celle de l'InP vaut 0.7 W.cm<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> [13]. Cependant dans ce cas, comme nous l'avons vu dans le 2<sup>ème</sup> chapitre, le couplage optique entre le guide et la photodiode serait diminué.

Une étude plus approfondie serait nécessaire pour déterminer les mécanismes qui provoquent la saturation lente des photodiodes à couplage évanescent sous forte illumination.

## 2. Caractérisations dynamiques

Comme précédemment, les caractérisations dynamiques des sommateurs nécessitent la mise en boîtier de ces derniers. Les mesures ont donc été réalisées sur la structure 7, figure IV-30, constituée de 2 photodiodes élémentaires espacées entre elles de  $20\mu m$  et présentant chacune un ruban d'une surface de  $35*4 \mu m^2$  associé à 4 guides d'entrée de 2.5mm.



Figure IV-30 : Topologie de la structure 7

#### Remarque

Comme nous l'avons vu dans le 1<sup>er</sup> chapitre, les signaux hyperfréquences sommés doivent être en phase pour obtenir une augmentation de la dynamique proportionnellement au nombre de voies. Lors des expériences, la sommation en phase des signaux a été difficile à obtenir du fait de la différence de longueurs des fibres entre les différents polariseurs optiques et amplificateurs optiques utilisés. Nous avons donc cherché les fréquences pour lesquelles les signaux des deux voies sont en phase. L'utilisation d'un déphaseur hyperfréquence sur une des voies aurait permis d'assurer l'accord de phase entre les voies quelle que soit la fréquence d'utilisation.

#### 2.1. Evolution de la puissance hyperfréquence en fonction du nombre de voies

Nous avons étudié le principe de sommation sur la puissance hyperfréquence en mesurant l'évolution de la puissance hyperfréquence en fonction du nombre de voies éclairées (1 ou 2). L'expérience consiste à sommer des signaux optiques issus de 2 lasers différents et modulés par le même signal hyperfréquence. Le schéma de principe du banc de caractérisation réalisé est donné figure IV-31.

Comme nous l'avons vu en théorie, la puissance hyperfréquence doit augmenter de 6dB électrique pour une sommation à 2 voies. Les mesures ont été réalisées à 550.6MHz.



Figure IV-31 : Schéma de montage pour démontrer la sommation incohérente

La figure IV-32 représente l'évolution de la puissance hyperfréquence en fonction du nombre de lasers.



Figure IV-32: Evolution de la puissance hyperfréquence en fonction du nombre de voies

Nous mesurons une augmentation de la puissance hyperfréquence de 6dB pour la somme de deux lasers. Le modèle théorique est donc en adéquation avec les mesures. Nous obtenons également la sommation statique des photocourants issus des deux voies.

#### 2.2. Evolution de la dynamique en fonction du nombre de voies

#### 2.2.1. Sommation incohérente

Nous avons étudié le principe de sommation sur le rapport signal à bruit en mesurant l'évolution de la dynamique en fonction du nombre de voies éclairées (1 ou 2).

L'expérience consiste, comme précédemment, à sommer des signaux optiques issus de 2 lasers différents (à cavité externe) et modulés par le même signal hyperfréquence. Le banc de caractérisation utilisé est donné figure IV-31.

Comme nous l'avons vu en théorie, le rapport signal à bruit doit augmenter de 3dB électrique pour une sommation à 2 voies. Les mesures ont été réalisées à 550.6MHz en utilisant un filtrage vidéo sur les signaux hyperfréquences afin d'améliorer la précision de mesure sur le plancher de bruit. Nous nous plaçons dans la configuration où le RIN est dominant (I>1mA).

Afin d'étudier l'influence du mélange optique sur l'évolution de la dynamique, les mesures ont été effectuées en utilisant les deux configurations d'éclairement possibles : éclairement décalé en illuminant les voies 1 et 4 (figure IV-33(a)), et éclairement face à face en illuminant les voies 1 et 3 (figure IV-33(b)).



Figure IV-33 : Evolution de la dynamique en fonction du nombre de voies

L'augmentation du signal après sommation est de 6dB alors que l'on constate que l'augmentation du niveau de bruit n'est que de 1.5dB. Cette augmentation du niveau de bruit de seulement 1.5dB au lieu des 3 dB attendus est principalement due au fait que les deux sources optiques (lasers à cavité externe et amplificateurs optiques), ne possèdent pas le même RIN.

Le rapport signal à bruit mesuré pour 2 voies augmente donc de 4.5dB par rapport à celui mesuré pour une seule voie pour les deux configurations. Le procédé de sommation de signaux hyperfréquences par voie optique en optique intégrée a donc été démontré à 550.6MHz. Nous n'avons pas vu d'influence du mélange des voies sur la dynamique sommée.

Afin d'augmenter la fréquence de modulation, nous avons remplacé les lasers à cavité externe par des lasers DFB, en effet les lasers utilisés précédemment ne sont modulables que jusqu'à 1GHz.

La figure IV-34 représente l'évolution de la dynamique, à 2.9GHz, en fonction du nombre de voies éclairées (1 ou 2).



Figure IV-34 : Evolution de la dynamique en fonction du nombre de voies

Nous pouvons constater que le rapport signal à bruit augmente de 3.3dB électrique pour une sommation à 2 voies à 2,9GHz. Les RIN des lasers n'étant pas rigoureusement identiques, nous n'obtenons pas exactement 3dB. Le procédé de sommation de signaux hyperfréquences par voie optique en optique intégrée a donc été démontré à 2.9GHz.

#### 2.2.2. Sommation cohérente

Nous avons également étudié le principe de sommation sur le rapport signal à bruit en mesurant l'évolution de la dynamique en fonction du nombre de voies éclairées (1 ou 2). L'expérience consiste à sommer deux signaux optiques issus d'un même laser (de type DFB) modulé par un signal hyperfréquence. Le schéma de principe du banc de caractérisation réalisé est donné figure IV-35. Le signal optique issu du laser est divisé en 2 à l'aide d'un coupleur optique inversé. Chaque sortie du coupleur est associée à un guide d'entrée.


Figure IV-35 : Schéma de montage pour mesurer l'influence de la sommation optique cohérente sur la dynamique

Les mesures ont été effectuées à 2.95GHz, en utilisant les deux configurations d'éclairement possible : éclairement décalé en illuminant les voies 1 et 4 (figure IV-36(a)), et éclairement face à face en illuminant les voies 1 et 3 (figure IV-36(b)). Nous nous plaçons dans la configuration où le RIN est dominant (I>1mA).



Figure IV-36 : Evolution de la dynamique en fonction du nombre de voies et du type d'éclairement

L'augmentation du signal après sommation est de 6dB alors que l'on constate que l'augmentation du niveau de bruit n'est que de 3dB. Le rapport signal à bruit mesuré pour 2 voies à 2.95GHz augmente donc de 3dB (facteur 2) par rapport à celui mesuré pour une seule voie. Nous n'avons également pas vu d'influence du mélange des voies sur la dynamique sommée dans cette configuration.

Afin d'augmenter la fréquence de modulation, nous avons employé un modulateur externe, en effet le laser DFB utilisé n'est modulable que jusqu'à 4.5GHz. La figure représente l'évolution de la dynamique, à 5.37GHz (figure IV-37(a)) et à 7.7GHz (figure IV-37(b)), en fonction du nombre de voies éclairées (1 ou 2).



Figure IV-37 : Evolution de la dynamique en fonction du nombre de voies

Nous pouvons constater que le rapport signal à bruit augmente de 3dB électrique pour une sommation à 2 voies à 5.37GHz. Nous avons également mesuré une augmentation de la puissance hyperfréquence de 6dB à 7.7GHz. Les niveaux de bruit à 1 et 2 voies étant « noyés » dans celui de l'analyseur, nous n'avons pas pu hélas les mesurer.

### 2.3. Sommation ou mélange ?

#### 2.3.1. Caractérisations dynamiques

#### 2.3.1.1. Mélange des voies ?

Nous allons désormais étudier si la sommation en dynamique observée dans le paragraphe 2.2 s'accompagne d'un phénomène de mélange des ondes optiques. Nous avons utilisé la configuration de la sommation incohérente pour le déterminer en se servant cette fois de deux lasers à deux longueurs d'onde différentes ( $\lambda_1$ =1530nm et  $\lambda_2$ =1550nm) et modulés à deux fréquences différentes F<sub>1</sub> (500MHz) et F<sub>2</sub> (510MHz). S'il y a mélange des ondes optiques, nous récupérons sur l'analyseur de spectre électrique les raies F<sub>1</sub> et F<sub>2</sub> ainsi que la raie de mélange (F<sub>1</sub>+F<sub>2</sub>) à 1.01GHz.

Le schéma de principe du banc de caractérisation réalisé est donné figure IV-38.



Figure IV-38 : Schéma de montage pour démontrer la sommation ou le mélange

Les mesures sont réalisées en illuminant les voies 1 et 3 puis les voies 1 et 4 de la structure 7 comme représenté figure IV-39. Nous mesurons les valeurs des puissances hyperfréquences des raies  $F_1$  et  $F_2$  ainsi que celle de la raie de mélange ( $F_1+F_2$ ).



Figure IV-39 : Topologie de la structure 7

Les mesures réalisées sont regroupées dans le tableau IV-9. Les photocourants issus des deux voies sont égaux à 1mA.

Fréquence	Puissance hyper	fréquence (dBm)
	voies 1 et 3	voies 1 et 4
F <sub>1</sub>	-24.8	-24.8
F <sub>2</sub>	-24.8	-24.8
<b>F</b> <sub>1</sub> + <b>F</b> <sub>2</sub>	-62.8	-71

Tableau IV-9 : Mesures de la puissance hyperfréquence en fonction des voies illuminées

Nous avons obtenu dans les deux configurations une raie de mélange. Cependant cette raie de mélange se situe à -38dB des raies  $F_1$  et  $F_2$  lorsque nous illuminons les guides situés de part et d'autre de la diode (voies 1 et 3), et à -46dB lorsque les guides éclairés sont décalés de 20 µm (voies 1 et 4). Cette mesure montre donc que la quantité de lumière mélangée est donc plus importante dans le 1<sup>er</sup> cas que dans le 2<sup>ème</sup>. Le fait d'obtenir du mélange dans le 2<sup>ème</sup> cas, alors que les guides sont séparés de 20µm, est dû à la divergence de la lumière lors de la transition guide-photodiode, comme illustré figure IV-40. Ce phénomène avait déjà été entrevu dans le paragraphe A.2.2.2.3.



Figure IV-40 : Représentation schématique du mélange optique dans nos structures

Il est à noter qu'en prenant la même longueur d'onde et la même fréquence, nous obtenons bien 6dB de gain et que la raie hyperfréquence sommée est stable.

Cependant dans le cadre de l'application radar, où les signaux reçus peuvent se situer à des fréquences différentes, ce mélange peut créer des échos fantômes (aux fréquences de mélange), voire perturber un signal reçu si la raie de mélange est en concordance avec celle d'un signal utile.

#### 2.3.1.2. Influence de la raie de battement sur la dynamique sommée

Nous allons désormais étudier l'influence d'une raie de battement sur la dynamique observée dans le paragraphe 2.2. Nous utilisons le montage de la figure IV-31 en utilisant désormais les deux lasers tels que leur différence de longueur d'onde crée une raie de battement proche de la raie hyperfréquence sommée. Nous nous plaçons dans la configuration décalée (voies 1 et 4 illuminées).

La figure IV-42 représente l'évolution du rapport du signal à bruit obtenu avec deux voies éclairées en présence de la raie de battement (figure (IV-41(a)) et sans (figure IV-41(b)). Le résultat présenté dans la figure IV-41(b) est issu du paragraphe 2.2.1. (figure IV-33).



Figure IV-41 : Evolution du signal obtenu avec deux voies en présence ou non de la raie de battement

Nous pouvons remarquer sur la figure IV-41(a) que le niveau de plancher de bruit est augmenté par la présence de cette raie de battement. Nous pouvons conclure que si la différence des longueurs d'onde des lasers est telle que la raie de battement est éloignée de la raie hyperfréquence sommée, le mélange des voies optiques n'influe pas sur la dynamique sommée. Dans le cas inverse, nous n'obtenons plus une augmentation de la dynamique de 3dB pour 2 voies.

#### 2.3.2. Caractérisations statiques

Afin d'étudier le phénomène de mélange des ondes optiques sur les autres structures non montées en boîtier, nous avons réalisé l'expérience suivante : nous avons utilisé la configuration de la figure IV-31 en utilisant ici deux lasers de type DFB tels que leur différence de longueur d'onde crée une raie de mélange de l'ordre de 0.6GHz. Nous éclairons chaque structure des deux côtés à l'aide de fibres optiques. S'il y a mélange des ondes optiques, nous récupérons la raie de battement de 0.6GHz sur l'analyseur.

Le schéma de principe du banc de caractérisation réalisé est donné figure IV-42.



Figure IV-42 : Schéma de montage pour démontrer la sommation ou le mélange dans nos structures

Nous présentons par la suite pour chaque structure la valeur de la raie de battement à 0.6GHz potentiellement obtenue et le photocourant associé, et dans le cas des sommateurs à 4 et 8 voies nous détaillons les 2 voies illuminées.

# 2.3.2.1. Sommateur à 2 voies

35*4µm²			70*4µm²		
Structure 1	Topologie	3	Structure 2	T	opologie 3
Iph (mA)	6.6		Iph (mA)		11
Raie de battement (dI	3m) -50		Raie de battement (d	lBm)	-48
35*8μm²			35	\$*11µm²	фаниана \$3µт
Structure 3	Topologie	1	Structure 4	T	opologie 1
Iph (mA)	11.9	)	Iph (mA)		13.7
Raie de battement (dl	3m) - 55	5	Raie de battement (d	lBm)	- 60
35*4μm² ↓ 3μm 35*4μm²					
		2			
Structure 5	Topologie	2			
Structure 5 Iph (mA)	11.7	<u>2</u> 7			

Figure IV-43 : Valeurs des raies de battement et des photocourants associés dans le cas des sommateurs à 2 voies

# 2.3.2.2. Sommateur à 4 voies

	35*26µm²	3 18μm 4	2	<b>35*4μm²</b> ↓ 20 μm <b>35*4μm²</b>	3
Structure 6	Topolo	gie mixte 1-3	Structure 7	Тор	ologie 3
Voies	1 et 3	2 et 3	Voies	1 et 3	2 et 3
Iph (mA)	9.9	9.9	Iph (mA)	7.4	8
Raie de	-46	-70	Raie de battement-47-72		-73
battement (dBm)			(dBm)		



Figure IV-44 : Valeurs des raies de battement et des photocourants associés dans le cas des sommateurs à 4 voies

### 2.3.2.3. Sommateur à 8 voies



Figure IV-45 : Valeurs des raies de battement et des photocourants associés dans le cas des sommateurs à 8 voies

#### 2.3.2.4. Bilan des mesures

Afin d'exploiter ces mesures, nous les avons classées selon trois configurations.

### • Eclairement d'une diode par deux guides situés face à face (Topologie 3)

Le tableau IV-10 regroupe les valeurs des raies de battement à 0.6GHz obtenues avec leurs photocourants associés pour différentes surfaces de photodiode dans le cas d'un éclairement de la photodiode par deux guides situés face à face (topologie 3).

Surface (µm <sup>2</sup> )	Iph (mA)	Raie de battement (dBm)
35*4	6.6	-50
(structure 1)	7.4	-47
70*4	10.3	-49
(structure 2)	11	-48
35*26 (structure 6)	9.9	-46

**Tableau IV-10 :** Valeurs des raies de battement et des photocourants associés pour

 différentes surfaces dans le cas d'un éclairement par deux guides situés face à face

Nous pouvons remarquer que nous obtenons une raie de battement dans tous les cas de figure. En comparant les structures 1 et 2, le doublement de la longueur de la photodiode (de 35 à 70 $\mu$ m) entraîne la diminution de la valeur de la raie de battement : la puissance microonde est identique mais obtenue pour un photocourant plus important (11mA, pour la structure la plus longue, comparé à 7.4mA). Ceci est lié au recouvrement des deux faisceaux dans les 2 directions opposées.

En comparant les structures 1 et 6, nous pouvons observer une légère tendance à une diminution de la raie de battement, liée à une divergence du faisceau dans le cas de la structure 6. Ceci est profitable pour le recouvrement des faisceaux « face à face » mais défavorables pour des faisceaux « parallèles ».

Afin de déterminer si une faible puissance optique issue d'une voie peut entraîner l'obtention d'une raie de battement, nous avons réalisé l'expérience suivante sur la structure 8.

#### Caractérisation du sommateur opto-hyperfréquence



Figure IV-46 : Topologies de la structure 8

Les mesures sont réalisées en illuminant les voies 1 et 3. Nous mesurons les valeurs du photocourant obtenu pour chaque voie puis lorsque les 2 voies sont éclairées en même temps, ainsi que celle de la raie de battement. Ces mesures sont regroupées dans le tableau IV-11.

Iph i	Voies 1 et 3 éclairées
<b>Iph</b> <sub>1</sub> (mA)	5.42
Iph <sub>3</sub> (mA)	0.018
Iph <sub>somme</sub> (mA)	5.43
Raie de battement (dBm)	-68

**Tableau IV-11 :** Mesures des photocourants générés selon les voies illuminées et de la raie de battement

Nous pouvons en conclure que même si le photocourant généré, issu de la voie 3, est égal à  $18\mu$ A, correspondant approximativement à une puissance optique de l'ordre de  $20\mu$ W, nous obtenons quand même une raie de battement résultant du mélange des deux ondes optiques dans la photodiode.

Cette expérience montre que la topologie 3 n'est pas adaptée pour réaliser la fonction sommation car le moindre recouvrement des ondes optiques provoque l'hétérodynage optique.

# • Eclairement d'une diode par deux guides décalés (Topologie 1)

Le tableau IV-12 regroupe les valeurs des raies de battement à 0.6GHz obtenues avec leurs photocourants associés pour différents écartements séparant les guides dans le cas d'une sommation réalisée sur une photodiode unique (topologie 1).

Ecartement d (µm)	Iph (mA)	Raie de battement (dBm)
0 (structure 3)	11.9	-55
3 (structure 4)	13.7	-60
18 (structure 6)	9.9	-70

**Tableau IV-12 :** Valeurs des raies de battement et des photocourants associés pour différents

 écartements dans le cas de la topologie 1

Nous pouvons remarquer que la valeur de la raie de battement varie inversement à l'écartement entre les guides. L'obtention d'une raie de mélange, même pour un écartement de 18µm, peut s'expliquer, comme précédemment, par la divergence des ondes lors de la transition guide-photodiode, entraînant alors le mélange des deux ondes optiques dans la photodiode. Comme nous venons de le voir, il ne suffit que d'une faible intensité lumineuse, issue d'une voie, pour créer une raie de battement par mélange avec une autre voie. Les résultats regroupés dans le tableau montre que la topologie 1 n'est pas adaptée à la réalisation de la fonction sommation.

### • Eclairement de plusieurs diodes par deux guides décalés (Topologies 2 et 3)

Le tableau IV-13 regroupe les valeurs des raies de battement à 0.6GHz et de leurs photocourants associés pour différents écartements séparant les guides dans le cas d'une sommation réalisée sur plusieurs photodiodes élémentaires de surfaces différentes (topologies 2 et 3).

Ecartement d (µm)	Surface (µm <sup>2</sup> )	Iph (mA)	Raie de battement (dBm)
3	35*4 (structure 5)	11.7	-63
		4.4	non
	35*4	5.5	-83
20	(structure 9)	8	-73
	70*4 (structure 8)	10	-76
68		4.4	non
116	35*4	4.1	non
164	(structure 13)	4.4	non

**Tableau IV-13 :** Valeurs des raies de battement et des photocourants associés pour différents

 écartements et surfaces dans le cas des topologies 2 et 3

Nous pouvons remarquer que pour des écartements importants entre les photodiodes élémentaires, nous n'obtenons plus de raie de mélange. Il y a donc bien dans ce cas une décorrélation totale des faisceaux d'entrée. En comparant les résultats, nous pouvons conclure que l'utilisation de photodiodes élémentaires permet de diminuer le mélange des ondes.

# **C.** Conclusion

Ce chapitre s'est articulé autour de deux parties : les caractérisations des photodiodes évanescentes et celle des sommateurs opto-hyperfréquences réalisés sur substrat  $N^+$ .

Nous avons ainsi abordé dans un premier temps les caractérisations optiques des guides droits. Les mesures effectuées ont montré que les guides optiques réalisés sont dépendants à la polarisation et présentent des pertes de propagation de l'ordre de 20.4dB/cm en mode TE. Ces pertes relativement élevées peuvent s'expliquer par l'effet de rugosité sur les flancs du ruban des guides et sur leur surface, ainsi que par le phénomène d'absorption dû aux matériaux constituant le guide et au substrat, fortement dopés N. Les pertes optiques supplémentaires, liées à la courbure des guides, sont relativement faibles (de l'ordre de 0.2dB/cm).

Les mesures C(V) ont montré un bon accord théorie-mesure pour les composants réalisés sur substrat  $N^+$  et sont corroborées par la mesure de la bande passante réalisée optiquement. Elles permettent donc d'envisager des fréquences de coupure pour les structures comprises entre 7GHz et 10GHz. Cependant celles-ci peuvent facilement être améliorées par une diminution de la taille du plot de report du contact de type P et bien sûr par l'utilisation d'un substrat semi-isolant.

Les caractéristiques optiques statiques réalisées sur la structure 1 ( $35*4\mu m^2$ ) ont montré que les photodiodes élémentaires étaient dépendantes à la polarisation TE/TM et que leur coefficient de réponse est maximum en mode TE (0.36A/W) et minimum en mode TM. Les photodiodes réalisées présentent un rendement quantique interne  $\eta_{int}$  égal à 83% en mode TE, ce qui démontre également un bon accord théorie-mesure. La divergence de la lumière lors de la transition guide-photodiode a été démontrée en comparant les structures 1 ( $35*4\mu m^2$ ) et 3 ( $35*8\mu m^2$ ). Nous avons également démontré que les photodiodes réalisées sont peu sensibles à la longueur d'onde sur la gamme 1460-1660nm. Dans une deuxième partie, nous avons abordé les caractérisations des sommateurs optohyperfréquences.

Le principe de sommation statique, avec 2 lasers, a été démontré en analysant l'évolution du photocourant en fonction du nombre de voies éclairées (1 ou 2). L'étude de la structure 13 nous permet de conclure que le principe de sommation en statique validé pour 2 voies peut être étendu à 8 voies.

En utilisant cette configuration, nous avons montré que nos structures possèdent un bon fonctionnement en puissance: nous avons ainsi obtenu un photocourant de 21mA avant non-linéarité pour la structure 3 ( $35*8\mu m^2$ ). Nous avons également constaté un phénomène de saturation lente sur nos photodiodes.

Nous avons également étudié l'évolution de la dynamique en fonction du nombre de voies éclairées nous permettant de valider le principe de sommation en hyperfréquence. Nous avons ainsi obtenu une augmentation de la dynamique de 3dB à 5.37 GHz. Le modèle théorique est donc en adéquation avec les mesures. Nous avons également mesuré une augmentation de la puissance hyperfréquence de 6dB à 7.7GHz sans pouvoir hélas mesurer les niveaux de bruit. L'utilisation d'un déphaseur hyperfréquence sur une des voies permettrait d'assurer l'accord de phase entre les voies quelle que soit la fréquence d'utilisation, et notamment jusqu'à la bande passante des photodiodes (par exemple 10GHz pour la structure 7).

La présence de mélange optique entre les voies dans nos structures pour un écartement de 20µm a été démontrée. Dans le cadre de l'application radar, où les signaux reçus peuvent se situer à des fréquences différentes, ce mélange peut créer des échos fantômes et perturber les signaux utiles reçus. L'isolation optique des voies est donc nécessaire.

L'étude du mélange optique nous a permis également de conclure que la deuxième topologie est la mieux adaptée à la réalisation de la fonction sommation, l'utilisation d'un écartement suffisant entre les différentes voies permet alors d'assurer la décorrélation totale de chaque voie.

# REFERENCES

# [1] R.J. Deri and E. Kapon

### Low-loss III-V semiconductor optical waveguides

IEEE Journal of Quantum Electronics, 1991, Vol. 27, n° 3, pp. 626-640

# [2] D.L. Lee

# Electromagnetic principles of integrated optics

Ed. John Wiley and sons, 1986

### [3] I. Moerman, P. Van Daele and P.M. Demeester

A review on fabrication technologies for monolithic of tapers with III-V semiconductors devices

IEEE Journal of selected topics in quantum electronics, 1997, Vol. 3, n° 6, pp. 1308

[4] W.P. Dumke, M.R. Lorenz, G.D. pemif

Intra and interband free carriers absorption and the fundamental absorption edge in n type InP

Physical review, 1970, Vol. 1, n° 12, pp. 4668-4673

[5] K. Satzke, G. Weiser, R. Höger and W. Thulke

**Absorption and electroabsorption spectra of an InGaAsP/InP double heterostructure** Journal of applied physics, 1988, Vol. 63, n° 11, pp. 5485-5490

[6] K.J. Ebeling Integrated opto-electronics Springler velag, 1992

[7] R.G. Walker

Simple and accurate loss measurement technique for semiconductor optical waveguides Electronics Letters, 1985, Vol. 21, n°13, pp. 581-583

[8] T. Feuchter and C. Thirstrup

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

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

**[9]** L. Thery

La modulation de phase pour la commutation optique dans le système InP/GaInAsP Thèse, INPG, 1992

[10] K. Blary Matrices de commutation optique sur InP Thèse, Université Lille 1, 2003

[11] www.microchem.com/products/pdf/SU8\_2002-2025.pdf

[12] M. Zegaoui

**Commutateurs électro-optiques à haute diaphotie sur InP** Thèse, Université de Lille1, 2005

### S. Adachi [13]

**Thermal conductivity of InGaAsP** Properties of Indium Phosphide, EMIS Datareviews n° 6, Inspec Publications

### **CONCLUSION GENERALE**

Nous avons présenté dans ce mémoire une solution en optique intégrée pour la réalisation de la fonction sommation par voie optique. Elle consiste à réaliser un circuit optoélectronique constitué de N photodiodes PIN couplées par ondes évanescentes à N guides optiques et interconnectées entre elles de manière à ne présenter qu'un seul accès électrique. Ce circuit micro-optoélectronique est compliqué à optimiser, car tous les paramètres sont interdépendants : coefficient de réponse – bande passante – nombre de voies sommables – pertes optiques des guides ...

Dans cette conclusion, nous nous proposons, après avoir fait un récapitulatif du travail effectué, de poser les problèmes qui restent à résoudre puis de proposer quelques pistes à explorer afin d'aboutir à une structure dont les performances seraient celles voulues par les utilisateurs système.

Nous avons démontré dans le premier chapitre que la sommation optique permet d'améliorer le rapport signal à bruit du signal somme proportionnellement au nombre de voies par rapport à son équivalent dans le domaine hyperfréquence. Le procédé de sommation de signaux hyperfréquences par voie optique a ainsi été démontré à 1.75GHz en espace libre avec une photodiode de large surface par Thales Systèmes Aéroportés [1], et à 3GHz à l'aide d'un multiplexeur dans le cadre de la thèse de S. Blanc [2]. Une architecture optique de formation de faisceaux par l'utilisation conjointe de fibre dispersive (fonction retard) et de multiplexeur (fonction sommation) a également été validée expérimentalement sur une antenne linéaire composée de quatre éléments rayonnants et pour une bande de fréquence [2.7-3.3 GHz] [2].

Afin de concilier simultanément une bande passante élevée, une décorrélation totale des signaux optiques ainsi qu'une puissance de sortie élevée, nous avons donc choisi d'étudier et de fabriquer un circuit intégré micro-optoélectronique remplissant la fonction de sommation microonde. Le sommateur optimisé dans le 2<sup>ème</sup> chapitre, résultat de modélisations optiques et électriques, répond aux différents critères de ce cahier des charges. Nous avons ensuite proposé différentes géométries de sommateur à 2, 4 et 8 voies permettant d'atteindre la bande passante visée (20GHz). Trois topologies ont ainsi été envisagées.

Dans le 3<sup>ème</sup> chapitre, nous avons abordé dans une première partie le procédé technologique complet de réalisation du sommateur opto-hyperfréquence sur substrat semiisolant. Nous avons détaillé en particulier le verrou technologique que constitue le procédé de reprise des contacts sur ces composants fortement non-planaires. La hauteur finale du composant réalisé est ainsi de l'ordre de 6µm ! Nous avons ainsi mis au point un procédé reproductible permettant la reprise des contacts sur des composants « hauts » [3]. Nous pensons que ce processus est adaptable à tous les composants quelles que soient leurs dimensions et le type de substrat utilisé, dopé ou semi-isolant. A l'issue de premier procédé de réalisation, les caractérisations électriques ont permis de mettre en évidence la dégradation des propriétés électriques du matériau ternaire GaInAs, définissant la zone intrinsèque, lors de la gravure par plasma RIE. Nous avons ainsi mis au point un procédé de gravure des mesa P-I combinant la gravure sèche (afin d'assurer la verticalité du profil) à la gravure humide (afin de restaurer les propriétés électriques des couches et d'assurer l'homogénéité des épaisseurs gravées), et qui a été utilisé lors d'un deuxième procédé de réalisation technologique sur substrat dopé  $N^+$ . Seuls les sommateurs opto-hyperfréquences conçus sur substrat  $N^+$  ont pu être menés à leur terme ; ceci aura directement un effet sur la bande passante des dispositifs, les capacités parasites étant, dans cette configuration, plus élevées que sur substrat semiisolant.

Les travaux de caractérisation, présentés dans le 4<sup>ème</sup> chapitre, ont montré que les photodiodes évanescentes réalisées sont dépendantes à la polarisation TE/TM et que leur coefficient de réponse externe (incluant donc les guides amorces) est maximum en mode TE (0.36A/W) pour une surface de 35\*4µm<sup>2</sup> et minimum en mode TM. Les guides optiques réalisés sur substrat N<sup>+</sup> sont également dépendants à la polarisation et présentent des pertes de propagation relativement élevées de l'ordre de 20.4dB/cm en mode TE et des pertes de couplage de l'ordre de 4dB/face. L'optimisation des guides optiques est à parfaire afin d'obtenir un mode plus confiné et plus éloigné des bords du ruban du guide. L'intégration d'adaptateurs de mode intégrés monolithiquement au guide optique [4-6] permettrait d'améliorer le couplage entre les guides passifs et les fibres d'entrée et par suite de réduire les guides d'onde des sommateurs. Enfin, en procédant à un traitement anti-réfléchissant sur les faces latérales du composant, on pourra améliorer le couplage d'environ 30%. Nous avons également constaté un phénomène de saturation lente sur nos structures : nous avons ainsi obtenu un photocourant de 21mA avant non-linéarité pour une surface de 35\*8µm<sup>2</sup>. Les

fréquences de coupure, obtenues à l'aide des mesures C(V) sur substrat  $N^+$ , sont inférieures à 10 GHz mais elles peuvent facilement être améliorées par une diminution de la taille du plot de report du contact de type P ou encore, bien évidemment, par l'utilisation d'un substrat semi-isolant.

Les caractérisations menées sur les sommateurs opto-hyperfréquences ont permis de valider le principe de sommation statique pour 2 voies. Nous avons également validé le principe de sommation en hyperfréquence. Nous avons ainsi obtenu une augmentation de la dynamique de 3dB à environ 5.4 GHz pour 2 voies. Le modèle théorique est donc en adéquation avec les mesures. La réalisation de la fonction sommation à 20GHz aurait été possible si les sommateurs opto-hyperfréquences conçus sur substrat semi-isolant avaient pu être menés jusqu'à leur terme. La mise en place du nouveau banc de caractérisation permettra de valider la sommation hyperfréquence à 4 et 8 voies.

L'étude du mélange optique dans nos structures nous a permis de conclure que la deuxième topologie (1 guide et 1 photodiode élémentaire associée) est la mieux adaptée à la réalisation de la fonction sommation, l'utilisation d'un écartement suffisant entre les différentes voies permet d'assurer la décorrélation totale de chaque voie.

Différentes perspectives peuvent être d'ores et déjà entrevues quant à la poursuite de ce travail :

Afin d'éviter le mélange optique entre les voies, une solution consisterait à complètement séparer les détecteurs et donc à graver profondément les zones situées entre les rubans P-I des photodiodes, comme représenté sur la figure V-1, garantissant ainsi l'isolation optique de chaque voie.



Figure V-1 : Représentation schématique de la zone interruban P-I gravée

- 261 -

L'interconnexion des différents contacts N entre eux sera par contre plus délicat mais pourra alors se faire à l'aide du procédé original de reprise des contacts mis en place pour les contacts P (figure V-2).



**Figure V-2 :** Illustration de la reprise des contacts P et N pour les sommateurs réalisés sur substrat semi-isolant

Cette nouvelle géométrie de sommateurs à 8 voies, appartenant à la topologie 2, nous permettrait en plus d'avoir des accès hyperfréquences compatibles avec les pointes de mesure microondes. L'utilisation du substrat semi-isolant apporte en supplément la possibilité de réalisation de lignes d'accès coplanaires.

- L'utilisation de photodiodes de type UTC, en remplacement des photodiodes de type P-I-N de nos structures, pourrait permettre d'améliorer la bande passante tout en ayant de bonnes performances sous fortes puissances optiques [7-8]. Par couplage évanescent, un courant de saturation de 22mA a ainsi été obtenu associé à une fréquence de coupure de 50 GHz et un coefficient de réponse de 0.76A/W [9].
- Afin de diminuer les pertes optiques relativement élevées des guides optiques, une solution consisterait, dans une optique d'hybridation, à réaliser la majeure partie des accès passifs optiques des sommateurs à l'aide de guides fabriqués sur polymère ou verre. En

effet les pertes optiques obtenues pour de tels guides peuvent se révéler très faibles, de l'ordre de 0.3dB/cm [10]. Ces guides seraient ensuite couplés aux guides d'entrée des sommateurs qui seraient alors de faibles longueurs.

Bien que l'optimisation de la structure guidante sur matériaux III-V puisse amener à des guides optiques ayant des pertes linéiques plus faibles, il faut garder en mémoire que cette structure guidante doit aussi et peut-être principalement, permettre une longueur de couplage avec le détecteur la plus faible possible de manière à garantir la bande passante, le nombre de voies... Par ailleurs, la mise en conformité des accès optiques de la puce avec ceux d'un ruban de fibres optiques requiert un encombrement important sur le matériau III-V, les aspects économiques liés au coût de production d'un tel composant reste à approfondir pour déterminer la technologie la plus à même d'apporter la solution la plus viable.

Afin d'augmenter le nombre de voies sommables, une solution innovante serait d'avoir recours à des guides sub-microniques [11-13]. Pourvus d'adaptateurs de mode, ils présentent des apports bénéfiques en terme de confinement et donc d'isolation optique, mais surtout en terme de taille, caractéristique à ne pas négliger si l'on souhaite augmenter le nombre de guides. Ils autorisent de plus des changements de direction plus immédiats, ce qui nous permettrait de réduire les dimensions des parties passives des sommateurs. Nous présentons dans l'annexe les premiers tests de réalisation de guides sub-microniques réalisés sur le bâti ICP disponible au moment de l'étude à l'I.E.M.N.

En conservant la structure de la photodiode élémentaire optimisée à savoir une longueur de  $35\mu$ m et une épaisseur de zone intrinsèque égale à  $1.1\mu$ m, l'emploi de microguides de largeur 0.7 $\mu$ m et espacés de 0.5 $\mu$ m permettrait d'envisager la sommation de 32 voies pour une bande passante de 20 GHz. Ce calcul a été fait dans le cas de la topologie 2, qui semble la plus adaptée pour la réalisation de la fonction sommation. La surface de la diode serait alors égale à  $1325\mu$ m<sup>2</sup> ( $38*35\mu$ m<sup>2</sup>). La partie passive du sommateur optohyperfréquence peut être constituée de guides sub-microniques droits et de renvois à angle droit ou à faible rayon de courbure. L'écartement entre les guides décroît entre la face d'entrée (côté fibres optiques :  $250\mu$ m) et la zone d'arrivée sur le détecteur ( $0.5\mu$ m). A l'entrée des guides (du côté des fibres), l'encombrement est alors de 3.75mm, ce qui peut créer un déphasage hyperfréquence entre les voies, présentant la plus grande différence de

chemins optiques, de l'ordre de 125°. Cet écart entre les chemins optiques peut être compensé par la réalisation de guides sub-microniques de longueurs différentes. Un sommateur à 12 voies réalisé avec des guides sub-microniques est illustré figure V-3.



Figure V-3 : Illustration d'un sommateur à 12 voies réalisé avec des guides sub-microniques

Une autre alternative possible serait de reporter par collage à l'aide de BCB l'épitaxie sur matériaux III-V de la photodiode sur des guides sub-microniques réalisés en technologie SOI [14]. Après retrait du substrat InP, nous aurions ainsi des guides sub-microniques en silicium surmontés par des photodiodes P-I-N en matériaux de la filière InP. Les reports de LED et de lasers sur des substrats SOI ont ainsi été réalisés [15].

# REFERENCES

N. Breuil, C. Fourdin, P. Nicole, G. Ulliac, J.P. Vilcot et J. Chazelas
 Sommation optique de signaux hyperfréquences
 13<sup>èmes</sup> Journées Nationales Microondes, 2003, Lille

## [2] S. Blanc

Architectures optiques pour la formation de faisceaux multiples à la réception – Application aux antennes radar

Thèse de doctorat, INPG, 2004

[3] G. Ulliac, S. Garidel, J.P. Vilcot and P. Tilmant

Metallic air-bridge report process for non-planar compound semiconductor devices Microelectronic Engineering, 2005, Vol. 81, pp. 53-58

[4] I. Moerman, P. Van Daele and P.M. Demeester

A review on fabrication technologies for monolithic integration of tapers with III-V semiconductors devices

IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1997, Vol. 3, n°6, pp. 1308-1320

[5] K. Blary, B. Bellini, Y. Hernadez, J.F. Larchanche, J. Harari, J.P. Vilcot, F. Mollot and D. Decoster

Optical mode transformer for low loss coupling between fiber and InP based photonic circuits

Proceedings Wocsdice XXV, 2001, pp. 103-104

[6] S. Demiguel, L. Giraudet, L. Joulaud, J. Decobert, F. Blache, V. Coupé, F. Jorge, P. Pagnod-Rossiaux, E. Boucherez, M. Achouche, F. Devaux

**Evanescently coupled photodiode integrating a double stage taper for 40 Gb/s applications-compared performance with side-illuminated photodiodes** Journal of Lightwave Technology, 2002, Vol.20, n°12, pp. 2004-2014

[7] N. Shimizu, Y. Miayamoto, A. Hirano, K. Sato and T. Ishibashi **RF saturation mechanism of InP/InGaAs uni-travelling-carrier photodiode** Electronics Letters, 2000, Vol. 36, n° 8, pp. 750-751

[8] H. Ito, T. Ohno, H. Fishimi, T. Furuta, S. Kodoma and T. Ishibashi
 60 GHz high output power uni-travelling-carrier photodiodes with integrated bias circuit

Electronics Letters, 2000, Vol. 36, n° 8, pp. 747-748

[9] M. Achouche, V. Magnin, J. Harari, F. Lelarge, E. Derouin, C. Jany, D. Carpentier, F. Blache, D. Decoster

High performance evanescent edge coupled waveguide unitraveling-carrier photodiodes for > 40 Gb/s optical receivers

IEEE Photonics Technology Letters, 2004, Vol.16, N°2, pp. 584-586

[10] M. Yin, R. Oven and P.A. Davies

Low-loss Cu<sup>+</sup>-Na<sup>+</sup> ion exceed optical channel waveguide in glass Electronics Letters, 2004, Vol. 40, n°20

[11] A. Beaurain

**Etude de fonctions passives à base de nanostructures photoniques** Thèse, Université Lille 1, 2003

[12] V. Van, P.P. Absil, J.V. Hryniewicz and P.T. Ho

Propagation loss in single-mode GaAs-AlGaAs microring resonators: measurement and model

IEEE Journal of Lightwave Technology, 2001, Vol. 19, n°11, pp. 1734-1739

[13] S. Dupont, A. Beaurain, P. Miska, M. Zegaoui, J.P. Vilcot, H.W. Li, M. Constant, D. Decoster and J. Chazelas

Low-loss InGaAsP/InP submicron optical waveguides fabricated by ICP etching Electronics Letters, 2004, Vol. 40, n°14, pp. 865-866

[14] R. Baets, P. Dumon, W. Bogaerts, G. Roelkens, D. Taillaert, B. Luyssaert, G. Priem, G. Morthier, P. Bienstman and D. Van Thourhout
Silicon-on-Insulator based nano-photonics: why, how, what for?
IEEE International Conference on Group IV Photonics, 2005, pp. 168-170

[15] R. Baets, W. Bogaerts, P. Dumon, G. Roelkens, I. Christiaens and alsIntegration of photonic functions in and with siliconProceeding ESSDERC, 2004, pp.57-62

Annexe : Réalisation de guides submicroniques

En parallèle à cette étude sur guide classique, nous avons effectué quelques tests par technique ICP **[1-3]** afin de réaliser un sommateur opto-hyperfréquence en utilisant des guides submicroniques.

Le travail technologique a concerné:

- la détermination d'un masque de gravure (utilisant la lithographie électronique) susceptible de permettre d'une part la définition de motifs submicroniques avec une résolution adéquate à la fabrication des topologies de sommateur et d'autre part la gravure par technique ICP (résistance à celle-ci)
- la mise au point des procédés de gravure.

Les tests sur les procédés de gravure ont été menés sur le bâti ICP disponible actuellement à l'I.E.M.N. Celui-ci possède 2 chambres de gravure, une réservée aux procédés à base de chlore (Cl<sub>2</sub>/He) et l'autre à ceux à base méthane/hydrogène/argon (CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/Ar). Nous allons étudier ces deux chimies chlorée [4-5] et carbonée [6-7] sur la gravure du matériau InP.

Cette première série de tests a été effectuée en utilisant un masque métallique de nickel ou de germanium. Ces masques ont été obtenus par la technique de lift-off après écriture électronique. Les largeurs des guides submicroniques réalisés sont comprises entre  $0.1 \mu m$  et  $1 \mu m$ .

### 1. Gravure en chimie chlorée

Ces tests ont été effectués en utilisant un masque de gravure en nickel.

Les paramètres du plasma de gravure en chimie chlorée (Cl<sub>2</sub>/He) sont regroupés dans le tableau VI-1.

La profondeur de gravure atteinte est comprise entre 2 et 2,6 µm.

Masque utilisé	Nickel			
Matériau gravé	InP			
Epaisseur gravée	2 à 2.6 µm			. <u> </u>
Plasma de gravure	Débit (sccm)	Puissa	nce (W)	Pression (Torr)
Cl <sub>2</sub>	4	RIE	ICP	
Не	26	100	400	0.010
Temps de gravure	240 secondes			

Tableau VI-1: Paramètres du plasma de gravure RIE-ICP utilisé en chimie chlorée

Les guides les plus fins  $-0,1 \ \mu m$  - ont résisté au procédé (figure VI-1(a)), un microguide typique (environ 0,5  $\mu m$ ) est présenté en figure VI-1(b). Le profil de gravure est droit mais présente de nombreuses "aspérités verticales" (figure VI-1(c)), ceci pourrait être attribué au plasma et/ou au masque métallique utilisés. Lors de la gravure de deux microguides proches (espacés de 0.5 $\mu$ m), la gravure inter-guide s'effectue à une vitesse moindre, il en résulte alors un espace inter-guide beaucoup moins gravé que le reste de la structure (figure VI-1(d)). Cet effet ne peut, a priori, pas être contrebalancé par des conditions de gravure différentes, il faudra donc en tenir compte dans la conception des composants et espacer les microguides d'au moins 1 $\mu$ m ou prévoir un temps de gravure suffisant (mais dans ce cas, il faut vérifier la tenue du masque).



(a) Microguide de 0,1 µm



(b) Microguide de 0,6 µm

#### Annexe : Réalisation de guides submicroniques



(d) Gravure inter-guide

Figure VI-1 : Photographies prises au MEB des microguides après gravure

Comme nous pouvons le constater sur les différentes vues de la figure VI-1, le substrat au pied des structures est gravé en pente douce. Le différentiel de hauteur entre le pied de gravure et la surface du substrat ("loin" des motifs gravés) est de l'ordre de 0.6µm soit de l'ordre de 30% de la profondeur gravée du ruban du microguide. La gravure méthane/hydrogène/argon permettra de réduire ce différentiel de hauteur qui, s'il se trouve près de la zone guidante (guide faiblement gravé), va favoriser la fuite optique vers le substrat. Enfin le masque en nickel n'a pu être ôté après gravure sans détériorer les motifs réalisés. Nous avons alors utilisé un masque en germanium.

### 2. Gravure en chimie carbonée (méthane/hydrogène/argon)

Ces tests ont été effectués en utilisant un masque de gravure en germanium.

Les paramètres du plasma de gravure en chimie carbonée (CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/Ar) sont regroupés dans le tableau VI-2.

Masque utilisé	Germanium			
Matériau gravé	InP			
Epaisseur gravée	1.2 μm			
Plasma de gravure	Débit (sccm)	Puissance (W)		Pression (Torr)
CH <sub>4</sub>	24 / 30	RIE	ICP	
H <sub>2</sub> Ar	50 10	225	100	0.065
Temps de gravure	600 secondes			

Tableau VI-2 : Paramètres du plasma de gravure RIE-ICP utilisé en chimie carbonée

La profondeur gravée est ici de l'ordre de  $1,2\mu m$  avec un « pied » de gravure légèrement en pente douce (figures VI-2(c) et (d)). Nous remarquons de suite que nous avons perdu la verticalité des flancs de gravure obtenue avec le plasma chloré précédent. Nous pouvons observer sur les figures VI-2(a) et (b) que le fond de gravure est propre.



(a) Vue globale d'un motif gravé



(c) Profil de gravure obtenu avec un procédé méthane-argon ( $CH_4/H_2/Ar$ : 24/50/10 sccm).



(b) Détail de l'encadré de la figure (a)



(d) Profil de gravure obtenu avec un procédé méthane-argon (CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/Ar: 30/50/10 sccm).

Figure VI-2 : Photographies prises au MEB des microguides après gravure

Nous avons fait varier les proportions de méthane ( $CH_4/H_2/Ar$ : 30/50/10 sccm) afin d'en déterminer l'influence sur la gravure des motifs (figure VI-2(d)). Hormis une augmentation du dépôt des polymères carbonés lors du processus de gravure, aucune modification tangible n'a été observée sur le résultat.

Ces essais avec un masque en germanium ont validé le fait que le fond de gravure est propre par cette chimie. Néanmoins, le masque en germanium a lui aussi posé quelques problèmes lors de son retrait.

#### 3. Conclusion

Les techniques de gravure déployées ont montré que:

- les gravures sèches en chimie chlorée (Cl<sub>2</sub>/He) amènent des flancs de gravure verticaux mais un fond de gravure "herbeux"
- les gravures sèches en chimie carbonée (CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/Ar) amènent un fond de gravure propre au détriment de la verticalité des flancs de gravure.

Ces expériences ont permis d'orienter le choix optimal du procédé de gravure sur une base mixte chlore/méthane **[8]**. Ce procédé est un des véhicules tests pour l'acquisition du nouveau bâti de gravure ICP. En effet un nouvel équipement devrait être bientôt disponible au laboratoire permettant une optimisation plus complète du processus de fabrication à partir des résultats obtenus jusque maintenant.

Par ailleurs, les masques métalliques ont montré une résistance suffisante aux plasmas de gravure, mais leur retrait après ceux-ci est problématique voire impossible. Une autre technique de réalisation de masques de gravure devra être développée.

# REFERENCES

[1] C. Cardinaud

ICP reactors for plasma processing

Le Vide, 1999, n°291, 1/4, pp. 20-40

[2] C. Cardinaud, M-C. Peignon and P-Y Tessier

**Plasma etching: principles, mechanisms, application to micro-and-nano-technologies** Applied surface science, 2000, Vol. 164, pp. 72-83

[3] B. Humphreys

The application of inductively coupled plasmas for optoelectronic device fabrication Semiconductor Fabtech, Document Oxford Instruments

[4] J.W. Lee, E.S. Lambers, C.R. Abernathy, S.J. Pearton, R.J. Shul, F. Ren, W.S. Hobson and C. Constantine

Inductively coupled plasma etching of III-V semiconductors in Cl2-based chemistries Material science in semiconductor processing, 1998, Vol. 1, pp. 65-73

[5] Y.B. hahn, D.C. Hays, H. Cho, K.B. Jung, C.R. Abernathy, S.J. Pearton and R.J. Shul Effect of inert gas additive species on Cl2 high density plasma etching of compound semiconductors. Part. II. InP, InSb, InGaP and InGaAs Applied surface science, 1999, Vol. 147, pp. 215-221

[6] J.A. Diniz, J.W. Swart, K.B. Jung, J. Hong and S.J. Pearton Inductively Coupled Plasma Etchning of In-Based Compound Semiconductors in CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/Ar

Solid-State Electronics, 1998, Vol. 42, n°11, pp. 1947-1951

[7] T. Kurobe, T. Mukaihara, N. Yamanaka, N. Iwai and A. Kasukawa CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> inductively coupled plasma (ICP) etching fot high performance GaInAsP buried heterostrcuture lasers IPRM 2000 pp. 506-509

IPRM 2000, pp. 506-509

[8] A. Beaurain
 Etude de fonctions passives à base de nanostructures photoniques
 Thèse, Université Lille 1, 2003

#### Réalisation en optique intégrée de la fonction sommation de signaux microondes : étude et fabrication de structures photodétectrices spécifiques en filière InP

Ce travail de thèse, réalisé en collaboration avec Thales Systèmes Aéroportés, s'inscrit dans un projet visant à démontrer la faisabilité du pilotage d'antennes à balayage par voie optique. Il consiste à réaliser la fonction de sommation de signaux hyperfréquences provenant des éléments récepteurs/rayonnants par voie optique dans la bande de fréquence 0-20 GHz. En effet cette fonction, associée aux fonctions retard et pondération, est nécessaire à la formation de faisceaux à la réception.

Dans une première partie, nous présentons les avantages apportés par l'emploi d'un sommateur optique à la place d'un combineur hyperfréquence classique. Nous avons ainsi démontré que la sommation optique permet d'améliorer le SNR du signal somme par rapport à son équivalent dans le domaine hyperfréquence.

Dans une seconde partie, nous proposons une solution originale en optique intégrée. Elle consiste à réaliser un circuit optoélectronique constitué d'une photodiode PIN couplée par ondes évanescentes à N guides optiques. Nous avons ainsi modélisé les performances optiques et électriques de ces photodiodes afin qu'elles répondent aux différents critères du cahier des charges pour réaliser la fonction sommation. Les différentes géométries de sommateur à 2, 4 et 8 voies envisagées sont également détaillées.

Dans une 3<sup>ème</sup> partie, nous abordons le procédé technologique complet de réalisation des sommateurs opto-hyperfréquences en détaillant en particulier les verrous technologiques rencontrés sur ces composants fortement non-planaires.

Enfin dans une 4<sup>ème</sup> partie, nous présentons les caractérisations optiques et électriques des photodiodes évanescentes et celles des sommateurs opto-hyperfréquences. Les résultats de caractérisation ont montré la validité du concept de sommation à 5.4GHz.

#### Summation function of microwave signals using integrated optics : study and fabrication of InP based specific photodiodes

This work, realized in collaboration with Thales Airborne Systems, lies within a project aiming at demonstrating the feasibility of active antenna control by optical means. It more particularly deals with the function of optical summation of microwave signals. These are coming from the different elements of the antenna and cover a 20 GHz band for broadband operation. Indeed this function combined with delay and balancing functions, is necessary to complete the whole beam formation system for the reception part of optically controlled active antennas.

In a first part, advantages of optical summation against microwave summation are presented. The improvement of signal to noise ratio using optical summation compared to the pure microwave summation is demonstrated.

In a second part, an original solution using integrated optics is proposed. This optoelectronic circuit is based on a PIN photodiode evanescently coupled to N input waveguides. Optical and electric performances of this photodiode have been modelled and optimized in order to fulfil the different targets of the summation function. Various geometries for 2, 4 and 8 input signals are also detailed.

In a third part, the complete technological process is introduced, and in particular the main technological difficulties that have been met on these non-planar components are detailed.

Finally in the last part, optical and electric characterisations of these specific photodiodes for summation purpose are presented. The results of characterisation have shown the validity of the concept of summation at 5.4 GHz.

