



HAL
open science

Étude et Modélisation de la Fiabilité des dispositifs avancés en photonique intégrés sur Silicium

Fatoumata Sy

► **To cite this version:**

Fatoumata Sy. Étude et Modélisation de la Fiabilité des dispositifs avancés en photonique intégrés sur Silicium. Optique / photonique. Université Grenoble Alpes [2020-..], 2022. Français. NNT : 2022GRALT015 . tel-03691775

HAL Id: tel-03691775

<https://theses.hal.science/tel-03691775v1>

Submitted on 9 Jun 2022

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

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

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

Spécialité : OPTIQUE ET RADIOFREQUENCES

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

Fatoumata SY

Thèse dirigée par **Jean-Emmanuel BROQUIN**, Université
Grenoble Alpes

préparée au sein du **Laboratoire Institut de Microélectronique,
Electromagnétisme et Photonique - Laboratoire
d'hyperfréquences et de caractérisation**
dans l'**École Doctorale Electronique, Electrotechnique,
Automatique, Traitement du Signal (EEATS)**

Étude et Modélisation de la Fiabilité des dispositifs avancés en photonique intégrés sur Silicium

Reliability study and modeling of advanced devices in integrated silicon photonic

Thèse soutenue publiquement le **11 mars 2022**,
devant le jury composé de :

Monsieur Jean-Emmanuel BROQUIN

PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Grenoble INP, Directeur de thèse

Monsieur Philippe SIGNORET

PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Université de Montpellier ,
Examineur

Monsieur Francis CALMON

PROFESSEUR DES UNIVERSITES, INSA Lyon, Rapporteur

Monsieur Marco PALA

Chargé de recherche HDR, CNRS DELEGATION ALPES, Rapporteur

Monsieur Pascal XAVIER

PROFESSEUR DES UNIVERSITES, UNIVERSITE GRENOBLE ALPES,
Président

Monsieur Quentin RAFHAY

Maître de conférences HDR, Grenoble INP, Co-directeur de thèse



TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	1
TABLE DES FIGURES	4
REMERCIEMENTS	9
INTRODUCTION GENERALE.....	11
CHAPITRE 1 : LA PHOTONIQUE SUR SILICIUM POUR LES TELECOMMUNICATIONS OPTIQUES.....	13
I. Introduction.....	15
II. Développement de la photonique sur silicium	15
II.1. La photonique pour les télécommunications.....	15
II.2. Utilisation du silicium pour la photonique	16
III. Le transciever : émetteur/récepteur optique	17
III.1. Les guides d'onde	18
III.2. Le réseau de couplage.....	20
III.3. La photomodulation	21
III.3.a. La modulation d'intensité.....	21
III.3.b. La modulation de phase	22
III.3.c. Structures pour la modulation de la concentration des porteurs libres.....	25
III.3.d. Figures de mérite d'un modulateur de phase.....	26
III.4. La photodétection	28
III.4.a. Principe de la photodétection	28
III.4.b. Utilisation du Germanium	29
III.4.c. Architectures d'une photodiode	30
III.4.d. Couplage de la lumière dans une photodiode	32
III.4.e. Caractéristiques principales d'une photodiode	32
III.4.e.2. Le courant d'obscurité.....	33
IV. Fiabilité des composants photoniques sur silicium.....	34
IV.1. Les protocoles standard	35
IV.2. Etat de l'art de la fiabilité des composants photoniques sur silicium.....	35
V. Cadre et objectif de la thèse	37
VI. Conclusion	38
CHAPITRE 2 : FIABILITE DES PHOTOMODULATEURS ET PHOTODIODES SOUS BOITIER	39
I. Introduction.....	41
II. Le boitier photonique.....	41

II.1. Structures de tests utilisés	41
II.2. Méthode de mise sous boîtier.....	43
III. Banc et méthode de mesure pour les composants photoniques sous boîtier	45
III.1. Description du banc.....	45
III.2. Qualification du banc	47
III.2.a. Incertitude et stabilité des mesures.....	47
III.2.b. Impact des perturbations environnementales sur les mesures.....	51
IV. Caractérisation de la fiabilité des composants photonique sous boîtier.....	52
IV.1. Caractérisation des photomodulateurs en boîtier	52
IV.1.a. Chaîne de mesure, paramètres mesurés et méthodologie.....	52
IV.1.b. Perte statique et perte dynamique	53
IV.1.c. Comportement en température.....	55
IV.1.d. Mesure sous contraintes	57
IV.2. Etude de la photodiode mise en boîtier.....	59
IV.2.a. Paramètres mesurés et méthode.....	59
IV.2.b. Comportement en tension	59
IV.2.c. Comportement en température.....	61
IV.2.d. Mesure sous contraintes	62
IV.3. Rôle du boîtier	65
V. Conclusion	66
CHAPITRE 3 : MECANISMES DE DEGRADATION DES PHOTODETECTEURS	
GERMANIUM SUR SILICIUM	
I. Introduction.....	71
II. Géométrie du photodétecteur	71
III. Etude de la fiabilité sur gaufre	72
III.1. Structure de test.....	72
III.2. Instrumentation	73
III.3. Protocole expérimental.....	73
III.4. Résultats	74
III.4.a. Dégradation des courants d'obscurité et photonique	74
III.4.b. Dégradation de la responsivité.....	75
III.4.c. Dégradation de la fréquence de coupure	76
IV. Modélisation analytique et physique	77
IV.1. Mécanismes de conduction dans une photodiode PIN.....	77
IV.1.a. Courant de dérivation	77
IV.1.b. Courant de diffusion.....	78

IV.1.c. Le courant de conduction par effet tunnel	78
IV.2. Modélisation des courants	78
IV.2.a. Modèle de dérive	79
IV.2.b. Modèle de diffusion	80
V. Exploitation du modèle et comparaison avec les résultats expérimentaux	82
V.1. Résultats du modèle	82
V.2. Estimation du rapport entre les différentes contributions de courant	85
V.2.a. Influence de la largeur de la ZCE sur les différentes contributions.....	85
V.2.b. Influence de la durée de vie effective des porteurs.....	87
V.3. Ajustement du modèle sur les mesures avant stress.....	88
V.4. Explication des résultats expérimentaux	89
V.4.a. Variation de la géométrie.....	89
V.4.b. Variation de la durée de vie effective	90
V.5. Ajustement du modèle sur les dégradations expérimentales	91
V.6. Origines possibles de la variation de la durée de vie	93
VI. Validation du modèle	93
VI.1. Mesure de l'énergie d'activation.....	93
VI.2. Mesure de l'énergie d'activation du courant d'obscurité.....	94
VI.3. Mesure de l'énergie d'activation du courant photonique	95
VII. Comparaison des structures homojonction et hétérojonction.....	96
VII.1. Architecture.....	97
VII.2. Résultats expérimentaux.....	97
VII.3. Modélisation.....	99
VIII. Modélisation de la fréquence de coupure	100
VIII.1. Fonctionnement en haute fréquence	100
VIII.2. Analyse du comportement sous stress	101
IX. Synthèse des résultats et perspectives	104
X. Conclusion	105
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	107
PUBLICATIONS	109
Article dans une revue	109
Conférences internationales.....	109
BIBLIOGRAPHIE	111

TABLE DES FIGURES

Figure I.1: Evolution du trafic dans les centres de données [4].....	15
Figure I.2: Centre de données de Google, Lenoir, Caroline du Nord [5]	16
Figure I.3 : Spectre d'absorption du silicium [9]	17
Figure I.4 : Principe du transciever	17
Figure I.5 : Schéma détaillé du transciever montrant les différents éléments de l'émetteur et du récepteur	18
Figure I.6 : différentes géométries de guide d'onde	19
Figure I.7 : le guide d'onde à arête de la technologie PIC25G de STMicroelectronics [10].....	19
Figure I.8 : Modes de couplage entre une fibre et un guide d'onde a) couplage vertical b) couplage par la tranche	20
Figure I.9 : coupleur à réseau, principe de fonctionnement (a) ; implémentation (b) [10]	21
Figure I.10 : Illustration de l'effet Franz Keldish dans un semi-conducteur [11].....	22
Figure I.11 : principe de fonctionnement du photomodulateur Mach Zehnder.....	23
Figure I.12: variation du coefficient d'absorption du silicium en fonction de la concentration des électrons libres [20].....	25
Figure I.13 : structure MOS en régime d'accumulation pour la modulation de phase	25
Figure I.14 : Structure PIN pour la modulation de phase par injection de porteurs	26
Figure I.15 : Structures pn et pin pour la modulation de phase par déplétion des porteurs.....	26
Figure I.16 : Principe de la photoconduction.....	28
Figure I.17 : Photogénération de porteurs dans un semi-conducteur a) à gap direct b) à gap indirect	29
Figure I.18 : Spectre d'absorption du Germanium	30
Tableau I.1 : Propriétés du Germanium et du Silicium.....	30
Figure I.19 : Illustration de la photogénération de courant dans une jonction pn	31
Figure I.20 : Les différentes structures de photodiodes Ge sur Silicium	31
Figure I.21 : les différents modes de couplage de la lumière dans une photodiode Ge avec guide d'onde Si intégré	32
Figure I.22 : courant d'obscurité et photocourant dans une photodiode.....	33
Tableau I.2 : Exemple de tests Telcordia pour une photodiode.....	35
Figure I.23: Etude de la dégradation du photodétecteur à homojonction Ge : a) architecture du photodétecteur b) : dégradation du courant d'obscurité mesurée au cours d'un stress [30]	36
Figure I.24: Etude de l'Imec de la dégradation de photodétecteur à hétérojonction : a) Architecture de la photodiode étudiée, b) Dégradation du courant d'obscurité mesurée [32]	37
Figure II.1 : Schéma d'une structure de test simple d'un photomodulateur et de son inclusion dans une chaîne de mesure.	42
Figure II.2 : Structure de test permettant d'isoler les dégradations électriques du HSPM.....	42
Figure II.3 : Structure de test permettant la mesure du déphasage induite par une tension dans un photomodulateur : a) Structure Mach Zehnder b) Structure équivalente HSPM Phase Shift	43
Figure II.4 : Schéma des connexions électriques et optiques de la puce photonique.....	44
Figure II.5 : Boitier et circuit de connexion électrique.....	45
Figure II.6 : Chaîne de mesure du banc de test	45
Figure II.7 : Principaux instruments optiques du banc de mesure	46
Figure II.8 : Principe de fonctionnement d'un commutateur et d'un séparateur optique	46
Figure II.9 : Schéma fonctionnel du montage laser + puissance-mètre	47
Figure II.10 : Puissance mesurée en fonction du temps pour la chaîne de mesure laser + puissance-mètre, pour 7 consignes de puissance différentes de la source laser	48

Figure II.11 : Puissance mesurée en fonction du temps pour la chaîne de mesure laser + puissance-mètre, pour 7 consignes de puissance différentes de la source laser	48
Figure II.12 : Schéma fonctionnel du montage laser + séparateur + puissance-mètre	49
Figure II.13 : Puissance mesurée en fonction du temps pour la chaîne de mesure laser + séparateur + puissance-mètre, pour 7 consignes de puissance différentes de la source laser	49
Figure II.14 : Puissance mesurée en fonction du temps pour la chaîne de mesure laser + séparateur + puissance-mètre, pour les 8 sorties du séparateur, pour une puissance du laser de 7 dBm	50
Figure II.15 : Schéma fonctionnel du montage laser + commutateur + puissance-mètre	50
Figure II.16 : Puissance mesurée en fonction du temps pour la chaîne de mesure laser + commutateur + puissance-mètre, pour les 4 voies du commutateur	50
Figure II.17 : Schéma fonctionnel de la chaîne de mesure d'un guide optique intégré	51
Figure II.18 : Puissance mesurée au cours de la perturbation, entourée en rouge.	51
Figure II.19 : Schéma fonctionnel de la chaîne de mesure de deux photomodulateurs intégrés.....	52
Figure II.20 : Mesure en répétabilité de la perte statique de l'ensemble de la chaîne de mesure présentée sur la figure II.20.....	53
Figure II.21 : Perte dynamique du photomodulateur de 20 mm en fonction de la tension inverse appliquée (valeur absolue) pour trois puissances du laser.....	54
Figure II.22 : Décalage de phase de la structure HSPM Shift en fonction de la tension appliquée pour 3 puissances optiques.	54
Figure II.23 : Mesure en répétabilité de la perte statique de l'ensemble de la chaîne de mesure pour trois températures différentes.....	55
Figure II.24 : Pertes dynamiques du photo-modulateur de 20 mm en fonction de la tension inverse appliquée (valeur absolue) pour trois températures différentes	56
Figure II.25 : Décalage de phase en fonction de la tension inverse, mesurée sur le photomodulateur de 1 mm, pour trois températures différentes.....	56
Figure II.26 : Evolution des pertes statiques d'un photomodulateur de 20 mm de long au cours d'un stress en tension de 5V à une température de 85°C mesurée pendant 3×10^6 s.....	57
Figure II.27 : Pertes dynamiques en fonction du temps, pour une contrainte en tension de 5V à 85°C pendant 3×10^6 s.....	58
Figure II.28 : Décalage de phase en fonction du temps, pour une contrainte en tension de 5V à 85°C pendant 3×10^6 s.....	58
Figure II.29 : Chaîne de mesure du courant dans la photodiode.....	59
Figure II.30 : Courant d'obscurité en fonction de la tension pour 10 photodiodes	60
Figure II.31 : Courant photonique en fonction de la tension pour 11 photodiodes.....	60
Figure II.32 : Courant photonique en fonction de la température pour 5 puissances de consignes du laser. Chacun des graphiques représente une photodiode.....	62
Figure II.33 : Courant d'obscurité en fonction du temps de stress pour 3 tensions différentes.....	62
Figure II.34 : Courant d'obscurité en fonction du temps de stress pendant un stress de 9V à 30°C et 50°C	62
Figure II.35 : Courant photonique en fonction du temps de stress pour 3 tensions différentes	63
Figure II.36 : Schéma fonctionnel de la chaîne de mesure utilisée pour mesurer le courant photonique .	63
Figure II.37 : Courant photonique pendant 10^4 s à l'aide de la chaîne de mesure et de la structure de test décrites sur la figure II.36.....	64
Figure II.38 : Puissance du laser pendant les 10^4 s de la mesure de la figure II.37	64
Figure II.39 : Puissance du laser mesurée à la sortie du guide d'onde pendant les 10^4 s de la mesure de la figure II.37	65
Figure II.40: Photographie de l'intérieur du boîtier de test montrant la puce photonique et les interconnexions électriques et optiques.....	66

Figure III.1: architecture de la photodiode à homojonction montrant les matériaux, les différentes dimensions caractéristiques ainsi que les zones dopées : a. vue de dessus, b. vue transverse	71
Tableau III.1: Concentrations des dopages des différentes zones p, i, n ainsi que du Germanium intrinsèque	72
Figure III.2: Description de la structure de test composée de la photodiode et des pads électriques et optiques.....	72
Figure III.3: instrumentation utilisée pour réaliser les tests de fiabilité sur wafer.....	73
Figure III.4: Protocole expérimentale utilisé pour le test de fiabilité montrant les différentes étapes de stress et de caractérisation	74
Figure III.5: Evolution du courant d'obscurité au cours du stress montrant une première oscillation suivie d'une augmentation très importante	75
Figure III.6: évolution du courant photonique et de la puissance optique pendant le stress montrant une similarité entre ces deux mesures.....	75
Figure III.7: évolution de la responsivité au cours du stress.....	76
Figure III.8: Fréquence de coupure mesurée au cours du stress.....	76
Figure III.9: illustration de la génération thermique dans la ZCE.....	77
Figure III.10: Schéma de la section transversale de la géométrie de la photodiode utilisée pour le modèle	78
Figure III.11: Géométrie de la photodiode pour le calcul du courant de diffusion	80
Figure III.12: Concentration des porteurs générés thermiquement dans les zones dopées. Les électrons sont générés dans la zone p+ et les trous dans la zone n+	82
Figure III.13: Densité du courant de diffusion des électrons et des trous générés dans le noir	83
Figure III.14: Concentration des électrons et des trous photogénérés dans les zones dopées	83
Figure III.15: Courants de diffusion photonique des électrons et des trous	84
Figure III.16: Courants d'obscurité de diffusion et de dérive en fonction de la tension appliquée	84
Figure III.17: Courants de diffusion et de dérive photonique en fonction de la tension appliquée	85
Figure III.18: Variation des courants de dérive et de diffusion d'obscurité en fonction de la largeur de la ZCE	86
Figure III.19: Variation des courants photonique de diffusion et de dérive en fonction de la largeur de la ZCE	86
Figure III.20: Evolution des courants de dérive et de diffusion dans le noir en fonction d'une variation de la durée de vie effective des porteurs dans le Ge	87
Figure III.21: Impact de la variation de la durée de vie effective des porteurs sur les courants de diffusion et de dérive photoniques	87
Figure III.22: Ajustement des mesures des courants d'obscurité et photonique sur le modèle des courants correspondants	89
Figure III.23: Impact de la variation de la ZCE sur le courant d'obscurité et la responsivité.....	90
Figure III.24: Impact de la variation de la durée de vie effective sur le courant d'obscurité et la responsivité	90
Figure III.25: ajustement des mesures expérimentales aux modèles du courant d'obscurité et de la responsivité avec la même variation de la durée de vie	91
Figure III.26: Dégradation du courant d'obscurité. Stress à 85°C et différentes tensions	92
Figure III.27: Dégradation du courant d'obscurité. Stress à 9V et à différentes températures	92
Figure III.28: Protocole de mesure des courants pour une extraction des énergies d'activation.....	94
Figure III.29: Courant d'obscurité en fonction de la tension et de la température : a) Mesures avant stress b) Mesures après stress.....	94
Figure III.30: Energie d'activation thermique en fonction de la tension. a) Mesures effectuées avant le stress b) Mesures après stress	95

Figure III.31: Courant photonique mesurée en fonction de la tension à différentes températures.....	96
Figure III.32: Coupe TEM de la structure hétérojonction montrant les différents matériaux de la jonction	97
Figure III.33: Evolution du courant d'obscurité au cours du stress, impact de la tension de stress	98
Figure III.34: Evolution du courant d'obscurité en fonction de la température appliquée au cours du stress	98
Figure III.35: Ajustement du modèle sur le courant de d'obscurité de la photodiode à simple hétérojonction verticale.....	99
Figure III.36: Schéma équivalent d'une photodiode PIN	100
Figure III.37: Schéma de la structure de test des contacts de la photodiode	102
Figure III.38: Evolution de la résistance du contact au cours du stress, impact de la température à 3mA de courant injecté	103
Figure III.39: Evolution de la résistance du contact au cours du stress, impact de la température à 4mA de courant injecté	103
Figure III.40: Evolution de la résistance du contact au cours du stress, impact du courant injecté à 350°C	103
Figure III.41: Coupe TEM de la structure de test d'un contact montrant la fusion du contact	104

REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord STMicroelectronics, le laboratoire IMEP LaHC, et le CEA Leti dont la collaboration a permis la réalisation de ces travaux de recherche. Je remercie également l'ANRT pour avoir subventionné cette thèse dans le cadre d'une convention CIFRE.

Merci à mon encadrant David Roy pour avoir eu confiance en moi et pour m'avoir donné l'opportunité de faire cette aventure très riche en apprentissage et en rencontres. Je retiens de toi des qualités qui m'ont beaucoup inspiré : rigueur et détermination. J'ai eu beaucoup de plaisir à travailler avec toi.

J'adresse mes sincères remerciements et ma reconnaissance à mes directeurs de thèse, Jean-Emmanuel Broquin et Quentin Rafhay, pour leur engagement, leur expertise sur les composants photoniques et les semi-conducteurs et leur encadrement de qualité qui ont mené à l'aboutissement de ces travaux. Je suis consciente de la chance que j'ai eu de travailler avec vous et je vous suis très reconnaissante pour votre apport tant sur le côté professionnel qu'humain. Merci pour votre gentillesse, votre ouverture et tous les moments partagés dont je garde de très bons souvenirs.

Je remercie tous ceux qui ont contribué à ces travaux de recherche : Carine Besset, Gaëlle Beylier, Philippe Grosse, Julien Poette, Gregory Grosa et David Ney. Merci de m'avoir transmis vos connaissances sur les composants photoniques, de m'avoir formée à l'utilisation des différents équipements de mesure et également pour votre participation à la rédaction des articles qui ont été publiés au cours de cette thèse.

Merci à toutes ces personnes que j'ai rencontrées pendant cette aventure et qui ont contribué à rendre ces années de thèse très agréables. Merci à mes anciens collègues de l'équipe SiRel de STMicroelectronics Crolles et du laboratoire IMEP LaHC mais également à mes collègues thésards : Nisrine, Mohammad, Ali, Andres, Romain, Thibault.

Je tiens à remercier aussi mes collègues de STMicroelectronics Grenoble pour leur soutien et leur encouragement pendant les moments difficiles de finalisation de ce manuscrit.

Enfin, je remercie mes amis, mes parents, beaux-parents, mes frères, beaux-frères, sœurs et belles-sœurs pour leur présence et leur soutien à toutes les étapes de cette aventure. Merci surtout à Habib et Mariam pour avoir su me redonner du courage et de la motivation lorsque j'en manquais, pour m'avoir épaulée et poussée à toujours aller plus loin.

INTRODUCTION GENERALE

Les télécommunications par voie optique recouvrent de nos jours une part majoritaire dans l'échange des données numériques. L'augmentation des débits et des volumes de données échangées poussent à l'amélioration constantes des technologies qui les sous-tendent. La photonique sur silicium s'inscrit dans ce développement et vise à co-intégrer aux plus près les composants optiques et les composants électroniques en utilisant comme interface les composants optoélectroniques.

Cette thèse s'inscrit dans cette thématique et plus particulièrement dans le cadre de la caractérisation de la technologie PIC25G développée par STMicroelectronics. Cette dernière a pour objectif de pouvoir amener les connexions optiques directement sur les serveurs des centres de données internet, pour ainsi augmenter les performances globales de l'échange des données. Les puces de la technologies PIC25G intègrent donc des composants optoélectroniques, permettant la modulation d'un signal optique par un signal électrique et sa transmission dans une fibre. Symétriquement, elle intègre des composants permettant la réception d'un signal optique, amené par une fibre optique afin d'être converti en signal électrique.

Au début de nos travaux, les composants photoniques sur silicium pour les applications de télécommunications étaient en cours de développement et d'implémentation par STMicroelectronics. Comme toutes technologies, il est nécessaire de mener un suivi continu de ses performances par de la caractérisation électrique et, ici, optique. Mais il est aussi crucial de pouvoir évaluer le plus précisément possible la durée de fonctionnement de ces composants dans des conditions nominales. Une étude de fiabilité des composants de la photonique sur silicium était donc indispensable pour STMicroelectronics. Cependant, très peu d'études ont été menées sur ce sujet. L'objectif de cette étude est de présenter l'étude de la fiabilité des composants optoélectroniques visant les applications de télécommunication.

Ce manuscrit est organisé en trois parties principales. La première d'entre elles présentera de façon détaillée le contexte de cette étude, ses enjeux ainsi que les objectifs que nous nous fixons. Une deuxième partie sera consacrée à la mise en place d'un banc de caractérisation optoélectronique, à sa validation, puis présentera les premiers tests réalisés sur des composants mis en boîtier. Le troisième chapitre regroupera quant à lui les différentes caractérisations effectuées sur des photodétecteurs de la technologie PIC25G, nous y montrerons comment les dégradations de performance observées lors de tests de stress réalisés peuvent être expliquées par un modèle physique que nous détaillerons et validerons. Finalement, les perspectives ouvertes par ces travaux seront abordées non seulement par rapport à la problématique de STMicroelectronics mais aussi dans le cadre plus général de la fiabilité des dispositifs optoélectroniques et photoniques intégrés.

CHAPITRE 1 :LA PHOTONIQUE SUR SILICIUM POUR LES TELECOMMUNICATIONS OPTIQUES

I. Introduction

Dans ce chapitre, le développement de la photonique sur silicium ainsi que son intérêt pour les télécommunications optiques seront présentés. Le fonctionnement d'un transmetteur-récepteur photonique, *le transciever* (concaténation de « transmitter » et « receiver » en anglais), sera ensuite expliqué et le principe de fonctionnement de chacun de ses éléments détaillés. Une attention particulière sera alors portée sur la physique des composants actifs, c'est-à-dire optoélectroniques, dont l'étude de la fiabilité est l'objet de ce travail. L'importance de cette étude sur la fabrication des *transceivers* sera donc présentée en nous basant sur les protocoles de qualification en vigueur à son démarrage. Finalement, un état de l'art synthétique sur la fiabilité des composants optoélectroniques en photonique silicium nous permettra de fixer les objectifs de ce travail de doctorat.

II. Développement de la photonique sur silicium

II.1. La photonique pour les télécommunications

Le développement de la photonique moderne fut possible grâce à la réalisation du premier laser en 1960 par Théodore H. Maiman [1]. Ceci permit en effet la génération d'une **source de lumière cohérente** nécessaire à cette application. Cependant, les véritables motivations de cette technologie sont liées aux **limitations des interconnexions électriques** jusque-là utilisées pour la transmission de l'information. Les bandes passantes limitées combinées aux pertes augmentant avec la distance [2] ne permettaient plus de supporter le débit croissant des données numériques. L'essor de la microélectronique s'est traduit par le développement des smartphones ainsi que des objets connectés. Ceci a conduit à une **explosion du trafic numérique** et aujourd'hui les interconnexions électriques ne peuvent plus soutenir ce besoin de transmission de l'information plus rapide et sur de plus grandes distances. De plus, augmenter le débit de transmission dans les systèmes électroniques aurait un coût et un encombrement importants [3]. La photonique se présente alors comme solution pour une utilisation d'**interconnexions optiques** avec de meilleures performances et des pertes plus faibles à la place des câbles électriques.

L'explosion du trafic numérique se fait principalement ressentir dans les **centres de données** où les données sont stockées. En effet, une étude montre que le trafic de ces données double tous les trois ans [4] et pour atteindre 15,3 Zettabytes/an en 2020 comme le montre la figure I.1.

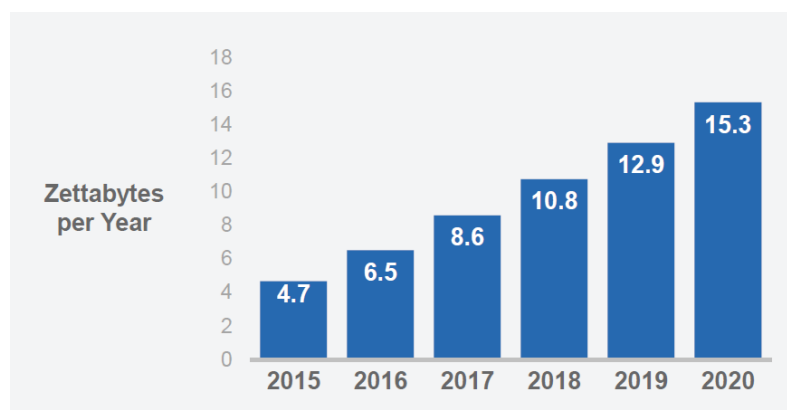


Figure I.1: Evolution du trafic dans les centres de données [4]

Un centre de données contient les équipements (serveurs et systèmes de stockage) nécessaires au stockage et au traitement des données numériques. Il peut atteindre jusqu'à des dizaines de milliers de mètres carrés de superficie et contenir des centaines de milliers de serveurs. A titre d'exemple, le centre de donnée de Google à Lenoir en Caroline du Nord représenté sur la figure I.2 contient 800.000 serveurs, sur une superficie de 46.500 m² [5].



Figure I.2: Centre de données de Google, Lenoir, Caroline du Nord [5]

Le trafic le plus important est situé à l'intérieur même du centre de données (77%) contre 9% de trafic entre centres de données et 14% seulement vers l'utilisateur [4]. Ce qui nécessite des réseaux d'interconnexions internes complexes, avec un nombre d'interconnexions très important (plus de 200.000 pour Google Lenoir) et des distances d'interconnexions pouvant aller jusqu'à quelques kilomètres. Ceci justifie l'utilisation majoritaire des interconnexions optiques.

Différents matériaux peuvent être utilisés pour la fabrication de composants photoniques. Cependant les travaux de **Richard Soref** dans les années 80 [6] [7] [8], ont montré des propriétés optiques intéressantes du silicium suscitant l'intérêt pour l'utilisation de la technologie **photonique sur du substrat silicium**.

II.2. Utilisation du silicium pour la photonique

Le principal avantage du silicium est son faible coût de fabrication par rapport aux autres semi-conducteurs et sa qualité cristalline qui est meilleure que n'importe quel autre semi-conducteur [9]. Le substrat de silicium étant déjà utilisé pour la fabrication de circuits intégrés **CMOS**, il permet à la photonique de bénéficier d'équipements et de techniques déjà matures. Ceci réduit davantage le coût de fabrication des dispositifs [3]. Un autre avantage non négligeable est le développement des **substrats SOI** (*Silicon On Insulator*) dont l'utilisation est très intéressante en photonique car le **fort contraste d'indice optique** entre le SiO₂ (n=1,45) et le Si (n=3,45) [9] permet un fort confinement de la lumière et donc un excellent guidage de l'onde optique. Enfin, les pertes optiques sont relativement limitées aux longueurs

d'onde employées pour les télécommunications optiques. En effet, comme le montre la figure I.3, le silicium est **transparent** aux longueurs d'ondes comprises entre 1,1 μm et 6,8 μm , tandis que les longueurs d'onde des télécommunications optiques sont réalisées dans la fenêtre 1,3 μm – 1,6 μm .

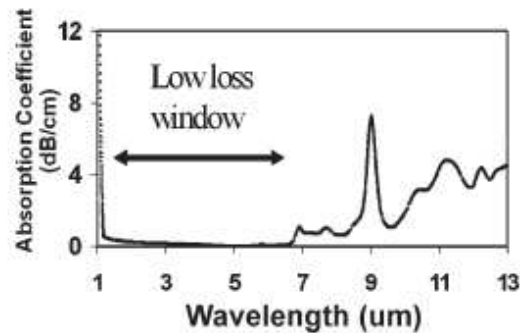


Figure I.3 : Spectre d'absorption du silicium [9]

III. Le transciever : émetteur/récepteur optique

Comme expliqué précédemment, l'utilisation d'interconnexions optiques à la place de câbles électriques présentent des avantages non négligeables pour les télécommunications optiques. Cependant les signaux utilisés par les systèmes de stockage et les canaux de transmission optiques étant différents, une interface permettant la communication entre ces deux types de systèmes est nécessaire. Un dispositif intégrant à la fois **émetteur et récepteur optique** sur une puce photonique permet de réaliser cette fonction. Ce dispositif appelé transciever en anglais (transmitter/receiver) est présenté sur la figure I.4. Il est composé d'un émetteur qui permet la conversion des données électriques qui proviennent des systèmes de stockage en données optiques et d'un récepteur pour la conversion des données optiques en données électriques.

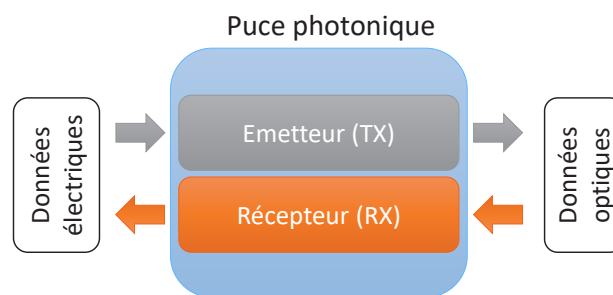


Figure I.4 : Principe du transciever

Par analogie à la microélectronique, les **circuits intégrés photoniques (PIC)** contiennent tous les composants optiques et optoélectroniques nécessaires à la transmission de l'information sous forme optique. A l'heure actuelle, seul le laser n'est pas encore intégré au circuit. La figure I.5 permet de voir en détail la composition de ce genre de circuit.

Le signal provenant d'un laser est utilisé comme support de transmission. Ce signal est transmis ensuite via un coupleur au guide d'onde de l'émetteur. Le composant clé de l'émetteur est un **interféromètre de Mach Zehnder** qui est un modulateur d'intensité optique commandé par un signal électrique. Ce guide d'onde traverse l'interféromètre qui module

l'amplitude du signal optique du laser suivant la commande électrique qui correspond aux données à transmettre. Le signal optique modulé est ensuite transmis via un autre coupleur vers une fibre optique externe qui l'achemine vers le récepteur. Une fois au récepteur, un photodétecteur reçoit le signal optique et le convertit en signal électrique.

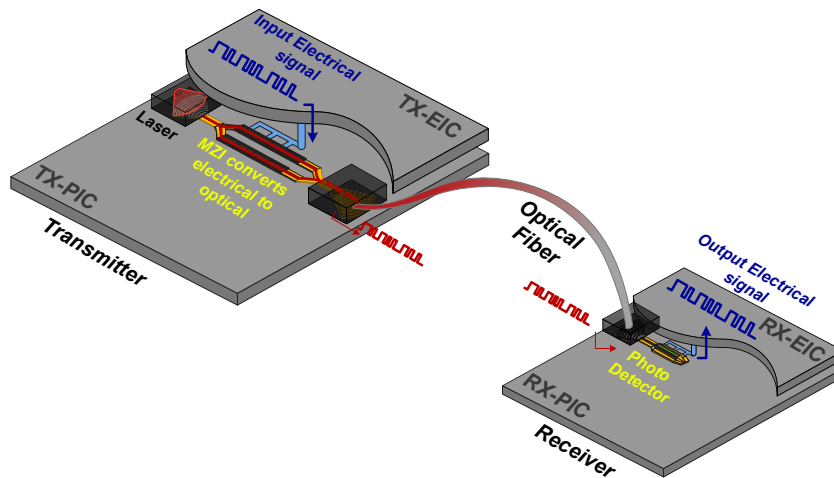


Figure I.5 : Schéma détaillé du transciever montrant les différents éléments de l'émetteur et du récepteur

Les différentes fonctions élémentaires réalisées par un transciever sont : le **couplage** de l'onde optique sur un guide d'onde ou sur une fibre aux entrées et sorties optiques du circuit, le **guidage** de l'onde dans le circuit pour une transmission entre les différents éléments. Ces fonctions sont réalisées par des composants passifs. Des composants actifs sont aussi utilisés pour des fonctions comme la **photomodulation** qui permet à l'émetteur de convertir les données électriques en un signal lumineux ou la **photodétection** utilisée dans le récepteur pour convertir la lumière en un signal électrique. Afin de mieux comprendre le fonctionnement de ces dispositifs, le principe physique permettant de réaliser ces fonctions est expliqué dans ce qui suit.

III.1. Les guides d'onde

Les guides d'onde constituent la brique de base de la photonique intégrée. Ce sont eux qui permettent de contrôler la **propagation de la lumière** dans le plan de la puce et leurs différentes combinaisons permettent de réaliser les fonctions de traitement du signal optique dont certaines seront détaillées dans les prochains paragraphes. La figure I.6 illustre les différents types de guides d'onde réalisables par la mise en forme d'une couche mince présentant un fort indice de réfraction (le cœur du guide d'onde) placée sur un substrat optique transparent d'indice de réfraction plus faible. Bien que les structures de guide d'onde « ruban » (*strip* en anglais) permettent d'obtenir les confinements les plus élevés, une architecture de guide partiellement gravée (*rib* ou *ridge* en anglais) leur est en général préférée. En effet, cette configuration permet d'avoir une intensité plus faible du champ électromagnétique guidé au niveau des surfaces du cœur où sont situés les défauts qui entraînent l'essentiel des pertes de propagation par diffusion.

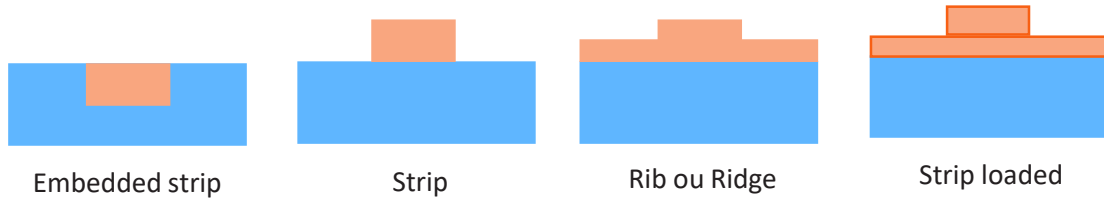


Figure I.6 : différentes géométries de guide d'onde

La Figure I.7, présente une image TEM de la section transverse des guides à arêtes utilisés dans la technologie PIC25G de STMicroelectronics qui sert de base aux travaux présentés dans ce document. Le cœur du guide d'onde a une épaisseur totale d'un peu plus de 300 nm et il est partiellement gravé jusqu'à la moitié de celle-ci afin de créer une structure d'environ 300 nm de large. Les **pertes par propagation** dans ces guides d'onde sont de 1,8 dB/cm à la longueur d'onde de 1,31 μm [10].

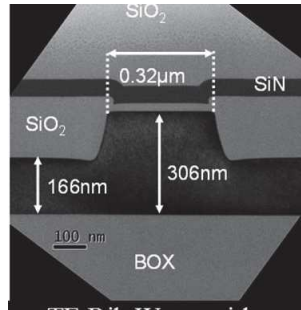


Figure I.7 : le guide d'onde à arête de la technologie PIC25G de STMicroelectronics [10]

Le **contraste d'indice** entre le cœur en silicium du guide d'onde et la silice qui l'entoure étant élevé, la propagation dans le guide d'onde ne peut pas être décrite par des modèles simples. Ainsi, si l'axe de propagation du guide est l'axe z , un champ électrique $\vec{E}(x,y)e^{ik_0 n_{eff} z}$, se propagera dans le guide d'onde avec l'indice effectif n_{eff} si ses composantes $E_x(x,y)$ et $E_y(x,y)$ vérifient le système d'équations aux valeurs propres couplées suivant :

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 E_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + k_0^2 n^2(x,y) E_x + \frac{\partial}{\partial x} \left[E_x \frac{\partial(n^2)}{\partial x} + E_y \frac{\partial(n^2)}{\partial y} \right] = k_0^2 n_{eff}^2 E_x \\ \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial y^2} + k_0^2 n^2(x,y) E_y + \frac{\partial}{\partial y} \left[E_x \frac{\partial(n^2)}{\partial x} + E_y \frac{\partial(n^2)}{\partial y} \right] = k_0^2 n_{eff}^2 E_y \end{cases} \quad (I.1)$$

La résolution de ce système est loin d'être triviale. Elle est cependant rendue possible avec les moyens de calcul moderne et l'utilisation de méthodes numériques à base de différences finies, d'éléments finis ou de décomposition spectrale. A STMicroelectronics, c'est le solveur de mode vectoriel basé sur une projection de mode propre (Eigen Mode Expansion) développé et commercialisé par la société Lumerical qui est utilisé. Cet outil a permis d'optimiser la forme du guide d'onde présenté sur la figure I.7 afin que celui n'autorise la propagation que d'un seul mode aux longueurs d'onde de travail et que le champ électrique soit principalement orienté selon l'axe horizontal du guide d'onde. Par référence

aux dénominations utilisées pour les guides d'onde plans, on parle alors d'un mode de propagation TE bien qu'il s'agisse d'un abus de langage.

III.2. Le réseau de couplage

Pour coupler une onde lumineuse dans un guide d'onde, la solution la plus simple est de placer une fibre optique en vis à vis de celui-ci. On parle alors de « butt-coupling » en anglais ou de couplage par la tranche en français. Cette approche, représentée sur la figure I.8 b, présente néanmoins deux inconvénients majeurs lorsqu'on utilise la filière technologique de Photonique Silicium. Tout d'abord, pour tester les puces il faut les avoir découpées et que leurs facettes d'entrée et de sortie soient préparées. Ceci ne permet donc pas un test systématique des dispositifs à l'échelle de la gaufre de 300 mm et engendre un surcoût de production non négligeable. Ensuite, et de façon plus fondamentale, l'efficacité de couplage η entre le mode de la fibre optique et celui du guide d'onde silicium dépend de l'intégrale de recouvrement entre ceux-ci selon la formule :

$$\eta = \frac{|\iint_{-\infty}^{+\infty} E_f E_{go} ds|^2}{\iint_{-\infty}^{+\infty} |E_f|^2 ds \iint_{-\infty}^{+\infty} |E_{go}|^2 ds} \quad (I.2)$$

où $E_f(x, y)$ et $E_{go}(x, y)$ représente les amplitudes des champs électriques guidés par le mode de la fibre et du guide d'onde respectivement (nous n'avons pas utilisé de notation vectorielle car nous nous plaçons dans une condition de fonctionnement TE).

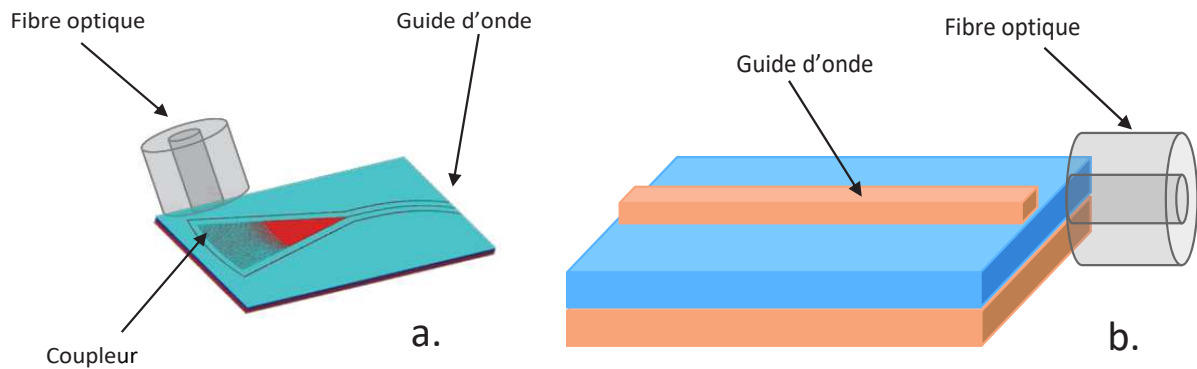


Figure I.8 : Modes de couplage entre une fibre et un guide d'onde a) couplage vertical b) couplage par la tranche

Les fibres optiques monomode standards supportent un mode de propagation quasi-gaussien (il s'agit en fait d'une fonction de Bessel) dont le diamètre est de l'ordre de $10\mu\text{m}$. A l'opposé, le mode du guide d'onde silicium est largement sub-micronique, étant données les dimensions du guide d'onde. Le recouvrement entre les modes est donc très faible ce qui entraîne des pertes de couplage élevées qui sont incompatibles avec les applications visées.

C'est pour ces raisons qu'une approche basée sur des **réseaux de Bragg** (schématisée sur la figure I.8 a) est mise en œuvre pour coupler et découpler l'onde lumineuse dans les puces en photonique sur silicium. Le principe de fonctionnement du réseau de couplage est illustré sur la figure I.9 a).

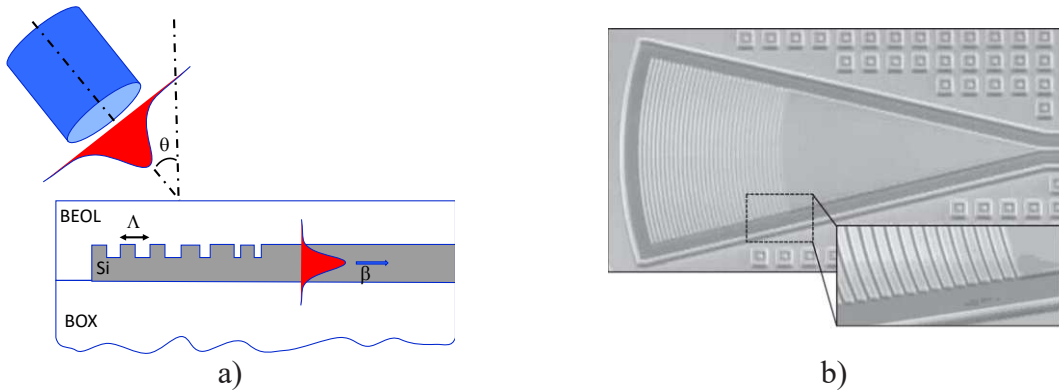


Figure I.9 : coupleur à réseau, principe de fonctionnement (a) ; implémentation (b) [10]

Le mode issu de la fibre optique arrive sur une partie de guide d'onde sur laquelle un réseau de Bragg a été gravé. Pour un angle d'incidence θ , une longueur d'onde donnée, la période Λ permet de coupler cette onde électromagnétique sur le mode guidé vérifie la relation de Bragg :

$$\frac{2\pi}{\lambda} n_{BEOL} \sin \theta = \beta + m \frac{2\pi}{\Lambda} \quad m \in \mathbb{Z} \quad (I.3)$$

Où $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff}$ est la constante de propagation du mode guidée et n_{BEOL} l'indice de réfraction de la couche placée au-dessus des guides d'onde appelée BEOL pour « Back End Of Line ». En pratique, pour obtenir une efficacité de couplage élevée, le pouvoir diffractif du réseau est adapté à la forme du mode de la fibre optique. C'est pourquoi, à pas de réseau constant, la taille des tranchées diminue à mesure que l'on s'approche du guide d'onde. De même, comme le montre l'image obtenue par microscopie électronique d'un coupleur à réseau présenté sur la figure I.9 (b), les dents du réseau sont arrangées de façon concentrique afin de focaliser latéralement la puissance couplée vers le début du guide. Pour la technologie PIC25G de STMicroelectronics, l'angle d'arrivée de la fibre vaut 8° et les pertes typiques de couplage sont de 1,8 dB à la longueur d'onde de 1310 nm [10].

III.3. La photomodulation

Dans l'émetteur, une modulation électro-optique permet de transférer les informations contenues dans un signal électrique sur un signal optique. Deux approches sont possibles pour réaliser cette fonction.

III.3.a. La modulation d'intensité

La première consiste à modifier les propriétés d'absorption du matériau pour moduler l'intensité du signal optique qui le traverse. On parle de modulation à **électro-absorption**. L'intensité du signal de sortie I_{out} s'écrit alors suivant l'expression donnée en (I.2) où α est le coefficient d'absorption du matériau, V la tension appliquée et L la longueur du dispositif.

$$I_{out} = I_{in} e^{-\Delta\alpha(V)L} \quad (I.4)$$

Lorsqu'un photon est envoyé dans un semi-conducteur, il est absorbé si l'énergie du photon est supérieure à l'énergie du gap E_G dont la formule est donnée en (I.3).

$$E_G = \frac{hc}{\lambda_G} \quad (I.5)$$

h est la constante de Planck, c la vitesse de la lumière et λ_G la longueur d'onde du gap.

L'application d'un champ électrique sur le matériau permet d'étendre les fonctions d'onde des électrons et des trous dans le gap, ce qui permet l'absorption de photons à des énergies plus petites que l'énergie du gap. La courbe d'absorption du matériau est modifiée. La figure I.10 illustre ce phénomène appelé **effet Franz Keldish**.

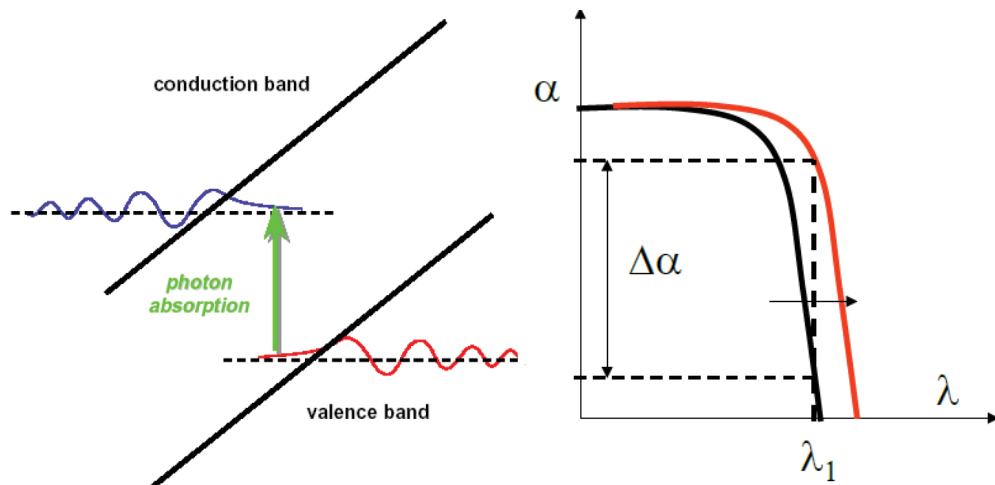


Figure I.10 : Illustration de l'effet Franz Keldish dans un semi-conducteur [11]

Le silicium étant transparent aux longueurs d'ondes de la télécommunication, l'effet Franz Keldish y est impossible. La possibilité de faire des photomodulateurs utilisant l'effet Franz Keldish a été néanmoins démontré dans le SiGe par plusieurs études [12] [13].

III.3.b. La modulation de phase

La deuxième approche consiste à moduler la phase du signal par une variation de l'indice de réfraction du matériau. Cette modulation de phase est ensuite transformée en modulation d'intensité par un **interféromètre**. L'intensité du signal est donnée en (I.4) où λ est la longueur d'onde du signal.

$$I_{out} = I_{in} \cos^2 \left(\frac{\Delta\Phi(V)}{2} \right) \quad \text{Avec : } \Delta\Phi(V) = \frac{2\pi\Delta n(V)L}{\lambda} \quad (I.6)$$

Un interféromètre peut être une structure avec un cristal photonique, un résonateur ou un **Mach-Zehnder**. Nous nous intéresserons ici uniquement à ce dernier utilisé dans notre plateforme photonique sur silicium.

Il existe différentes variantes de l'interféromètre de Mach Zehnder. La plus simple est représentée sur la figure I.11. Elle est constituée de deux bras qui sont des guides d'ondes parallèles et de longueurs égales. Le signal arrivant dans un Mach Zehnder est séparé en deux signaux optiques de manière égale. Sur un des bras, un modulateur de phase intégré permet

d'obtenir un déphasage de l'un des signaux par rapport à l'autre. Les deux signaux se recombinaient ensuite à la sortie. Si aucune tension n'est appliquée au modulateur de phase, la recombinaison des signaux donne lieu à une interférence constructive. Si une tension est appliquée de manière à obtenir un déphasage multiple de π , l'interférence est destructive et le signal de sortie est nul.

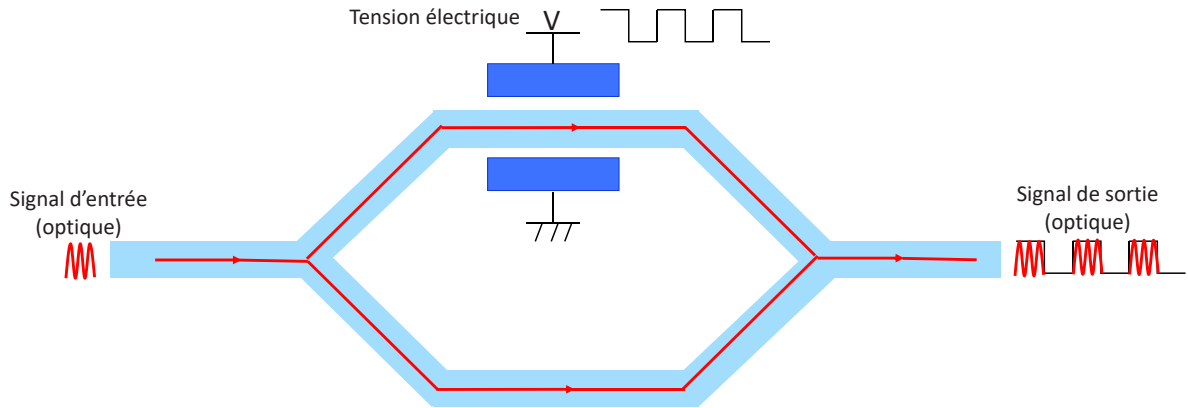


Figure I.11 : principe de fonctionnement du photomodulateur Mach Zehnder

Il existe différentes manières de moduler la phase d'un signal. En général, elle se fait par une modification de l'indice de réfraction d'un matériau. L'indice de réfraction d'un matériau peut être modifié par l'application d'un champ électrique (**électro-réfraction**), d'une **température** ou alors par une **variation de la concentration des porteurs libres** dans le matériau.

III.3.b.1. La modulation par électro-réfraction

Dans certains matériaux, l'application d'un champ électrique permet de changer la position, l'orientation et la forme des molécules le composant et de modifier ses paramètres optiques. L'indice de réfraction dépend du champ électrique et est donnée en (I.7) où r est le coefficient électro-optique linéaire et q le coefficient électro-optique quadratique.

$$n(V) = n_0 - \frac{n_0^3 r E}{2} - \frac{n_0^3 q E^2}{2} \quad (I.7)$$

Deux effets sont liés à cette variation. L'**effet Pockels** représenté dans (I.7) par la constante proportionnelle au champ électrique et l'**effet Kerr** dont la composante est proportionnelle au carré du champ électrique. L'effet Pockels est utilisé dans les modulateurs LiNbO_3 dont la fréquence de modulation peut dépasser 70 GHz. Le silicium ayant une structure cristalline centro-symétrique, il ne peut pas y avoir d'effet Pockels. On peut le faire apparaître en appliquant une contrainte permettant de casser la symétrie du réseau cristallin [14]. La variation d'indice induite par l'effet Kerr est quant à elle très faible dans les longueurs d'ondes des télécommunications et ne permet pas d'avoir une modulation efficace [7].

III.3.b.2. La modulation par effet thermo-optique

L'indice de réfraction d'un matériau peut aussi être modulé par une variation de température. En effet, la modification de l'énergie du gap avec la température permet de

changer son interaction avec la lumière et donc ses propriétés optiques. On appelle cela l'**effet thermo-optique**. Pour une longueur d'onde $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$, le coefficient thermo-optique dans le silicium est égal à 2.10^{-4} K^{-1} [15]. Une variation de température de 10 K permet d'obtenir une variation de 2.10^{-3} , qui est très importante. Cet effet est cependant très lent et ne permet pas d'obtenir une modulation haute fréquence. En revanche cela peut constituer un effet parasite pour les modulateurs haute fréquence.

III.3.b.3. La modulation par variation de la concentration des porteurs libres

La modulation de phase par variation de la concentration des porteurs libres est la méthode utilisée dans le silicium, car la plus efficace. Elle consiste à modifier le coefficient d'absorption et ainsi l'indice de réfraction par la variation de la concentration des électrons et des trous libres dans le semi-conducteur. En effet, lorsqu'une onde électromagnétique traverse un matériau comportant des charges, celles-ci se mettent à osciller et créent localement une perturbation qui modifie la manière dont l'onde interagit avec le matériau. Analysé pour la première fois par **Soref et Benett** en 1987 [7], d'autres scientifiques ont aussi étudié et modélisé ce phénomène [16] [17] [18] [19]. Cependant le modèle de Soref est le plus utilisé. Les équations de Soref pour le coefficient d'absorption sont données en (I.8) et (I.9).

$$\text{Pour } \lambda = 1,31\mu\text{m} : \Delta\alpha = 6,0 \times 10^{-18} \Delta N + 4,0 \times 10^{-18} \Delta P \quad (\text{I.8})$$

$$\text{Pour } \lambda = 1,55\mu\text{m} : \Delta\alpha = 8,5 \times 10^{-18} \Delta N + 6,0 \times 10^{-18} \Delta P \quad (\text{I.9})$$

ΔN et ΔP étant la variation de la concentration des électrons et des trous respectivement.

Ces équations permettent ensuite d'obtenir les relations correspondantes (I.10) et (I.11) pour l'indice optique en utilisant la relation de **Kramers Kronig**. Ces équations sont données dans le modèle de Soref.

$$\text{Pour } \lambda = 1,31\mu\text{m} : \Delta n = -6,2 \times 10^{-22} \Delta N - 6,0 \times 10^{-18} \Delta P^{0,8} \quad (\text{I.10})$$

$$\text{Pour } \lambda = 1,55\mu\text{m} : \Delta n = -8,8 \times 10^{-22} \Delta N - 8,5 \times 10^{-18} \Delta P^{0,8} \quad (\text{I.11})$$

La figure I.12 montre l'évolution du coefficient d'absorption avec l'augmentation de la quantité des électrons dans le silicium. Lorsque l'énergie des photons est inférieure à l'énergie du gap, l'absorption est faite par les porteurs libres dans le matériau et est proportionnelle à la quantité des porteurs. Lorsque l'énergie du photon est supérieure à l'énergie du gap, l'absorption est faite par le matériau.

Pour moduler la concentration des porteurs libres dans le silicium, différentes solutions à base de semi-conducteurs peuvent être utilisées : une capacité **MOS en régime d'accumulation**, une **injection des porteurs** dans une jonction pin ou l'utilisation d'une diode pn ou pin en régime de **déplétion**.

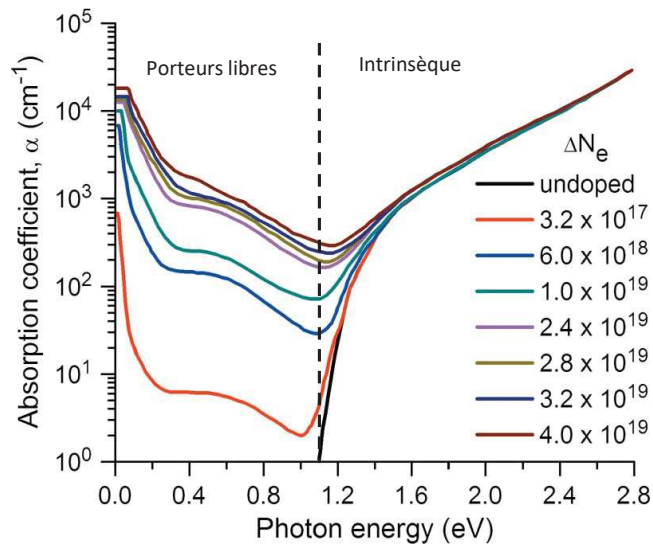


Figure I.12: variation du coefficient d'absorption du silicium en fonction de la concentration des électrons libres [20]

III.3.c. Structures pour la modulation de la concentration des porteurs libres

III.3.c.1. Accumulation des porteurs dans un MOS

Une capacité MOS est constituée de couches de métal, d'oxyde et de semi-conducteurs. Polarisée en régime d'accumulation, les porteurs majoritaires des semi-conducteurs s'accumulent au niveau des parois de la couche isolante d'oxyde. Ceci crée une variation de charges dans cette zone. Ce phénomène physique est décrit dans la figure I.13 [21]. Du silicium poly cristallin dopé p est relié au métal. Une couche d'oxyde le sépare d'une couche de silicium dopé n. Une tension positive suffisante appliquée sur le métal entraîne une accumulation des électrons du silicium dopé n et des trous de la couche dopé p autour de l'oxyde.

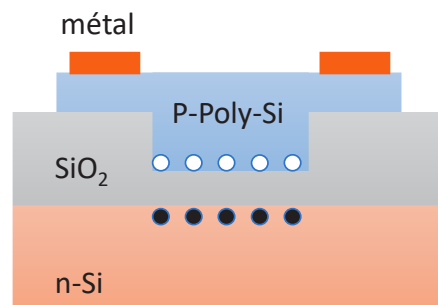


Figure I.13 : structure MOS en régime d'accumulation pour la modulation de phase

III.3.c.2. Injection des porteurs dans une diode PIN

Une autre solution consiste à utiliser une jonction pin polarisée en direct, ce qui permet une injection des porteurs à travers le guide d'onde. Ce phénomène est illustré dans la figure I.14. Cependant, ce genre de structure présente une bande passante limitée. En effet, lorsque la tension de polarisation passe à 0V, tous les porteurs doivent se recombiner or ce temps de recombinaison est relativement élevé. Il est tout de même possible de réduire ce temps de

recombinaison soit par une polarisation inverse [22], soit par l'utilisation d'un résonateur comme interféromètre [23] ou alors par une commande électrique [24].

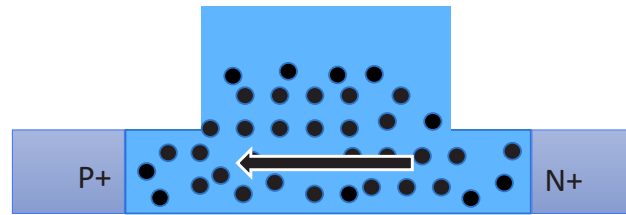


Figure I.14 : Structure PIN pour la modulation de phase par injection de porteurs

III.3.c.3. Déplétion des porteurs dans une diode PN ou PIN

La méthode permettant d'obtenir une plus grande bande passante parmi celles adaptées à une plateforme photonique sur silicium est la déplétion de porteurs dans une diode. Cette solution consiste à créer une variation de charge dans la zone de charge d'espace par déplétion des porteurs. Deux structures peuvent être utilisées :

- Dans une jonction pn, une polarisation inverse permet d'élargir la zone de charge d'espace permettant de créer une modification locale de la concentration des porteurs. Cette solution permet de s'affranchir de la recombinaison des porteurs qui ralentit la vitesse de la modulation, en utilisant uniquement les porteurs minoritaires.
- Dans une jonction pin, une polarisation inverse permet d'augmenter le champ électrique dans la zone intrinsèque. Les porteurs minoritaires présents dans cette zone à l'équilibre sont alors balayés par le champ créant une variation des porteurs. Cette méthode permet d'obtenir une modulation efficace avec des pertes faibles grâce à la très faible concentration de porteurs libres due au caractère intrinsèque de la zone que traverse le guide.

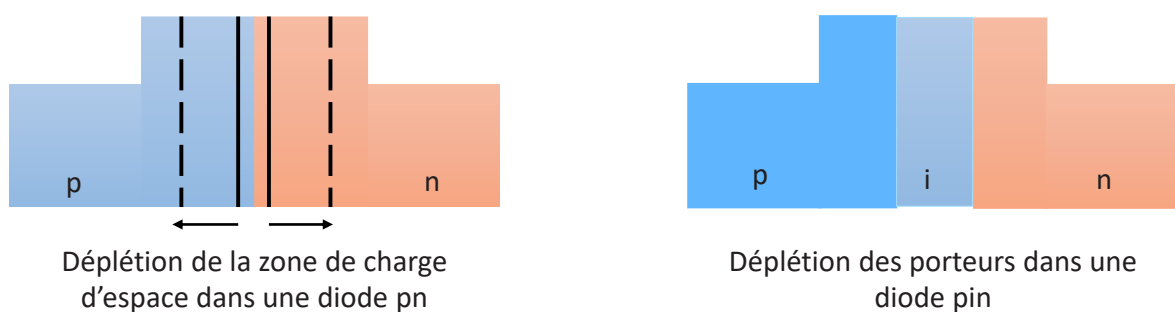


Figure I.15 : Structures pn et pin pour la modulation de phase par déplétion des porteurs

III.3.d. Figures de mérite d'un modulateur de phase

Les performances d'un système de modulation sont caractérisées par plusieurs paramètres comme l'amplitude de la modulation, la consommation énergétique ou encore les pertes optiques. Cependant, nous nous intéresserons uniquement aux performances d'un modulateur de phase qui est un des composants étudiés au cours de ces travaux de recherche.

III.3.d.1. L'efficacité de la modulation

L'efficacité de la modulation est en général donnée par le produit $V_\pi L_\pi$ qui est la tension V_π nécessaire à appliquer à une longueur L_π pour obtenir un déphasage de π . Il peut aussi être donnée par le déphasage $\Delta\Phi$ obtenu entre une tension 0V et une tension V pour une longueur de dispositif donnée. Ce déphasage dépend des propriétés intrinsèques du matériau et sa formule théorique est donnée en (I.6).

III.3.d.2. Les pertes optiques

Les pertes optiques sont une fonction du coefficient d'absorption du milieu qui dépend des propriétés intrinsèques du matériau, de sa qualité ainsi que du dopage de la zone active. Elles sont mesurées à 0V et augmentent avec la longueur du dispositif. L'absorption et la diffusion pour un dispositif de longueur L sont décrites à l'aide du coefficient d'atténuation α de la relation de Beer-Lambert qui lie la puissance transmise P_{out} à la puissance incidente P_{in} (I.12) :

$$P_{out} = P_{in} e^{-\alpha L} \quad (I.12)$$

En général, on préfère parler de pertes en dB par unité de longueur qui valent :

$$\alpha_{dB/cm} = \frac{1}{L(cm)} 10 \log \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) = \frac{1}{L} \frac{10}{\ln(10)} \alpha \quad (I.13)$$

III.3.d.3. Les pertes par insertion

Selon les communautés, ils existent plusieurs définitions possibles pour les pertes par insertion. La plus couramment admise et utilisées pour les systèmes de télécommunications optiques consiste à faire le ratio entre la puissance optique mesurée en sortie de fibre sans le dispositif et celle mesurée après avoir coupé la fibre en son milieu pour insérer le composant. En ce qui concerne STMicroelectronics, les pertes par insertion représentent les pertes en excès causées par le fonctionnement du modulateur. Elles sont donc mesurées en faisant la différence entre les pertes en dB à 0V et à la tension de modulation :

$$Pertes\ par\ insertion\ (dB) = Pertes_{2.5V}(dB) - Pertes_{0V}(dB) \quad (I.14)$$

III.3.d.4. La bande passante

La bande passante ou de façon équivalente le temps de réponse du composant est une caractéristique fondamentale du dispositif qui décrit sa capacité à transmettre un certain débit de données. Le lien entre le débit de donnée et la bande passante requise au niveau du composant n'est pas toujours trivial et dépend du format de modulation choisi. Néanmoins, il est clair que plus la bande passante du modulateur est élevée, plus il peut transmettre de données. La réponse temporelle du composant dépend non seulement des différents phénomènes physiques mis en œuvre (temps de transit des porteurs, durée de vie des porteurs, etc.) et de leur importance relative ; mais aussi des effets résistifs et capacitifs du circuit de commande.

III.4. La photodétection

La photodétection consiste à convertir un signal optique en un signal électrique. Un photodétecteur est un composant qui lorsqu'il est exposé à un rayonnement optique, génère un courant électrique proportionnel à la puissance de l'onde lumineuse. Le principe physique de la photodétection s'explique par la **photogénération de porteurs** dans un semi-conducteur, possible grâce aux propriétés optiques des semi-conducteurs.

III.4.a. Principe de la photodétection

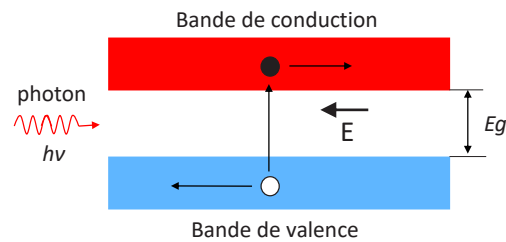


Figure I.16 : Principe de la photoconduction

Le principe de la photogénération est décrit dans la figure I.16. Lorsqu'un matériau semi-conducteur est éclairé par un rayonnement d'énergie supérieure ou égale à l'énergie du gap, le rayonnement est absorbé et les photons cèdent leur énergie aux électrons de la bande de valence. Ces derniers sont alors excités dans la bande de conduction laissant des trous dans la bande valence. S'ils ne se recombinent pas, ces porteurs deviennent libres et le matériau devient conducteur.

On distingue les semi-conducteurs à gap direct et les semi-conducteurs à gap indirect. La différence entre ces deux types de semi-conducteurs est dans leur structure de bandes représentée dans la figure I.17.

Dans un semi-conducteur à gap direct, la transition entre la bande de valence et la bande de conduction se fait sans changement de vecteur d'onde. L'énergie $h\nu$ (h est la constante de Planck et ν la fréquence) que doit avoir un photon pour exciter un électron est au moins égale à l'énergie du gap, soit :

$$h\nu \geq E_g \quad (I.15)$$

Pour le semi-conducteur à gap indirect :

- Soit l'énergie du photon est au moins égale à l'énergie du gap direct : la transition se fait sur le gap direct
- Soit l'énergie du photon est supérieure, égale ou inférieure à l'énergie du gap indirect : la transition se fait sur le gap indirect avec émission ou absorption de phonon, comme le montre la figure I.17.

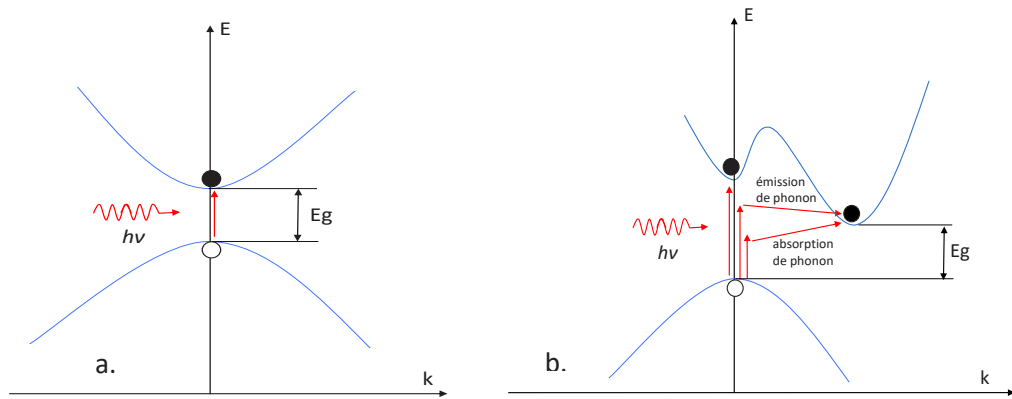


Figure I.17 : Photogénération de porteurs dans un semi-conducteur a) à gap direct b) à gap indirect

L'utilisation du silicium comme matériau pour les télécommunications optiques présente plusieurs avantages listés en II.2. Cependant le silicium est transparent aux longueurs d'ondes des télécommunications (1300-1600nm) et ne permet donc pas d'absorber un signal lumineux à ces longueurs d'onde. Son utilisation est plus intéressante dans les guides d'onde, coupleurs et photomodulateurs. En général les matériaux III-V sont utilisées pour ce type d'applications mais leur intégration dans un procédé CMOS est à l'heure actuelle délicate. L'utilisation du germanium déjà présent dans les procédés de fabrication du CMOS est plus appropriée et ses avantages sont cités ci-dessous.

III.4.b. Utilisation du Germanium

Le germanium a été utilisé comme matériau pour la photodétection dès le début des télécommunications optiques [25] [26] mais il fut ensuite délaissé au profit des photodiodes à base de matériau III-V pour des raisons de performances. L'intérêt du germanium pour la photodétection sur silicium fait suite au développement des techniques d'épitaxies dans les années 2000 [27] [28].

Le germanium est un matériau du groupe IV tout comme le silicium, ce qui fait que leurs propriétés sont très similaires. De ce fait, les procédés de fabrication utilisés pour le silicium peuvent aussi être utilisés pour le germanium. Matériau à gap indirect mais dont l'énergie du gap direct et indirect sont très proches (0,8 eV et 0,66 eV), l'absorption dans le germanium n'est pas très différente de celle d'un matériau à gap direct. La longueur d'onde du gap direct est égale à 1550 nm, ce qui permet une absorption efficace de la lumière aux longueurs d'onde des télécommunications comme le montre la figure I.18. De plus, le coefficient d'absorption élevé pour ces longueurs d'onde permet une absorption totale de la lumière sur des distances très courtes ($< 2 \mu\text{m}$) rendant possible la fabrication de photodiodes compactes.

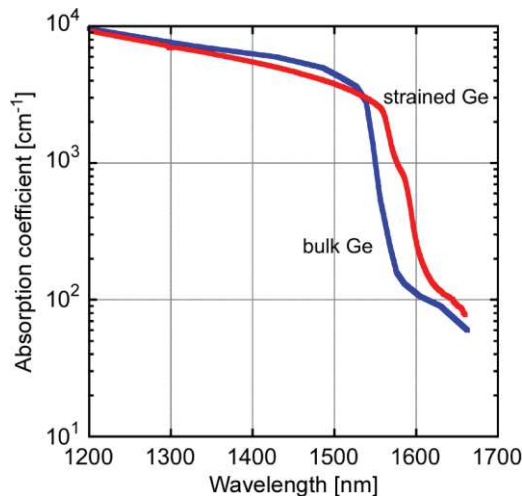


Figure 1.18 : Spectre d'absorption du Germanium

Finalement, le germanium présente des propriétés électriques très intéressantes. En effet, la mobilité des porteurs dans le germanium est supérieure à celle du silicium, ce qui permet une séparation rapide des porteurs dans la zone de charge d'espace. Les propriétés du silicium et du germanium sont présentées dans le tableau I.1. On note cependant une différence entre les paramètres de maille du silicium et du germanium qui sont susceptibles d'être à l'origine de problèmes de fiabilité sur le long terme.

	Silicium	Germanium
Gap	Direct : $E_g=3.3$ eV ; $\lambda=370$ nm	Direct : $E_g=0.8$ eV ; $\lambda=1550$ nm
	Indirect : $E_g=1.12$ eV ; $\lambda=1120$ nm	Indirect : $E_g=0.66$ eV ; $\lambda=1880$ nm
Paramètre de maille	5.43 Å	5.64 Å

Tableau I.1 : Propriétés du Germanium et du Silicium

III.4.c. Architectures d'une photodiode

III.4.c.1. Photodiodes PN

Une photodiode est en général une jonction PN dont le courant inverse est proportionnel à la puissance lumineuse absorbée. En fonction de la zone où ils sont générés, les porteurs peuvent soit contribuer au courant en parcourant la distance qui les sépare de l'électrode collectrice, soit se recombiner avant cette distance. Lorsque les porteurs sont générés dans une zone où ils sont majoritaires, leurs recombinaisons est très peu probable et ils sont rapidement collectés par l'électrode la plus proche. S'ils sont générés dans une zone où ils sont minoritaires, les recombinaisons sont plus probables, mais leur collecte est possible. Plusieurs cas se présentent alors :

- Si les porteurs sont générés dans la ZCE, alors le champ électrique présent dans la zone de charge d'espace les sépare rapidement et ils rejoignent alors les zones où ils sont majoritaires.
- Lorsque les porteurs minoritaires sont générés à proximité de la ZCE, ils peuvent diffuser vers la ZCE sur une longueur égale à leur longueur de diffusion, puis ils sont balayés par le champ vers la zone majoritaire.

- Cependant, s'ils sont créés trop loin de la ZCE ils ne peuvent pas suffisamment diffuser et finissent par se recombiner, impactant ainsi l'efficacité de la photodétection. La figure I.19 illustre ce phénomène.

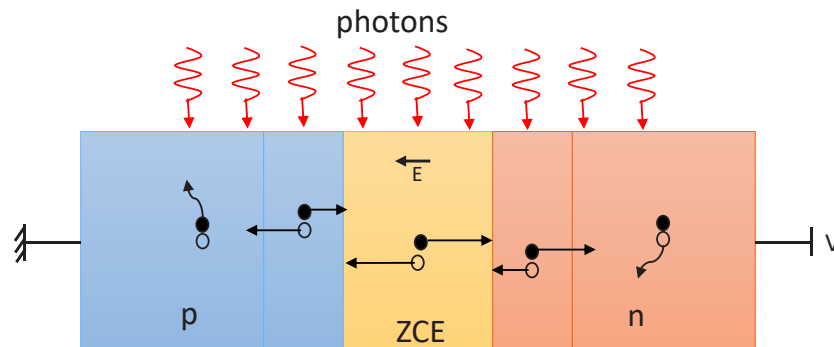


Figure I.19 : Illustration de la photogénération de courant dans une jonction pn

La vitesse de dérive des porteurs dans la ZCE étant beaucoup plus rapide que la vitesse de diffusion, une photogénération dans les zones dopées augmenterait le temps de réponse d'un photodétecteur. Ainsi pour optimiser le dispositif, il faut que la majorité des porteurs soient générés dans la ZCE. La solution consiste donc à élargir la zone de charge d'espace en ajoutant une zone intrinsèque entre les zones n et p.

III.4.c.2. Photodiodes PIN

Dans une jonction pin, la zone de charge d'espace s'étend principalement dans la zone intrinsèque. L'utilisation d'une photodiode pin permet ainsi un meilleur contrôle de cette zone essentielle à la photodétection. L'augmentation de la ZCE offre plusieurs avantages : d'une part, elle permet de favoriser le courant de transport par rapport au courant de diffusion ; d'autre part, elle permet de réduire la capacité de la jonction et ainsi de diminuer la constante de temps RC qui contribue au temps de réponse de la photodiode.

III.4.c.3. Hétérostructures

La génération d'un courant de diffusion, même en étant limité dans une photodiode pin, est un facteur qui limite la vitesse des photodiodes. Ainsi, pour obtenir des photodiodes plus rapides, il est nécessaire d'éliminer cette contribution. Le remplacement d'une ou des deux zones dopées par un matériau non absorbant permet de générer l'essentiel ou tout le courant dans la ZCE. Le silicium déjà présent dans la photodiode et transparent aux longueurs d'onde des télécommunications est le candidat idéal. On distingue ainsi les **hétérostructures simples** Si/Ge où une couche de silicium est juxtaposée à une couche de germanium et les **hétérostructures doubles** où le germanium est pris en sandwich entre deux couches de silicium.

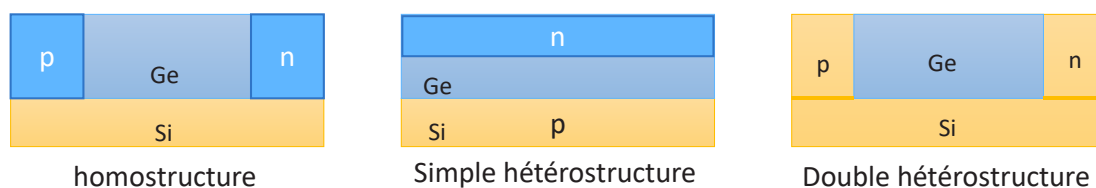


Figure I.20 : Les différentes structures de photodiodes Ge sur Silicium

III.4.d. Couplage de la lumière dans une photodiode

La lumière transportée par un guide d'onde silicium doit être couplée dans la photodiode pour qu'elle soit absorbée. Le germanium étant obtenu par épitaxie sur le silicium, deux approches sont possibles. Dans la première, la photodiode germanium est placée au-dessus du guide d'onde silicium et le couplage de l'onde se fait de manière évanescente du silicium vers le germanium. La deuxième approche consiste à avoir la couche de germanium directement en face du guide d'onde. Ainsi la lumière est directement injectée dans la photodiode.

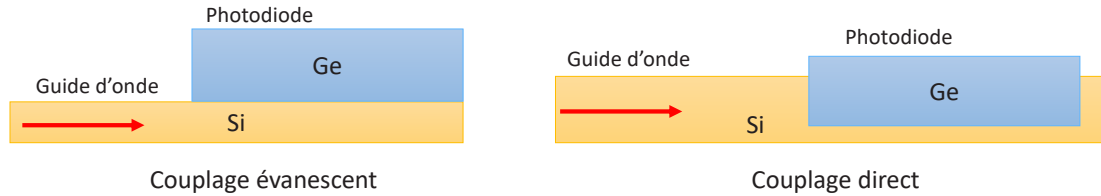


Figure 1.21 : les différents modes de couplage de la lumière dans une photodiode Ge avec guide d'onde Si intégré

III.4.e. Caractéristiques principales d'une photodiode

Les paramètres permettant de caractériser les performances d'un photodétecteur sont la responsivité, le courant d'obscurité et la bande passante.

III.4.e.1. La responsivité

Le courant dans une photodiode est la somme de deux contributions : le courant de dérive dans la zone de charge d'espace et le courant de diffusion des porteurs créés hors de la zone de charge d'espace. La somme de ces deux contributions est le **courant photonique**. Ce courant est proportionnel à la puissance lumineuse absorbée. Ainsi le premier critère de performance d'une photodiode est sa capacité à convertir une puissance lumineuse en courant électrique. On appelle ce paramètre **la responsivité** et elle s'exprime par le ratio entre le courant photonique et la puissance optique incidente :

$$R = \frac{I_{ph}}{P_{opt}} \quad (I.16)$$

Pour une photodiode idéale, la responsivité théorique maximale est égale à :

$$R_{th} = \frac{q\lambda}{hc} \quad (I.17)$$

Où q est la charge élémentaire, h est la constante de Planck, λ est la longueur d'onde du photon et c représente la vitesse de la lumière dans le vide

En pratique, il faut tenir compte du rendement de couplage entre le guide d'onde et la photodiode, du rendement de collection des contacts et de l'efficacité de l'absorption optique. D'où l'expression suivante, où η est le rendement total de la photodiode.

$$R = \eta R_{th} \quad (I.18)$$

III.4.e.2. Le courant d'obscurité

L'objectif d'un photodétecteur étant de mesurer la présence ou l'absence de photon, il est donc fondamental que ce courant d'obscurité soit le plus faible possible et le courant photonique maximum pour distinguer nettement la différence entre les deux états et pour limiter la consommation électrique du circuit. La figure I.22 illustre la caractéristique I (V) d'une photodiode dans l'obscurité et sous éclairage.

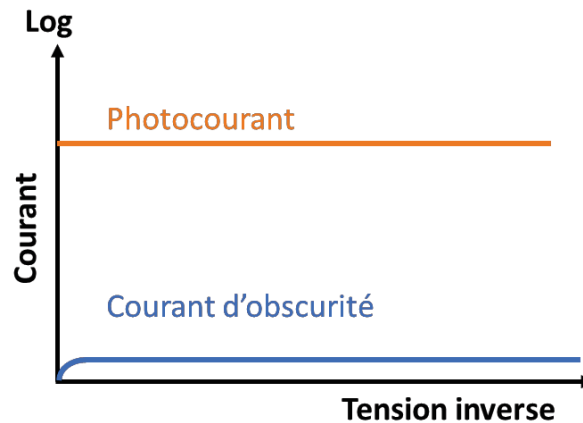


Figure I.22 : courant d'obscurité et photocourant dans une photodiode

III.4.e.3. La bande passante

Un autre paramètre important de la photodiode est son temps de réponse qui détermine sa capacité à détecter un signal à haute fréquence. La bande passante est représentée par la fréquence de coupure, fréquence maximale d'un signal que la photodiode peut détecter. Le temps de réponse dans une photodiode est la somme de trois contributions :

- Le temps de transit est le temps nécessaire pour que les porteurs photo-générés dans la zone de charge d'espace soient collectés par les électrodes. Il correspond au temps de transit des porteurs, sous l'effet du champ électrique, de la zone de charge d'espace vers les contacts. Il est fonction des paramètres intrinsèques du semi-conducteur et de la largeur de la zone de charge d'espace et s'exprime par la relation (I.19) où v_{sat} est la vitesse de dérive des porteurs.

$$\tau_{tr} = \frac{W_{ZCE}}{v_{sat}} \quad (I.19)$$

- Le délai induit par les résistances de la jonction et des contacts ainsi que la capacité de la photodiode. Ce délai appelé délai RC est donné par l'équation (I.20) où R et C sont les résistance et capacité équivalentes de la photodiode.

$$\tau_{RC} = RC \quad (I.20)$$

- Le temps de diffusion des porteurs des zones dopées vers la zone de charge d'espace. Il est considéré égal à la durée de vie effective des porteurs τ_{eff} . Le champ étant quasi nul dans ces zones, ce délai peut être long et constitue un facteur limitant la réponse fréquentielle d'une photodiode.

IV. Fiabilité des composants photoniques sur silicium

Le choix de certaines des solutions présentées pour les différentes fonctions d'un transceiver est dictée par la compatibilité avec la plateforme technologique utilisée, par soucis de performance ou de simplicité par rapport aux méthodes de fabrication utilisées. Ainsi, dans la technologie PIC25G qui est la première plateforme photonique sur silicium de STMicroelectronics, les guides d'onde sont de type Rib et le couplage vertical avec un grating coupler est la méthode utilisée pour toutes les entrées et sorties optiques.

Le modulateur est un interféromètre de Mach Zehnder avec deux bras composés chacun d'un modulateur de phase à variation de porteurs par déplétion ou HSPM (High Speed Phase Modulator) et d'un modulateur de phase à injection de porteurs ou PINPM (PIN Phase Modulator). Du fait de la bande passante limitée du PINPM, l'un des deux est commandé de manière à avoir un déphasage fixe de π et le deuxième sur le bras de référence permet d'avoir un chemin optique identique au bras de commande. Les deux HSPM reçoivent le signal électrique à transmettre et permettent d'ajouter ou de soustraire un déphasage de $\pi/6$ suivant la commande.

Un couplage direct entre la photodiode et son guide d'onde intégré permet une transmission du signal optique dans le récepteur.

Au cours du développement d'un produit, des études de fiabilité sont régulièrement effectuées sur les composants. Ces études ont pour but de s'assurer de la stabilité des performances des composants pendant la durée de vie du produit. Pendant cette phase, les procédés de fabrication sont régulièrement améliorés pour atteindre les critères de performances souhaités et des tests de fiabilité sont effectués à chaque modification de process.

Les critères de performances ainsi que la durée de vie sont fixés par les normes et standards du domaine d'application et/ou les besoins du client. La durée de vie en télécommunication optique pour un composant optoélectronique est de 20 ans. Cette durée de vie étant importante, il est nécessaire d'accélérer le vieillissement des composants dans les études de fiabilité pour assurer un temps de fabrication correct. Ainsi, au cours de tests de dégradation accélérée, les composants sont soumis à des contraintes supérieures aux conditions normales d'utilisation afin de rechercher les mécanismes de dégradation des dispositifs.

Pour certains composants, certains mécanismes de dégradation sont déjà connus et modélisés. Les conditions permettant de les mettre en évidence sont donc mises en œuvre au cours d'un temps donné plus faible que la durée d'utilisation prévue ; puis les résultats obtenus sont injectés dans les modèles établis afin de prédire le comportement du composant à long terme et sa durée de vie.

Suivant l'application des dispositifs, les normes standard du domaine d'utilisation permettent de mettre en place les tests de fiabilité à effectuer et de vérifier si les performances sont en phase avec les spécifications.

Les études de fiabilité permettent de plus de mettre en évidence certaines faiblesses au niveau du composant dues à la conception, aux procédés de fabrication ou au matériau utilisé susceptibles d'être l'origine de problèmes de fiabilité dans le futur.

Pour les composants CMOS, de nombreux mécanismes de dégradation ont déjà été étudiés et sont bien connus. Ce n'est pas le cas des composants photoniques sur silicium. En effet, très peu d'études ont été faites dans ce domaine et la connaissance en fiabilité de composants photoniques sur silicium était, au début de ce travail, très faible.

Dans le domaine des télécommunications optiques, les **spécifications Telcordia** dictent les procédures à suivre afin de qualifier les composants optiques ou optoélectroniques.

IV.1. Les protocoles standard

Le manuel Telcordia pour les composants optoélectroniques utilisés en télécommunications [29] décrit les protocoles des tests à effectuer ainsi que les critères « pass/fail » permettant de valider la fiabilité des composants utilisés dans ce domaine. A titre d'exemple, le tableau I.2 liste quelques tests à effectuer pour une photodiode.

Test	Conditions
Temperature Cycling	-40°C/+85°C, 50 cycles
High Temperature Operation	175°C, 2000h, 2 V _{op}
Damp Heat	85°C, 85% RH, 2000h

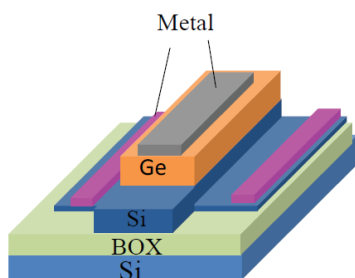
Tableau I.2 : Exemple de tests Telcordia pour une photodiode

Comme le montre le tableau, les temps de tests sont très longs et ont un impact important sur la boucle fiabilité/amélioration process. De plus, ces tests ne montrent pas ou très peu de dégradation au niveau des performances des dispositifs et ceci ne permet pas de comprendre la physique de la dégradation ni de faire une extraction correcte de la durée de vie.

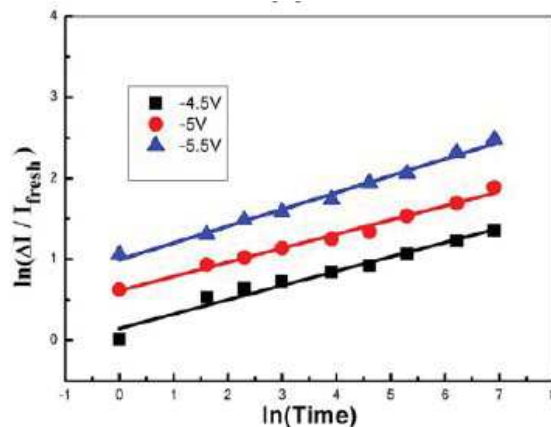
IV.2. Etat de l'art de la fiabilité des composants photoniques sur silicium

La photonique sur silicium est une technologie qui grâce à ses nombreux avantages est susceptible de soutenir le besoin croissant dans la transmission de données rapides tout en limitant les pertes ainsi que le coût de fabrication. Ainsi, un grand intérêt est porté à la fabrication de tels dispositifs. De nombreuses études sur la conception de composants de plus en plus performants ont donc été réalisées. Cependant, la fiabilité de ces dispositifs est très peu connue et les études existantes sont très récentes.

En 2014, une étude faite par Tu, Zhou et Wang sur les photodétecteurs à homojonction Ge est publiée [30]. Le guide d'onde en Si est intégré et le couplage avec la photodiode est évanescent comme le montre l'architecture du dispositif représentée sur la figure I.23.a. La photodiode est stressée avec une tension constante et des étapes de caractérisation permettent de mesurer la caractéristique du courant d'obscurité en fonction de la tension. Ce stress montre une dégradation du courant d'obscurité de l'ordre d'une décade après plus de 1000h de test. La dérive de ce paramètre augmente aussi avec la tension de stress comme le montre la figure I.23.b.



a.



b.

Figure 1.23: Etude de la dégradation du photodétecteur à homojonction Ge : a) architecture du photodétecteur b) : dégradation du courant d'obscurité mesurée au cours d'un stress [30]

La similarité entre la dégradation mesurée et la dérive du courant résultant de l'effet du NBTI (*Negative Bias Temperature Instability*) [31] dans les transistors MOS pousse les auteurs à utiliser le modèle de réaction/diffusion, qui est souvent utilisé pour caractériser l'effet du NBTI, pour interpréter ces résultats et attribuer l'origine à la présence de défauts aux interfaces entre le germanium et le silicium. D'après eux, une rupture des liaisons Si-H et Ge-H obtenues pendant la phase d'épitaxie du Ge sur le Si serait à l'origine de liaisons pendantes qui constitueraient des pièges modifiant la conduction du photodétecteur.

Cependant, aucune étude supplémentaire permettant de confirmer cette hypothèse n'a été effectuée. De plus, l'impact de ce stress sur les autres paramètres du photodétecteur n'a pas été étudié.

Plus récemment, la fiabilité des photodétecteurs à hétérojonction Ge/Si a été le sujet de l'étude présentée à la conférence IRPS en avril 2019 par Lesniewska et al. [32]. L'architecture étudiée est une hétérojonction simple verticale avec un couplage direct entre le guide d'onde et la photodiode (figure I.24.a). Un stress à tension constante pendant un peu plus de 50h à différentes tensions et différentes températures montre une dégradation importante du courant d'obscurité. De plus deux comportements différents ont été observés en fonction de la tension de polarisation pendant la phase de caractérisation sous stress. Pour les faibles polarisations, le courant diminue avec le temps de stress, tandis qu'il augmente pour les polarisations plus élevées comme le montre la figure I.24.b.

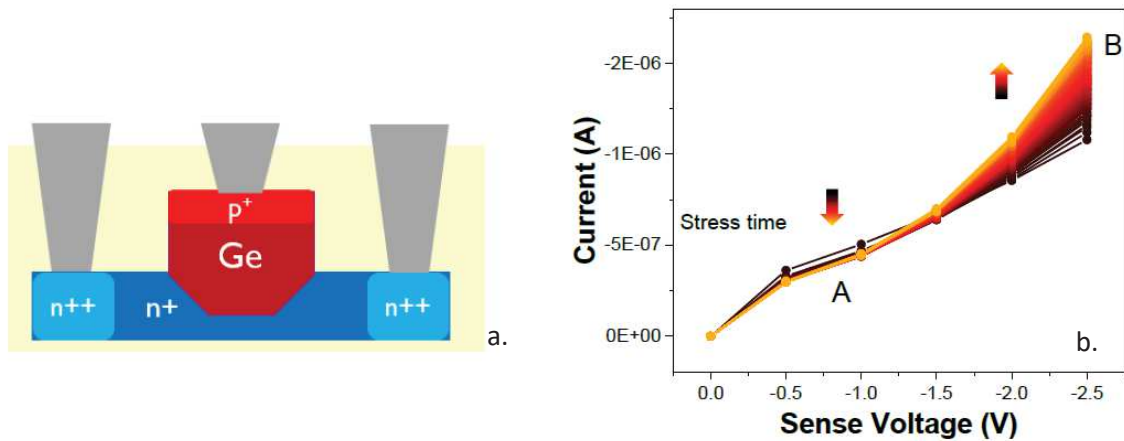


Figure 1.24: Etude de l'imec de la dégradation de photodétecteur à hétérojonction : a) Architecture de la photodiode étudiée, b) Dégradation du courant d'obscurité mesurée [32]

Une analyse de la conduction de la photodiode permet aux auteurs de mettre en évidence trois mécanismes de conduction : la diffusion pour des températures élevées, la génération dans la zone de charge d'espace ainsi que la conduction assistée par tunnel pour des tensions élevées. Ainsi l'auteur attribue la dégradation à une génération de défauts pendant le stress qui se comporteraient différemment suivant la tension de polarisation. Pour les polarisations faibles, les défauts se comporteraient comme des pièges qui seraient à l'origine de la diminution du courant. Pour les fortes polarisations où la conduction est principalement due à un effet tunnel assisté par des pièges, les défauts contribueraient à l'augmentation du courant. Une modélisation TCAD permet aux auteurs de situer les zones de localisation des défauts aux interfaces entre le Si et le Ge et entre le Ge et l'oxyde.

Ces différentes études permettent de mettre en évidence le risque de la génération de défauts aux interfaces entre le Ge et les différents matériaux utilisés dans la fabrication de photodétecteurs en technologie photonique sur silicium. Cependant, l'impact de ces défauts sur les autres figures de mérite de la photodiode n'a pas été démontré en particulier le courant photonique ou la fréquence de coupure qui sont des paramètres clé de la performance des photodétecteurs.

Concernant les autres composants présents dans le transceiver, à ce jour aucune étude montrant une dégradation des performances n'a été publiée.

V. Cadre et objectif de la thèse

La photonique sur silicium est une technologie prometteuse pour les télécommunications optiques et à ce jour elle est principalement utilisée pour les interconnexions optiques dans les centres de données. De nombreuses innovations technologiques ont été faites et les performances sont régulièrement améliorées afin de suivre l'augmentation croissante des données à transmettre. Dans le futur, l'élargissement du domaine d'utilisation de ces dispositifs est envisagé en incluant le domaine spatial ou encore les connexions intra-puces. Les exigences en termes de performances, de stabilité et de fiabilité étant susceptibles d'évoluer, il est important d'améliorer la compréhension des phénomènes physiques conduisant à la dégradation de ces composants. Ceci permettra d'anticiper les problèmes

susceptibles de dégrader les performances de ces dispositifs afin de continuer à suivre l'évolution des besoins en termes d'exigence et d'innovation technologique. En ce sens, l'objectif de cette thèse est l'étude des mécanismes de dégradation en vue d'améliorer la fiabilité des photomodulateurs et photodétecteurs utilisés dans les émetteurs et récepteurs de la technologie photonique sur silicium. Les composants étudiés sont issus de la plateforme PIC25G de STMicroelectronics. Les différentes expériences seront réalisées dans les laboratoires de fiabilité de STMicroelectronics à Crolles, à l'IMEP-LaHC ainsi qu'au CEA LETI. Ce travail de doctorat est soutenu par un financement CIFRE dans le cadre d'une collaboration entre STMicroelectronics et l'IMEP-LaHC. Les résultats attendus doivent permettre d'améliorer les modèles de fiabilité des composants photoniques de STMicroelectronics ainsi qu'une optimisation des tests de fiabilité en termes de rapidité et de précision.

VI. Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre l'intérêt que présente l'utilisation des interconnexions optiques dans les télécommunications ainsi que le rôle des émetteurs/récepteurs optiques (transcievers) dans la conversion des données électriques et optiques afin de permettre leur transport et leur traitement. Nous avons expliqué les fonctions de chacun des composants du transceiver et leur principe de fonctionnement et nous nous sommes intéressés particulièrement aux composants actifs dont l'étude de la fiabilité est l'objet de cette thèse. Les avantages que présente l'utilisation du silicium ainsi que du germanium ont aussi été abordé et nous a permis de comprendre le choix des composants pour la photomodulation et la photodétection dans la technologie PIC25G. Le rôle et l'importance des études de fiabilité dans le développement d'une technologie ont été présentés ainsi qu'une revue de l'état de l'art sur le sujet. La présentation des protocoles standard Telcordia, utilisés pour la qualification des composants photoniques, nous a permis de mettre en évidence leur limitations, principalement les temps de tests très longs qui impactent la boucle fiabilité/amélioration process et aussi la très faible contribution à la compréhension de la physique de la dégradation des composants photoniques. Les études publiées à ce sujet montrent l'intérêt très récent qui est porté sur la fiabilité des photodétecteurs en Ge sur Si. L'article publiée par Tu, Zhou et Wang en 2014 ainsi que l'étude de Lesniewska et al, présentée à la conférence IRPS en avril 2019 montrent que le courant d'obscurité d'une photodiode peut se dégrader sous l'application d'un stress en tension. L'origine de cette dégradation est attribuée par les auteurs à la présence de défauts aux interfaces entre le germanium et les différents matériaux utilisés dans la fabrication des photodétecteurs en technologie photonique sur silicium. Nous avons enfin abordé l'objectif de cette thèse qui est l'étude des mécanismes de dégradation des photomodulateurs et photodétecteurs des transceivers de la technologie PIC25G de STMicroelectronics en vue d'améliorer les modèles de fiabilité des composants photoniques de STMicroelectronics, ainsi que d'optimiser les tests de fiabilité en termes de rapidité et de précision. La suite de cette thèse présentera les différents travaux qui ont été réalisés dans ce cadre.

CHAPITRE 2 : FIABILITE DES PHOTOMODULATEURS ET PHOTODIODES SOUS BOITIER

I. Introduction

La deuxième partie de ce manuscrit présente l'étude technique qui a été dédiée à la **fiabilité des photomodulateurs et des photodiodes sous boîtier**.

Le début de nos travaux de recherche a coïncidé avec l'installation d'un nouveau banc de mesures des dégradations des performances des composants des technologies **PIC** au sein du laboratoire de l'équipe **SiRel** (*Silicon Reliability*) de STMicroelectronics Crolles. L'objectif de cette opération était double : d'une part, répondre à la forte demande de mesures sur les bancs photoniques déjà existants à ST ; d'autre part, concevoir un banc spécifique aux besoins des études en fiabilité. Bien que la conception de ce banc de test ait été antérieure à mes travaux de thèse, celui-ci n'était pas encore qualifié d'un point de vue métrologique à mon arrivée. C'est pourquoi, nous avons d'abord réalisé cette validation afin de pouvoir mener nos études sur les photomodulateurs et photodiodes.

Une des contraintes fortes des caractérisations en fiabilité est qu'elles requièrent souvent d'encapsuler les composants et circuits dans des boîtiers de test afin de les soumettre à des températures élevées qui sont généralement incompatibles avec des tests sous pointes. Le banc photonique qui a été conçu utilise donc ce type de boîtier. Cependant, ceux-ci sont différents des boîtiers microélectroniques habituels, puisqu'au lieu d'échanger des signaux électriques, ceux-ci doivent permettre d'échanger des signaux optiques grâce à des fibres optiques.

Ainsi, ce chapitre présentera tout d'abord la structure du boîtier photonique et les modules de test qui ont été montés dans ce type de boîtier. La validation du banc de mesure sera ensuite détaillée. Enfin, nous détaillerons les résultats des tests de fiabilité effectués sur les photomodulateurs de la technologie PIC25G.

II. Le boîtier photonique

II.1. Structures de tests utilisés

En raison, de la nature opto-électronique des photomodulateurs et photodiodes, ainsi que de l'intégration de ces derniers sur puce, les structures de test dédiées à leurs études impliquent nécessairement l'utilisation de structures passives tels que des guides d'onde, des coupleurs directionnels et des réseaux de couplage. C'est pourquoi, des structures de test spécifiques ont dû être conçues pour permettre de discriminer les dérives des photomodulateurs et photodiodes de celles des fonctions optiques passives.

Un exemple d'une structure de test élémentaire et d'une chaîne de mesure est illustré de façon schématique sur la figure II.1. Un laser envoie un signal à un diviseur 1 vers 8 connecté à une fibre optique elle-même positionnée et collée au-dessus du réseau de couplage de la puce photonique. Le signal optique ainsi injecté dans le guide d'onde se propage vers le photomodulateur **HSPM** où sa phase est modulée par une tension électrique appliquée. L'onde optique est ensuite emmenée par un autre guide d'onde vers le réseau de couplage de sortie où elle est injectée dans une fibre optique reliée à un puissance-mètre. La zone en bleu sur la figure II.1 représente tous les éléments présents à l'intérieur de l'étuve du banc de test.

Le photomodulateur HSPM est aussi relié à une instrumentation électrique qui n'est pas représentée dans ce schéma.

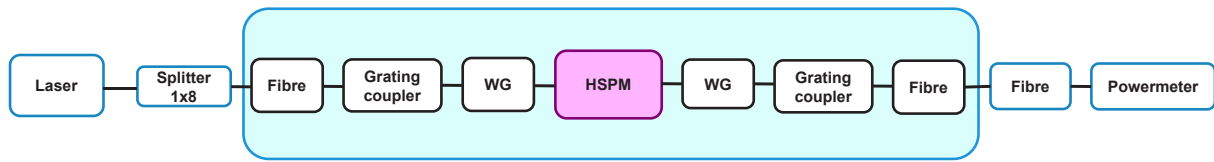


Figure II.1 : Schéma d'une structure de test simple d'un photomodulateur et de son inclusion dans une chaîne de mesure.

Dans cette première configuration, les fibres, les coupleurs, les guides intégrés et le photomodulateur sont tous dans l'étuve. Si une variation des caractéristiques est observée au cours du temps, il n'est pas possible de savoir si celle-ci provient d'une dégradation du HSPM, ou d'un autre composant. Dans cette configuration de chaîne de mesure, il est même possible que, du fait de la longue durée des mesures, les variations de puissance mesurées puissent provenir d'une variation de la puissance émise par la source laser.

Une structure plus adaptée pour l'étude du photomodulateur est illustrée sur la figure II.2. Celle-ci utilise un séparateur en Y permettant d'envoyer le même signal optique à deux photomodulateurs HSPM1 et HSPM2 de longueurs différentes respectivement L_1 et L_2 .

La relation entre les deux longueurs vaut :

$$L_1 = 10L_2 \quad (\text{II.21})$$

Au cours du test, les deux photomodulateurs sont soumis aux mêmes conditions. Le commutateur en fin de chaîne de mesure collecte les deux signaux de manière alternée et renvoie le signal optique sur le même puissance-mètre. Les pertes optiques dans un photomodulateur étant proportionnelles à sa longueur, si deux dégradations sont observées et que celles-ci sont différentes, la différence sera imputable à la différence de longueur entre les deux HSPMs, soit $9L_2$. Cette structure permet d'obtenir une mesure plus précise des pertes optiques dans un photomodulateur. Elle a été développée pendant ces travaux de recherche mais n'a pas pu être utilisée dans le cadre de cette étude.

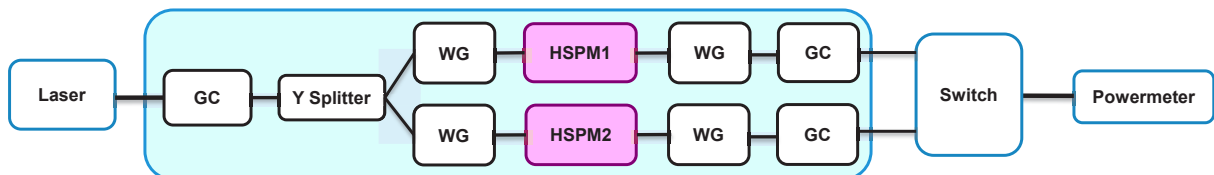


Figure II.2 : Structure de test permettant d'isoler les dégradations électriques du HSPM

La mesure du déphasage du photomodulateur s'effectue avec la structure de test décrite dans la figure II.3.a). Deux photomodulateurs HSPM sont insérés dans une structure interférométrique de type Mach-Zehnder. Le HSPM dans la première branche est polarisée, tandis que le deuxième ne l'est pas, ce dernier sert uniquement à maintenir un chemin optique

identique entre les deux branches à polarisation nulle. La différence de chemin optique entre la lumière passant par la branche non polarisée et celle avec le photomodulateur polarisé, induit des interférences constructives ou destructives après recombinaison des deux branches au niveau du coupleur 3dB. Les deux sorties du coupleur étant complémentaires, elles permettent, prises séparément, de mesurer les interférences et lorsqu'elles sont sommées, de déterminer les pertes optiques globales de la fonction. Grâce à l'interféromètre de Mach-Zehnder, nous avons donc deux sorties optiques en quadrature de phase dont la puissance dépend du déphasage créée par l'application d'une tension sur le HSPM1.

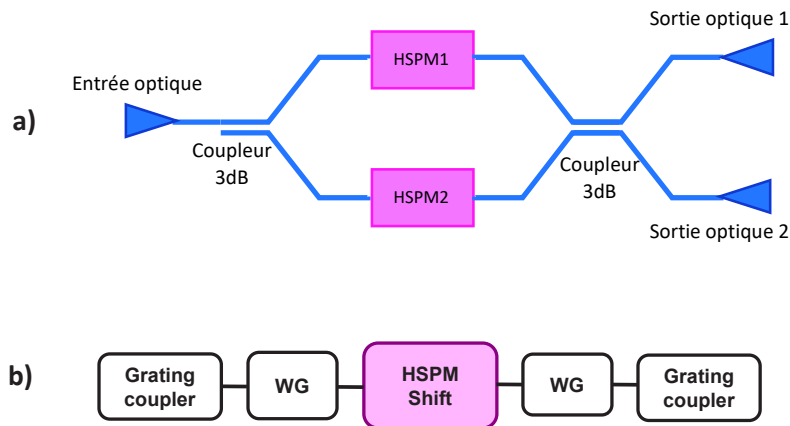


Figure II.3 : Structure de test permettant la mesure du déphasage induite par une tension dans un photomodulateur : a) Structure Mach Zehnder b) Structure équivalente HSPM Phase Shift

Cette structure est insérée dans la même chaîne de mesure que celle présentée en figure II.1. Les entrées et sorties optiques sont constitués de coupleurs optiques (*grating coupler*). Cette structure sera appelée **HSPM Shift** dans la suite et représentée par le schéma simplifié dans la figure II.3.b). De même, la structure utilisée pour la mesure des pertes optiques du photomodulateur, s'appellera **HSPM Loss**.

II.2. Méthode de mise sous boîtier

Les contraintes thermiques utilisées dans la caractérisation de la fiabilité imposent la mise en boîtier des échantillons de test. Cette approche est classique en microélectronique et les procédures de packaging des puces ne ralentissent pas les cycles de caractérisation, ni n'induisent pas de différence avec les caractérisations réalisées sur wafer.

Cependant, le packaging optoélectronique n'est pas aussi aisé que le packaging électronique, en raison de la nécessité d'amener des entrées et sorties optiques au niveau des réseaux de couplage de la puce avec une précision submicronique qui requière un alignement actif. Dans le cadre de la production de la technologie PIC25G, le packaging était réalisé dans une usine de STMicroelectronics située en Asie. Pour des raisons organisationnelles, il n'était donc pas possible de mettre les échantillons destinés à la fiabilité dans les boîtiers industriels. Un sous-contractant a donc été employé à ses fins. Ce choix a entraîné deux conséquences sur notre étude : tout d'abord, le coût significatif de cette mise en boîtier (**350€ par boîtier**) ainsi que les délais de fabrication des échantillons ont eu pour conséquence de limiter le nombre d'échantillons disponibles pour la caractérisation de la fiabilité package (~20 boîtiers disponibles) ; ensuite, nous n'avons aucune certitude que la mise en boîtier effectuée par le

sous-traitant est identique à celle des puces de production PIC25G. Les résultats que nous obtiendrons donc sur le vieillissement du boîtier et de la connectique ne pourront pas être utilisables sur les produits PIC25G commerciaux.

La figure II.4 schématise la connectique électrique et optique en contact avec la puce photonique. Les connexions électriques sont réalisées de façon conventionnelle par **micro-soudure** (*wire bonding*). Les connexions entre les fibres optiques et la puce sont alignées à l'aide d'un V-groove sur les coupleurs. Il y a huit connexions optiques sur le boîtier ainsi que 24 connexions électriques.

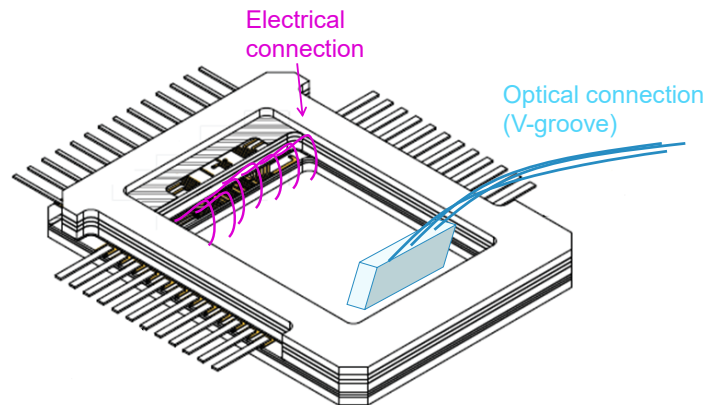


Figure II.4 : Schéma des connexions électriques et optiques de la puce photonique

Le boîtier final est ensuite monté sur un circuit électronique imprimé afin d'être placé dans le banc de test. Le montage global est illustré par la photographie de la figure II.5, montrant les fibres optiques et les connexions électroniques. Un point important illustré par la figure II.5 est la présence des fibres, à nue sur environ 1 cm, à la sortie du boîtier, et donc placée dans l'étuve de test. Ainsi, contrairement aux contraintes thermiques imposées en caractérisation de fiabilité en microélectronique de l'ordre de plusieurs centaines de degré Celsius, les températures maximales possibles pour les tests utilisant ce boîtier ne pourront pas dépasser 85 °C, sous peine de dégrader les connexions des fibres optiques et donc de fausser les résultats de mesures. Ce point constitue une forte limitation des caractérisations de la fiabilité des puces photoniques sous boîtier.

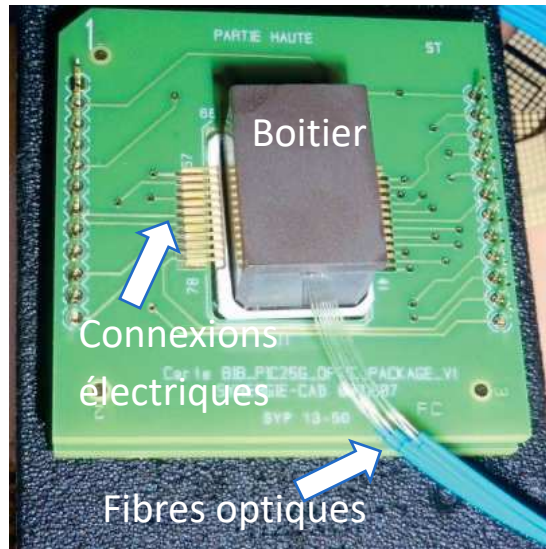


Figure II.5 : Boîtier et circuit de connexion électrique

III. Banc et méthode de mesure pour les composants photoniques sous boîtier

Les boîtiers présentés précédemment ont été étudiés à l'aide d'un banc de mesure dédié. Cette partie présente l'instrumentation et la chaîne de mesures utilisées dans ce banc.

III.1. Description du banc

La chaîne de mesure du banc de test est schématisée sur la figure II.6. Celle-ci débute par la source optique, un laser Keysight 8164B, illustré sur la figure II.7. L'incertitude annoncée par le constructeur sur la valeur de la puissance de sortie à $\lambda=1310$ nm est de $\pm 0,01$ dB. Ce signal optique est propagé vers le composant de test à travers une fibre optique monomode à maintien de polarisation. Si la mesure de la puissance en sortie du composant testé est nécessaire, celle-ci est mesurée par un puissance-mètre Keysight N7745A, illustré sur la figure II.7. L'incertitude constructeur de cet appareil de mesure est de $\pm 4,5$ %. Enfin, s'il est nécessaire d'appliquer un signal électrique ou inversement de le mesurer, une SMU (Source Measurement Unit) Keysight B2902A est utilisée. Son incertitude est considérée comme négligeable aux regards des valeurs de courants mesurés.

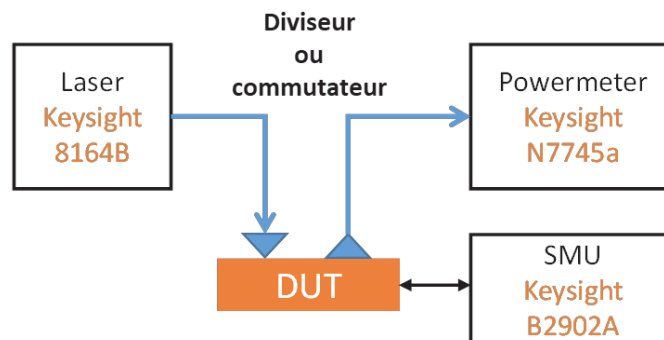


Figure II.6 : Chaîne de mesure du banc de test

Laser Keysight 8164B



incertitude= ± 0,01 dB

Powermeter (4 entrées)
Keysight N7745a



incertitude= ± 4,5% = ± 0,19 dB

Figure II.7 : Principaux instruments optiques du banc de mesure

La mesure d'un seul composant optique par puce, par cycle de contrainte thermique et de tension n'étant pas optimale, il est donc nécessaire d'avoir la possibilité de mesurer plusieurs composants sur la même puce, dans le même boîtier. La figure II.5 montre que plusieurs fibres optiques sont disponibles sur le boîtier à cet effet. Il faut donc pouvoir séparer la source optique vers la fibre d'entrée désirée et récupérer le bon signal de sortie pour l'amener vers le puissance-mètre. Ces fonctions sont assurées respectivement par un **diviseur optique** (*splitter*) 1 vers 8, et par un **commutateur** (*switch*) optique 1 vers 4. Ce dernier instrument optique peut aussi être utilisé pour sélectionner la fibre d'entrée choisie. La répétabilité du commutateur est annoncée comme étant sa principale source d'incertitude et vaut ±0.01 dB. Les spécifications du diviseur sont quant à elles inconnues.

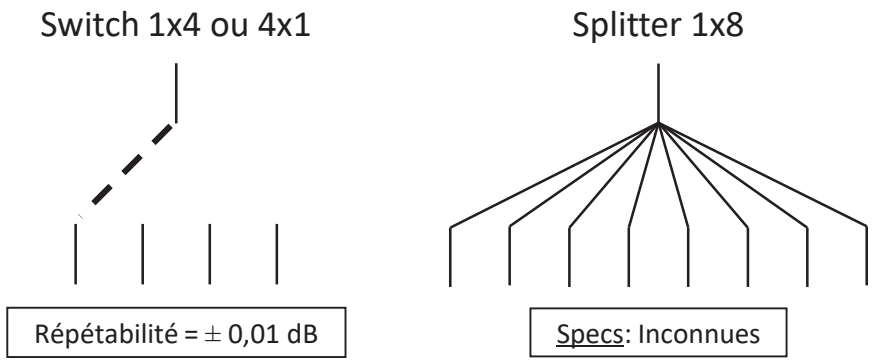


Figure II.8 : Principe de fonctionnement d'un commutateur et d'un séparateur optique

Le banc est accompagné d'un contrôleur de température. Celui ne sera cependant pas utilisé au-delà de 85 °C. Enfin, ce banc a été placé au sein du laboratoire dédié au groupe SiRel de Crolles, c'est-à-dire au sein d'un environnement à la température ambiante et aux taux d'humidité constants.

III.2. Qualification du banc

En caractérisation électrique de composants, les incertitudes de mesures ont été réduites à un point tel qu'elles ne sont que très rarement mentionnées dès que les courant mesurés ont une valeur supérieure au nA ou que les tensions sont supérieures à 10 mV. Les incertitudes des caractérisations proviennent de façon plus significative de la variabilité des caractéristiques des composants électroniques qu'il faut ainsi mesurer statistiquement.

Ceci ne s'applique pas aux mesures optiques. A titre d'exemple, l'incertitude constructeur du puissance-mètre N7745a est annoncé à $\pm 4,5 \%$. Or cet instrument n'est pas le seul à souffrir d'incertitude dans la chaîne de mesure et c'est ainsi l'incertitude totale du banc de mesure qu'il faut qualifier. Cette section présente ainsi l'analyse de la qualification du banc de mesure du point de vue des incertitudes et de la stabilité des mesures.

III.2.a. Incertitude et stabilité des mesures

L'estimation de l'incertitude de mesure du banc nécessite une étude séquentielle de chaque instrument de la chaîne de mesure. Le paramètre qui sera utilisé dans cette partie pour cette estimation est la puissance optique mesurée par le puissance-mètre car cette quantité est la plus sensible aux incertitudes (les mesures électriques étant plus précises). Cette mesure de puissance sera par ailleurs effectuée sur un temps long afin d'estimer la stabilité du signal et des éléments de la chaîne mesure.

- Laser et puissance-mètre



Figure II.9 : Schéma fonctionnel du montage laser + puissance-mètre

Les deux premiers éléments dont les incertitudes vont être estimées sont la source laser Keysight 8164B et le puissance-mètre N7745a, connecté comme indiqué par le schéma fonctionnel de la figure II.9. N'ayant pas d'autres instruments à disposition, il n'a pas été possible de séparer ces deux incertitudes. Ces deux éléments se trouvant systématiquement dans les mesures, leurs incertitudes seront donc considérées conjointement. La figure II.10 présente la puissance du laser mesurée par le puissance-mètre sur une durée de 3×10^4 s, pour 7 consignes de puissances indiquées au laser (de 1 à 7dBm).

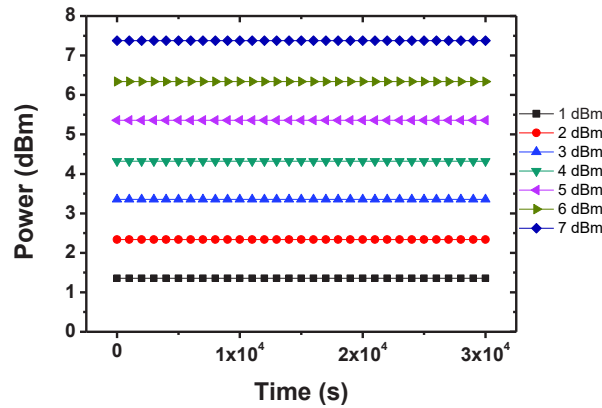


Figure II.10 : Puissance mesurée en fonction du temps pour la chaîne de mesure laser + puissance-mètre, pour 7 consignes de puissance différentes de la source laser

La figure II.10 montre que la puissance mesurée diffère de la puissance de consigne d'environ 0,4 dBm, mais de façon constante sur la plage de puissance utilisée. Comme mentionné précédemment, il n'a pas été possible d'évaluer si cette différence était due au puissance-mètre ou à la source laser. Par ailleurs, la mesure est stable dans le temps aux échelles d'amplitude de puissance utilisées. Des variations plus faibles sont observées à des échelles de puissance plus petites.

La mesure précédente a été effectuée sans modification de la longueur d'onde (1310 nm). La série des sources laser Keysight 8160 étant accordable de 1250 à 1370 nm, la même mesure a été effectuée avec une variation de la longueur d'onde pour chaque puissance de consigne. Les mesures à 1310 nm sont extraites et représentées dans la figure II.11. La légère différence (0,1 dBm) observée entre les mesures de la figure II.10 Et II.11 est situé dans la barre d'incertitude du puissance-mètre. Nous en déduisons donc qu'un balayage en longueur d'onde de la source laser n'induit pas d'instabilité supplémentaire sur la chaîne de mesure.

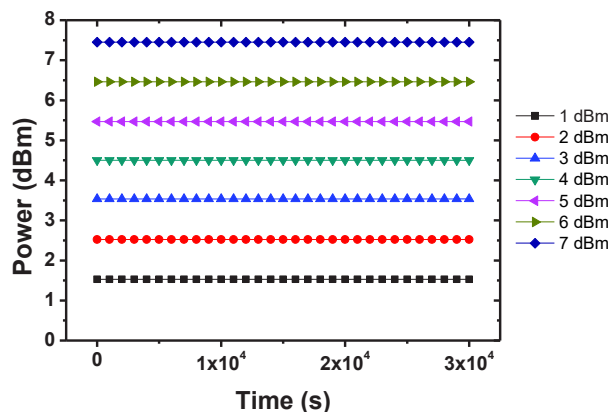


Figure II.11 : Puissance mesurée en fonction du temps pour la chaîne de mesure laser + puissance-mètre, pour 7 consignes de puissance différentes de la source laser

Sur la base de ces mesures, nous constatons qu'un écart de 0,5 dBm existe entre la puissance mesurée et la consigne, mais celle-ci est constante sur toutes les puissances, et faiblement variable avec la longueur d'onde.

- Laser, séparateur optique et puissance-mètre



Figure II.12 : Schéma fonctionnel du montage laser + séparateur + puissance-mètre

La deuxième chaîne de mesure qui a été évaluée, est constituée d'un montage associant un laser, un diviseur optique et un puissance-mètre, comme l'illustre le schéma fonctionnel de la figure II.12. Ce montage, par comparaison avec le précédent, permet d'évaluer les incertitudes et la stabilité du diviseur 1 vers 8. Les mêmes expériences ont été effectuées sur cette chaîne de mesure : la puissance du laser est balayée de 1 à 7 dBm et mesurée par le puissance-mètre pendant 3×10^4 s. La figure II.13 trace les résultats de cette expérience en mesurant la puissance sur une seule des sorties du séparateur, pour les différentes puissances.

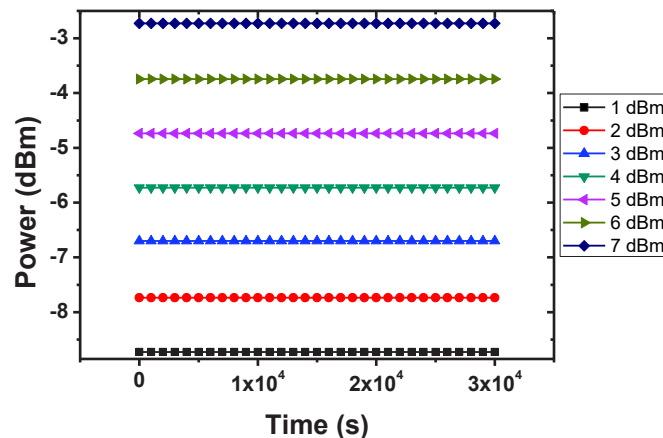


Figure II.13 : Puissance mesurée en fonction du temps pour la chaîne de mesure laser + séparateur + puissance-mètre, pour 7 consignes de puissance différentes de la source laser

L'allure de la figure ne diffère pas des figures II.10 et II.11, ce qui démontre que séparateur n'induit pas d'instabilité dans le temps sur la puissance optique, à l'échelle de puissance exploitée sur la figure. Toutes les courbes sont séparées entre elle de 1 dBm. On constate cependant que le diviseur 1 vers 8 induit une perte optique de 9,6 dB. Ceci est logique puisque ce type de composant est réalisé en cascade de coupleurs 3 dB. Ainsi, pour séparer le signal en 8, il faut d'abord passer par un coupleur qui va prélever la moitié du signal, puis aller sur un autre coupleur qui divise encore celui-ci en deux parts égales et finalement, un troisième coupleur permet d'obtenir un huitième de la puissance initiale soit la puissance émise moins 9 dB. Ainsi, des 9,6 dB de pertes optiques mesurées seules 0,6 dB sont réellement perdues. Les 9 dB restant sont en fait redistribués sur les sept autres voies du diviseur.

Une source d'incertitude supplémentaire due au séparateur peut provenir de la différence entre ses 8 sorties optiques. Pour évaluer cette incertitude, une mesure de la puissance dans le temps a été effectuée, pour une consigne du laser de 7 dBm. Les 8 sorties ont été ensuite mesurées par le puissance-mètre. Les résultats de ces 8 mesures sont tracés sur la figure II.14.

On constate tout d'abord que les 8 sorties ne sont pas équivalentes. En effet, 0,22 dB séparent la plus haute et la plus basse puissance mesurée. Par ailleurs, la représentation des mesures précédentes ne permettait pas d'illustrer les faibles variations temporelles de la puissance. La figure II. 14 permet de montrer ces variations de l'ordre de 10^{-2} dB, donc négligeable par rapport aux incertitudes dues aux différences entre les sorties optiques du séparateur. Du fait de la difficulté de qualifier chaque voie du séparateur, la valeur de 0,22 dB sera considérée comme source d'incertitude de cet élément.

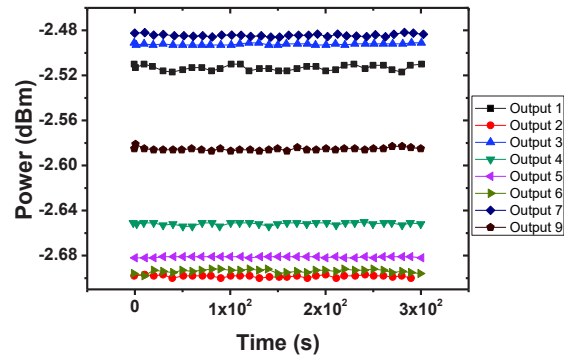


Figure II.14 : Puissance mesurée en fonction du temps pour la chaîne de mesure laser + séparateur + puissance-mètre, pour les 8 sorties du séparateur, pour une puissance du laser de 7 dBm

- Laser, commutateur et puissance



Figure II.15 : Schéma fonctionnel du montage laser + commutateur + puissance-mètre

Le dernier élément dont les incertitudes et la stabilité sera étudiée est le commutateur optique. Cet élément est électromécanique et possède 4 voies différentes pour propager le signal optique. La chaîne de mesure utilisée insère deux commutateurs identiques entre le laser et le puissance-mètre, avec 4 fibres entre les deux commutateurs, afin de caractériser les quatre voies, comme illustré sur la figure II.15. Comme précédemment, la puissance a été mesurée pendant 3×10^4 s, cette fois ci pour chacune des 4 voies. Les résultats sont reportés sur la figure II.16.

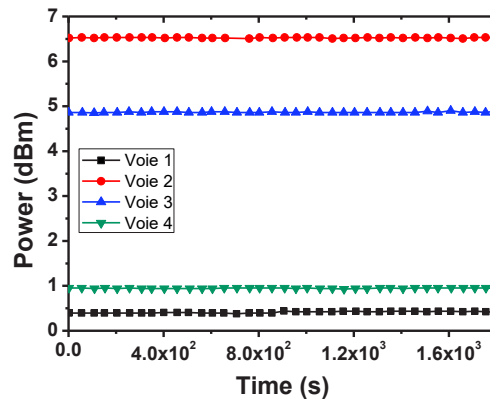


Figure II.16 : Puissance mesurée en fonction du temps pour la chaîne de mesure laser + commutateur + puissance-mètre, pour les 4 voies du commutateur

On remarque tout d'abord sur la figure II.16 une légère variation sur la puissance mesurée. Cette variation est de l'ordre de 0,035 dB. L'autre point souligné par cette figure est la disparité de pertes très significative entre les voies, d'au moins 6 dB. Ceci indique que le commutateur ne serait pas un élément à utiliser pour comparer de façon absolue les pertes entre différents composants d'une même puce.

- Bilan

On constate donc qu'un compromis est nécessaire pour les mesures. Pour une mesure à faible incertitude, il serait nécessaire d'utiliser le commutateur, mais celui-ci empêche la comparaison entre les voies. Pour une comparaison entre les voies, le diviseur serait recommandé, mais il introduit la plus grande incertitude, de l'ordre de 0,22 dB sur la puissance mesurée, ainsi qu'une perte sur le signal optique de 9,6 dB.

III.2.b. Impact des perturbations environnementales sur les mesures



Figure II.17 : Schéma fonctionnel de la chaîne de mesure d'un guide optique intégré

Les incertitudes de mesures du banc étant estimées, la dernière partie de sa qualification consiste à identifier de potentielles sources de perturbations environnementales. Le banc étant dans un environnement à température et humidité constante, c'est principalement la perturbation apportée par l'utilisateur du banc qui a été étudié. La chaîne de mesure illustrée par la figure II.17 a été utilisée à ces fins. Dans ce montage, une structure constituée d'un guide d'onde intégrée de la technologie PIC25G et de deux coupleurs constituant l'entrée et la sortie du signal optique a été utilisée. La puissance provenant du laser est injectée via le coupleur d'entrée dans le guide optique intégré. La puissance en sortie est couplée à une fibre, connectée au puissance-mètre. Afin d'obtenir une sensibilité au premier ordre due à une perturbation dans l'utilisation du banc, la fibre optique d'entrée a été déplacée et la puissance mesurée pendant ce déplacement. Le résultat de la mesure est montré sur la figure II.18, qui trace l'enregistrement de la puissance pendant ce déplacement.

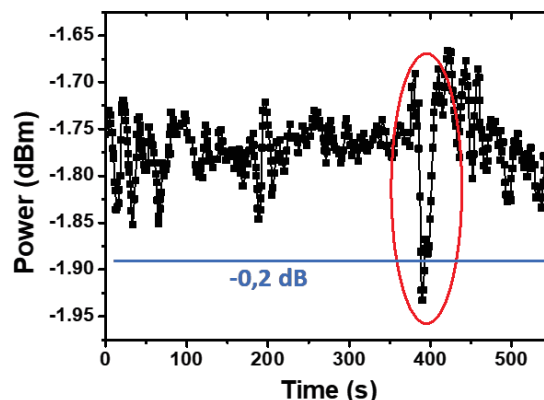


Figure II.18 : Puissance mesurée au cours de la perturbation, entourée en rouge.

Cette mesure démontre qu'en présence d'une perturbation, même légère, la puissance est impactée de façon significative. On constate sur la figure II.18 un décrochage de 0,28 dBm.

Cette mesure pourrait sembler anecdotique, mais elle illustre la forte sensibilité du banc de mesure et le soin qui doit être apporté aux conditions d'utilisation du banc. Dans une certaine mesure, ce point pourrait remettre en question la qualification du banc, même si son utilisation est possible en manipulant correctement les fibres. Cette grande sensibilité dans la transmission optique sera illustrée dans la partie suivante, dédiée à la caractérisation des composants photonique intégrés, mis en boîtier.

IV. Caractérisation de la fiabilité des composants photonique sous boîtier

Le banc étant qualifié et les différentes incertitudes connues, il est donc possible d'effectuer des mesures avec une confiance quantifiée dans ces dernières. Cette partie présente donc la caractérisation des photomodulateurs et des photodétecteurs de la technologie PIC25G mis en boîtier.

IV.1. Caractérisation des photomodulateurs en boîtier

IV.1.a. Chaîne de mesure, paramètres mesurés et méthodologie

La chaîne de mesure présentée dans la figure II.19 a été utilisée afin de mesurer les caractéristiques des photomodulateurs intégrés.

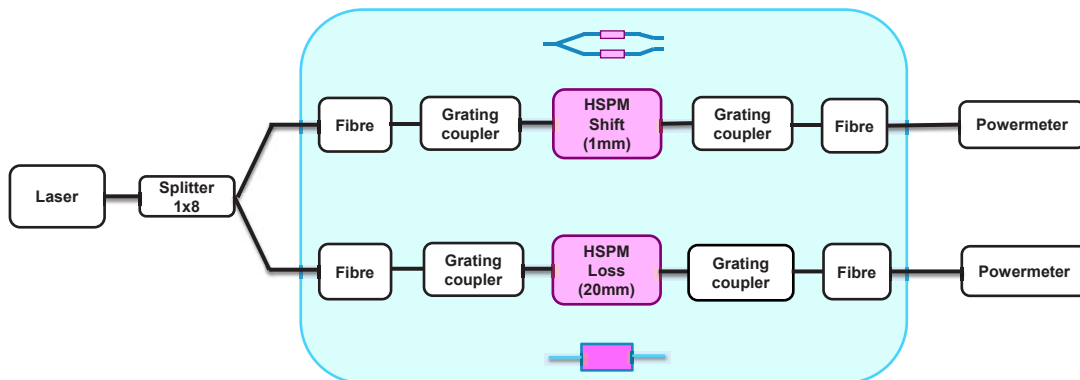


Figure II.19 : Schéma fonctionnel de la chaîne de mesure de deux photomodulateurs intégrés.

Le laser émet son signal vers le séparateur optique 8 sorties, dont seulement deux sont utilisés vers deux fibres couplées chacune à un coupleur. Le signal est envoyé au travers de guides intégrés vers deux structures de photomodulateurs **HSPM Shift** et **HSPM Loss**. La première branche permet donc de mesurer le décalage de phase induit par le photomodulateur de 1 mm de long. Le signal optique est ensuite propagé à travers un guide vers le coupleur, puis une fibre, et enfin mesuré par un puissance-mètre. La deuxième branche effectue la même mesure. Le photomodulateur qui y est inséré mesure 20 mm de long, et est donc utilisé pour mesurer les pertes de l'ensemble du chemin optique. On suppose ici que les 20 mm de ce

modulateur dominant la perte de ce chemin optique. Les **pertes statiques** (tension nulle) et les **pertes dynamiques** (en appliquant une tension variable au photomodulateur) seront toutes deux mesurées sur ce composant. Deux puissance-mètres identiques sont utilisés pour effectuer les mesures de puissance.

IV.1.b. Perte statique et perte dynamique

La perte statique et dynamique, ainsi que le décalage de phase ont été mesurée à l'aide de la chaîne de mesure et la structure de test détaillées dans le paragraphe précédent.

La perte statique a été mesurée en répétabilité sur 16 mesures et pour 3 puissances de consigne du laser. Les résultats sont tracés sur la figure II.20.

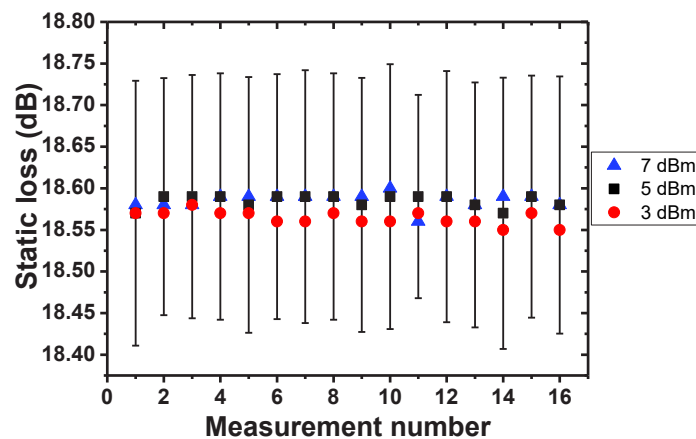


Figure II.20 : Mesure en répétabilité de la perte statique de l'ensemble de la chaîne de mesure présenté sur la figure II.20.

On constate tout d'abord que l'ensemble des mesures est globalement constant pour les 16 mesures. La faible variation observée aux cours des mesures est plus grande que sur la chaîne de mesure utilisant le laser, le séparateur et le puissance-mètre. Cependant celle-ci est inférieure aux incertitudes de mesure évaluée lors de la validation du banc. Les variations apparentes avec la puissance optique utilisée n'ont donc pas de signification physique.

On remarque cependant que la perte de la chaîne de mesure est très significative. En faisant l'hypothèse d'une perte dominée principalement par le modulateur, on déduirait une perte de 4,8 dB/cm dans le modulateur. Cependant, pour valider ce résultat, il serait nécessaire de mesurer les pertes par insertions due aux coupleurs et les pertes des guides optiques. Or, ceci nécessiterait une structure de test avec des variations séparées de la longueur des guides, et de la longueur du modulateur. Ces structures n'étant malheureusement pas disponibles au moment de ces travaux, cette mesure n'a donc pas été possible.

La perte dynamique, c'est-à-dire la variation relative de perte induite par l'application d'une tension aux bornes du photomodulateur de 20 mm, et donc la modification de la quantité de porteurs libres, de l'indice optique et de l'absorption, a été mesurée en fonction de la tension, pour trois puissances optiques. Les résultats sont montrés sur la figure II.21.

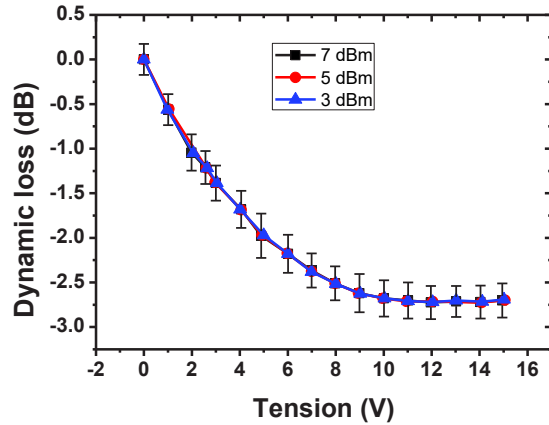


Figure II.21 : Perte dynamique du photomodulateur de 20 mm en fonction de la tension inverse appliquée (valeur absolue) pour trois puissances du laser.

La figure II.21 correspond au résultat attendu : l'application d'une tension en inverse sur la jonction du photomodulateur élargit la zone de charge d'espace de cette dernière. La quantité de porteurs libres est donc significativement diminuée le long des 20 mm du modulateur. L'absorption optique par les porteurs libres du silicium dopé p chute donc fortement, et la perte relative de l'ensemble de la chaîne de mesure est plus faible. A partir de 12 V, la diminution sature. L'ensemble de la variation observée est plus grande que les incertitudes du banc, ce qui permet par ailleurs de valider le bon fonctionnement de la chaîne de mesure. Enfin, la variation de puissance optique n'a aucun impact sur la perte dynamique.

Cette variation d'absorption n'est pas directement utilisée pour effectuer la modulation du signal. Afin d'augmenter la variation d'amplitude du signal modulé, le photomodulateur est utilisé dans une structure interférométrique de Mach-Zehnder (HSPM Shift), comme illustré dans la figure II.3 et représenté dans l'insert de la figure II.19. Le décalage de phase du photomodulateur en fonction de la tension appliquée est tracé sur la figure II.22, pour les trois mêmes puissances optiques.

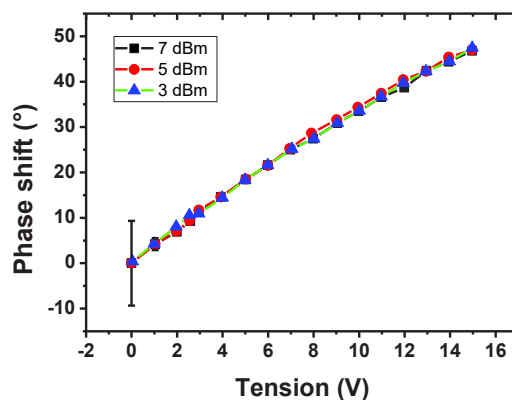


Figure II.22 : Décalage de phase de la structure HSPM Shift en fonction de la tension appliquée pour 3 puissances optiques.

La mesure effectuée confirme d'une part la fonctionnalité du composant et la fonctionnalité du banc de mesure. Une variation de près de 50° est déduite de la variation de puissance optique sur une plage de 16 V. On remarque que la traduction de la puissance

optique mesurée en décalage de phase réduit les incertitudes sur la mesure dès l'application d'une tension inverse.

IV.1.c. Comportement en température

Afin de préparer une potentielle étude sous contrainte thermique, les mêmes caractérisations que celles exposées au paragraphe précédent ont été effectuées pour trois températures différentes : 30, 50 et 85 °C. Pour rappel, une température supérieure à 85 °C n'est pas envisageable du fait de la dégradation de la gaine en polymère des fibres optiques au-delà de cette température.

Les pertes statiques du photomodulateur ont été mesurées ici aussi en répétabilité sur 16 mesures. Les résultats sont reportés sur la figure II.23.

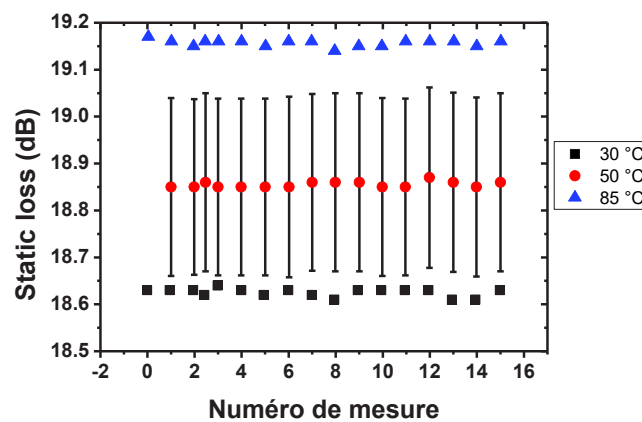


Figure II.23 : Mesure en répétabilité de la perte statique de l'ensemble de la chaîne de mesure pour trois températures différentes.

On constate de nouveau que la mesure en répétabilité est bonne avec une variation inférieure à 0,05 dB. La variation de perte induite par la température est plus importante. La comparaison avec les incertitudes de mesure montre que cette variation serait effectivement significative. La figure II.23 montre que les pertes augmentent avec l'augmentation de la température. On s'attend en effet lors d'une augmentation de la température à voir les pertes augmenter, du fait d'une augmentation de la quantité de porteurs libres dans les bandes, qui augmente l'absorption optique des guides et du photomodulateur. Cependant cette mesure ne dépend pas seulement du comportement en température des modulateurs mais aussi de celui des réseaux de couplage en entrée et sortie du dispositifs qui, sous l'influence de la température se dilatent. Leur pas changeant, il n'est plus alors garanti que le couplage entre ceux-ci est les fibres optiques reste optimal.

La perte dynamique a été mesurée pour les mêmes températures, sur le photo-modulateur de 20 mm de long. Les résultats sont présentés sur la figure II.24.

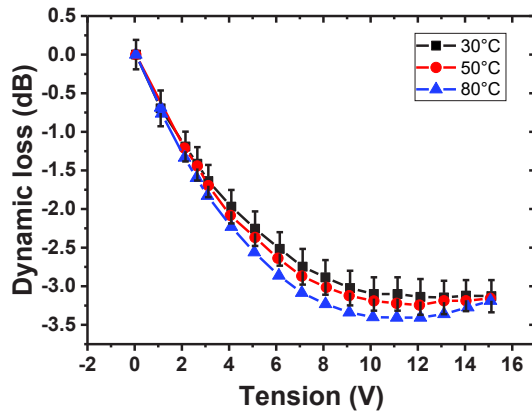


Figure II.24 : Pertes dynamiques du photo-modulateur de 20 mm en fonction de la tension inverse appliquée (valeur absolue) pour trois températures différentes

Les mêmes tendances sont obtenues pour la perte dynamique, quelles que soient les températures, avec une amplitude plus forte pour les températures plus importantes. Ce résultat est cette fois en accord avec le fonctionnement attendu des composants. En effet, à tension nulle, une augmentation de la température augmente l'absorption optique dans le photomodulateur. En appliquant une tension, on diminue la quantité de porteurs libres dans le photomodulateur à une valeur quasiment nulle. Pour une température modérée, l'amplitude de la variation d'absorption est plus faible que pour une mesure à plus haute température, car celle-ci présente une absorption plus forte à tension nulle. Sur la figure II.24, et afin d'illustrer la variation de la perte induite par la tension, toutes les courbes sont décalées pour présenter une perte dynamique nulle à tension nulle. Ce changement de référence nécessaire a pour effet de décaler les courbes de pertes à forte tension.

Le décalage de phase a de même été mesuré pour les trois températures. Les résultats obtenus sont tracés sur la figure II. 25.

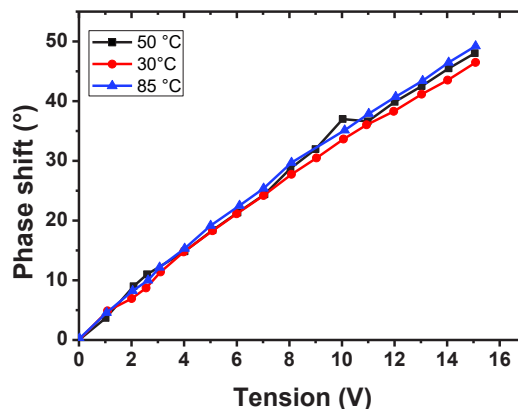


Figure II.25 : Décalage de phase en fonction de la tension inverse, mesurée sur le photomodulateur de 1 mm, pour trois températures différentes.

On constate ici aussi que la tendance est identique à la mesure précédente. L'effet de la température est cependant plus faible (de l'ordre de quelques degrés), mais en accord avec les résultats de pertes dynamiques : à plus haute température, l'amplitude de la variation d'absorption optique induite par le déplacement de la zone de charge espace est plus

significative, car partant d'une valeur plus forte pour atteindre une valeur plus faible, commune à toutes les températures. Cette plus grande amplitude de variation d'absorption induit une plage plus forte de variation d'indice optique, et donc de chemin optique. Ceci permet d'atteindre des décalages de phase légèrement plus grands à haute température qu'à faible température.

IV.1.d. Mesure sous contraintes

Des mesures en contraintes ont été effectuées sur les photomodulateurs. Les figures II.26, II.27 et II.28 présentent les résultats de ces mesures, pour, respectivement, la perte statique, la perte dynamique et le décalage de phase des photomodulateurs. Au cours de ces mesures, une contrainte en tension de 5V et une température de 85°C ont été fixées.

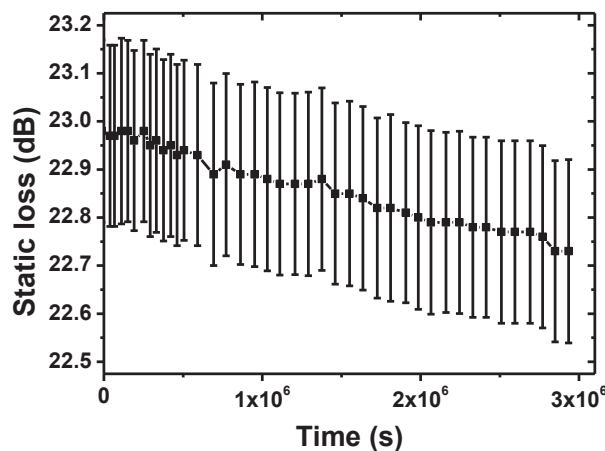


Figure II.26 : Evolution des pertes statiques d'un photomodulateur de 20 mm de long au cours d'un stress en tension de 5V à une température de 85°C mesurée pendant 3×10^6 s

On remarque sur la figure II.26 une décroissance de la perte statique de 1,2%, le long des 3×10^6 s, soit 0,24 dB. Cependant, les incertitudes de mesures sont du même ordre que cette variation, même si celle-ci est monotone. De plus, il n'est pas possible ici aussi d'attribuer cette variation, si elle est significative, aux photomodulateurs, au guide optique, ou aux coupleurs intégrés.

La figure II.27 présente quant à elle une perte dynamique constante sur la durée de la mesure. Ceci montre que la capacité de modulation n'a pas été affectée par la contrainte.

Enfin, la figure II.28 confirme les résultats de la mesure II.27. Le décalage de phase est très bruité, mais toujours à l'intérieur des incertitudes de mesures. On peut donc considérer le décalage de phase comme constant le long de la mesure.

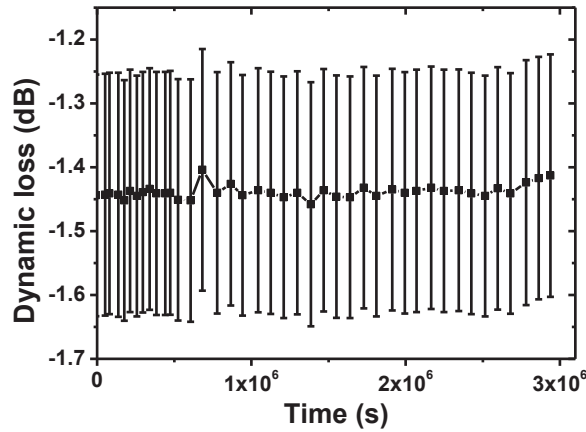


Figure II.27 : Pertes dynamiques en fonction du temps, pour une contrainte en tension de 5V à 85°C pendant 3×10^6 s

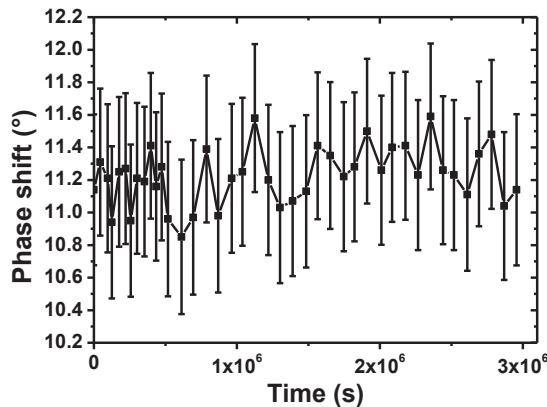


Figure II.28 : Décalage de phase en fonction du temps, pour une contrainte en tension de 5V à 85°C pendant 3×10^6 s

L'ensemble de ces résultats montrent tout d'abord l'importance de la qualification du banc et de la chaîne de mesure afin d'estimer les incertitudes sur les mesures optiques. En effet, sans elle, il serait tentant d'interpréter les résultats et d'en chercher une origine physique, en particulier dans le cas de la perte statique. Les résultats présentés en fin de chapitre confirmeront cette prudence nécessaire.

Enfin, la perte dynamique et le décalage de phase semblent indiquer que la capacité du composant testé à moduler la lumière ne subit pas de dégradation au cours de la contrainte. De nombreux autres tests ont été effectués sur ces composants au cours de ce travail. Cependant, aucune dégradation n'a été observée sur les photomodulateurs. Ces résultats semblent donc indiquer que les performances de la fonction optique de ce composant sont très robustes.

Ceci n'est pas nécessairement surprenant si on analyse l'origine physique de la modulation dans ce composant. Celle-ci est créée par un déplacement de la zone de charge d'espace, et donc son origine est électrostatique. La mobilité des porteurs ou leur durée de vie, c'est-à-dire les propriétés de transport des charges, n'entrent pas en jeu dans ce mécanisme, contrairement au courant dans un transistor MOS. Les propriétés et les paramètres physiques influençant ces phénomènes électrostatiques sont donc la constante diélectrique d'une part, et les profils des dopants d'autre part. Pour induire une dégradation des capacités de modulation

du composant, il serait donc nécessaire de faire migrer les dopants, ou de modifier le matériau pour dégrader sa constante diélectrique. Ceci nécessiterait des énergies très importantes, non atteignable du fait de la présence des fibres optiques tout au long de la mesure. Il ne serait donc pas possible avec les conditions expérimentales imposée par la mesure optique de dégrader les photomodulateurs. Enfin, une dégradation des photomodulateurs a plus haute température a été envisagée sur substrat, comme l'illustrera le chapitre suivant pour la photodiode, donc sans la présence des fibres. Mais cette mesure ne pourrait être pertinente. En effet, le placement et le déplacement des fibres optiques par rapport au coupleur entre chaque mesure de contrainte introduit des variations de puissance qui ne pourraient être discriminées d'une éventuelle variation des performances du photomodulateur.

IV.2. Etude de la photodiode mise en boîtier

Après l'étude sur les photomodulateurs mis en boîtier, cette partie présente les résultats de mesure obtenus sur les photodiodes à homojonction en Ge en boîtier de la technologie PIC25G.

IV.2.a. Paramètres mesurés et méthode

La chaîne de mesure utilisée pour effectuer les mesures du courant dans les photodiodes est schématisée sur la figure II.29. Le signal optique provenant du laser est envoyé à un commutateur optique afin de limiter les pertes en puissance, renvoyant lui-même la lumière dans une fibre optique couplée à la puce photonique. Le signal est ensuite propagé par un guide optique intégré vers la photodiode. Le courant dans la photodiode est mesuré en fonction de la tension par la SMU, soit dans les conditions d'obscurité, soit en présence de lumière.

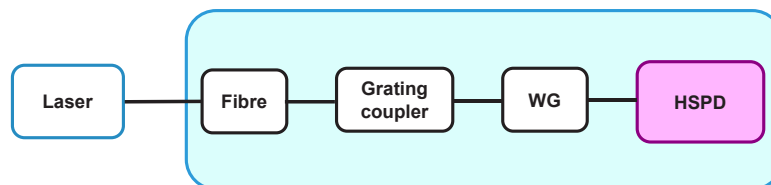


Figure II.29 : Chaîne de mesure du courant dans la photodiode

IV.2.b. Comportement en tension

Le courant en fonction de la tension a été mesurée pour 10 photodiodes afin d'estimer la dispersion des caractéristiques électriques de la technologies PIC25G. La figure II.29 rassemble ces 10 mesures de courant.

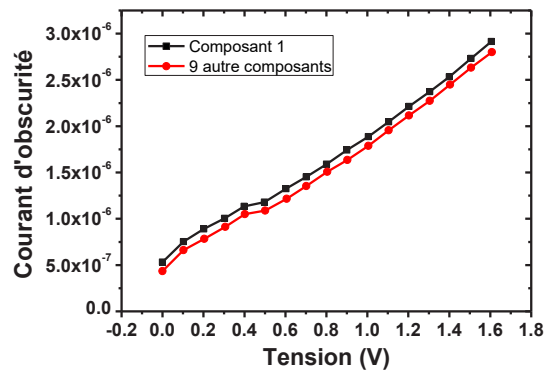


Figure II.30 : Courant d'obscurité en fonction de la tension pour 10 photodiodes

Tout d'abord, on constate sur la figure II.30 que le courant d'obscurité n'est pas totalement nul à tension nulle. De plus, le courant varie de façon significative avec la tension lorsqu'une polarisation inverse est appliquée à la jonction, alors qu'un courant de saturation constant est attendu dans une diode en inverse. Cette caractéristique, qui se retrouve sur toutes les mesures de photodiodes de la technologie PIC25G, peut-être expliqué par trois mécanismes :

- La présence d'une forte densité de défaut dans la zone de charge d'espace qui, en s'élargissant avec la tension appliquée, augmente la quantité de porteurs générés par ces défauts, entraînant ainsi une augmentation du courant
- La présence de courants parasites sur les bords du composant, potentiellement assistés par des défauts sur la périphérie de la diode
- La présence d'une forte composante de courant tunnel bande à bande. Le Ge ayant une bande interdite plus faible que Si, ce mécanisme est donc plus probable dans le Ge que le Si. Il est par ailleurs augmenté en cas de présence de pièges et de défauts dans le gap.

Enfin, à l'exception de la mesure d'un composant n'ayant pas la même caractéristique, les 9 autres mesures sont identiques et se superposent totalement, ce qui indique une faible dispersion des caractéristiques des composants.

Une série de mesure du courant photonique en fonction de la tension a été effectuée sur 11 photodiodes. Les résultats de cette série de mesure sont présentés sur la figure II.31.

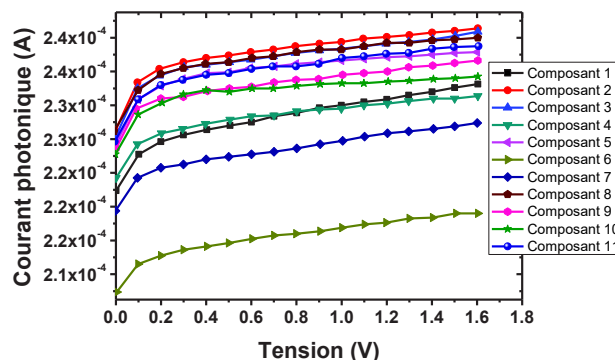


Figure II.31 : Courant photonique en fonction de la tension pour 11 photodiodes

Contrairement aux mesures de courant d'obscurité, on remarque que les caractéristiques de courant photoniques sont très dispersées pour les 11 composants mesurés. Du fait que les

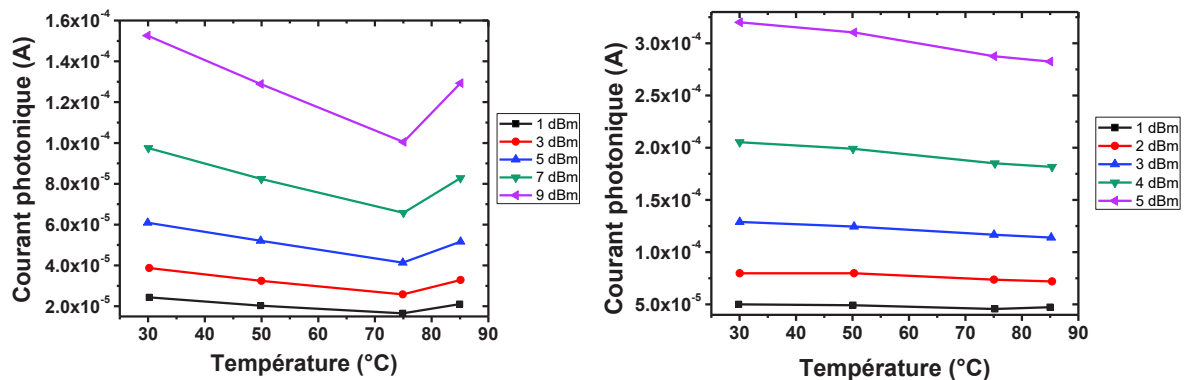
caractéristiques d'obscurité soient identiques, l'origine de cette dispersion est probablement attribuable à des pertes optiques différentes pour chacun des 11 composants. A ce stade de l'étude et en absence de structure de test dédiée à une étude sur un plus large échantillon de photodiodes, il n'est pas possible d'attribuer l'origine de cette dispersion à une variabilité des procédés technologiques lors de la fabrication des composants photoniques, ou bien à une variation issue de la chaîne de mesure. Enfin, les mesures de courants présentent également une composante linéaire forte alors qu'un courant photonique constant serait attendu pour une polarisation inverse. Les origines possibles de cette dépendance avec la tension sont identiques à celle proposées pour le courant d'obscurité.

IV.2.c. Comportement en température

Comme dans le cas de l'étude du photomodulateur, une étude en température du courant dans les photodiodes a été effectuée en amont de l'étude en contrainte sur les composants mis en boîtier. Dans cette étude, le courant a été mesuré à 4 températures : 30, 50, 75 et 85 °C. Par ailleurs, 5 consignes de puissance optique ont été utilisées, de 1 à 9 dBm. Ces mesures ont été enfin effectuées sur 3 photodétecteurs différents placés dans 3 boîtiers différents.

Le courant photonique des trois photodétecteurs mesurés est reproduit sur les 3 graphiques de la figure II.32. On constate que l'augmentation de puissance optique augmente le courant photonique pour toutes les photodiodes. Cependant, le comportement en température n'est pas reproductible et est erratique entre les différents composants testés. Aucune tendance commune n'est obtenue et l'exploitation de la variation en température du courant photonique est impossible.

Ces résultats sont très problématiques, et en accord avec la dispersion de mesure des courants photoniques entre composants obtenus sur la figure II.31. En effet, l'ensemble de ces résultats soulignent un potentiel défaut non envisagé sur l'ensemble constitué du banc de mesure et du boîtier de test, qui empêcherait une étude plus poussée de la dégradation du courant photonique. Il est donc nécessaire d'identifier l'origine de ce défaut afin de l'éliminer, ou de trouver une solution alternative permettant de le contourner.



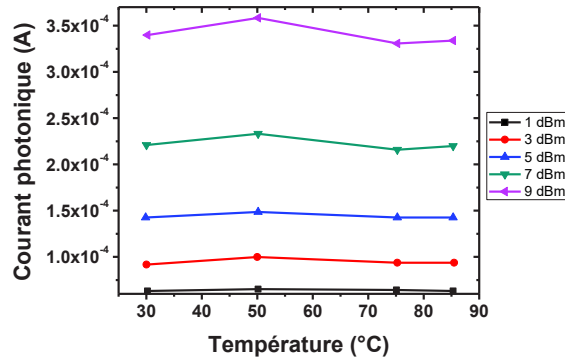


Figure II.32 : Courant photonique en fonction de la température pour 5 puissances de consignes du laser. Chacun des graphiques représente une photodiode

IV.2.d. Mesure sous contraintes

Des tests de dégradation ont été effectués sur les photodétecteurs malgré les suspicions vis-à-vis de l'ensemble constitué du banc et du boîtier de mesure. Ces résultats, en particulier les courants photoniques seront à considérer avec prudence.

Le courant d'obscurité et photonique ont été mesurés au cours d'un stress à 50°C et des tensions de stress de 8,5, 9 et 9,5 V pendant 10⁵ s. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure II.33 et II.34.

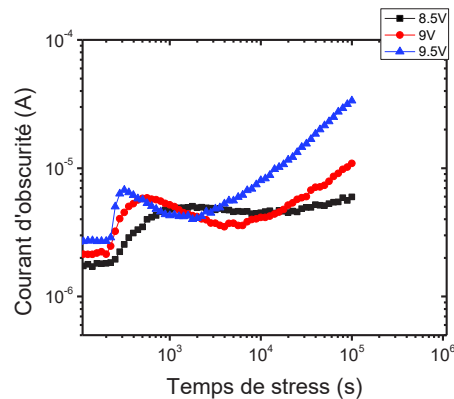


Figure II.33 : Courant d'obscurité en fonction du temps de stress pour 3 tensions différentes

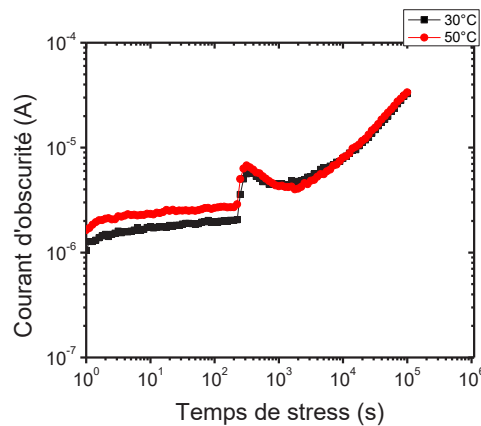


Figure II.34 : Courant d'obscurité en fonction du temps de stress pendant un stress de 9V à 30°C et 50°C

On constate tout d'abord que le courant d'obscurité présente une dégradation significative au cours du temps. Après 10^4 s, une augmentation exponentielle pouvant aller jusqu'à 1 décade est observée pour les trois tensions de stress. Cette pente ainsi que son apparition est accélérée par la tension mais ne semble pas être influencée par la température (figure II.34). La température semble surtout influencer la valeur initiale du courant d'obscurité, ce qui est attendu, du fait de la dépendance du courant de saturation d'une diode avec la température. Plus la température est élevée, plus la génération de porteurs minoritaires sera importante, ce qui a pour effet d'augmenter le courant de saturation. Enfin, une oscillation du courant est présente dans la première heure de contraintes. Celle-ci est réduite pour les températures les plus élevées. Ces résultats de dégradations sont les premiers confirmant la nécessité et la pertinence d'une étude approfondie de la fiabilité de ces composants et de l'origine de ces dérives de performances. Ils sont reproductibles et feront en partie l'objet du prochain chapitre de ce manuscrit de thèse.

Le courant photonique quant à lui présente une tendance décroissante quelle que soit la tension de stress appliquée. Cependant la dégradation en fonction de la tension est moins évidente à interpréter. Elle augmente entre 8,5 et 9 V et diminue entre 9 et 9,5V. Ces mesures inexploitablement physiquement sont néanmoins cohérentes avec les mesures précédentes et viennent confirmer l'hypothèse d'un défaut dans la chaîne de mesure optique.

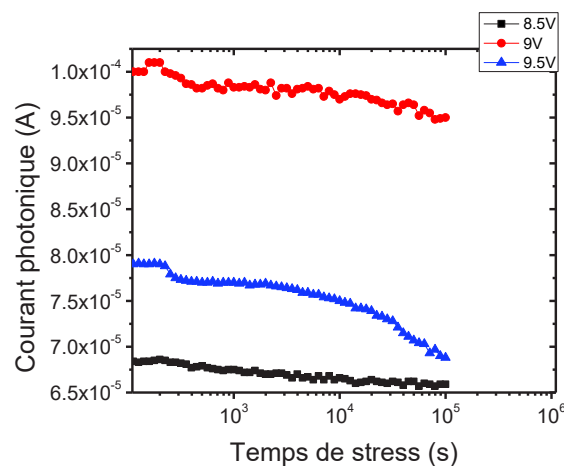


Figure II.35 : Courant photonique en fonction du temps de stress pour 3 tensions différentes

Afin de comprendre l'origine du défaut observé sur les mesures de courant photonique, une mesure sur un temps plus long a été effectuée avec la chaîne de mesure décrite sur la figure II.36.

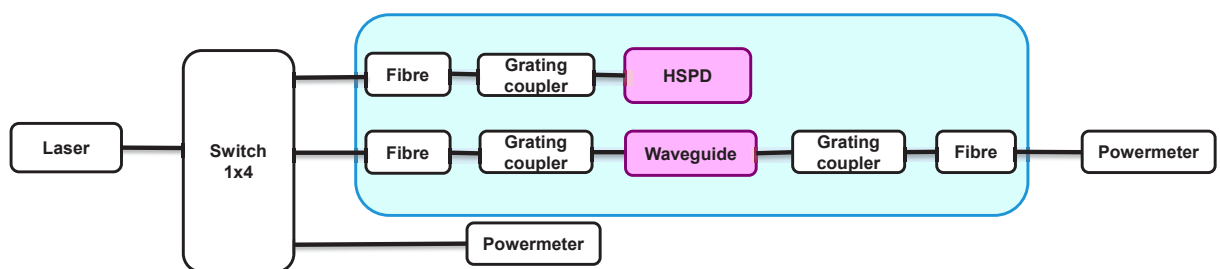


Figure II.36 : Schéma fonctionnel de la chaîne de mesure utilisée pour mesurer le courant photonique

La lumière du laser est séparée par un commutateur optique pour être dirigée sur trois chemins optiques différents. Le premier est identique aux mesures précédentes, et propage le signal vers la photodiode, dont la caractéristique courant-tension est mesurée par une SMU. Le deuxième chemin optique envoie la lumière dans un guide optique. La puissance optique est mesurée en sortie de ce guide (nécessairement accompagné de deux coupleurs) par un puissance-mètre. Du fait de la durée des mesures, une dérive de la puissance optique du laser est possible, et il est donc nécessaire de suivre en continu cette puissance délivrée. C'est le rôle du troisième chemin optique.

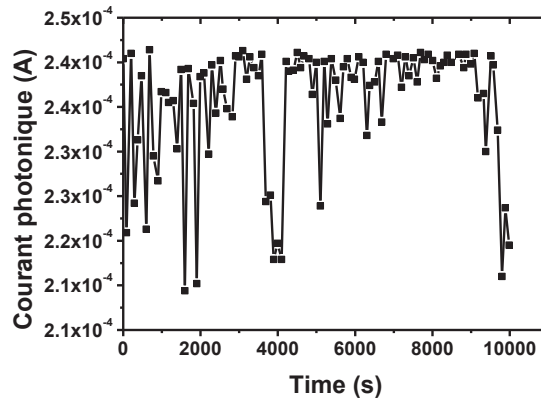


Figure II.37 : Courant photonique pendant 10^4 s à l'aide de la chaîne de mesure et de la structure de test décrites sur la figure II.36

On constate que la mesure du courant photonique est très bruitée et inadéquate pour une exploitation précise. Les deux puissances mesurées au cours de cette expérience sont tracées sur les figures II.38 et II.39. La première est la puissance mesurée directement par le puissance-mètre. On constate que celle-ci est quasiment constante, car ne variant que de 10^{-3} dBm sur 8,74 dBm de moyenne. La variation relative de la puissance du laser ne peut donc expliquer les 12,5 % de variation du courant photonique de la photodiode.

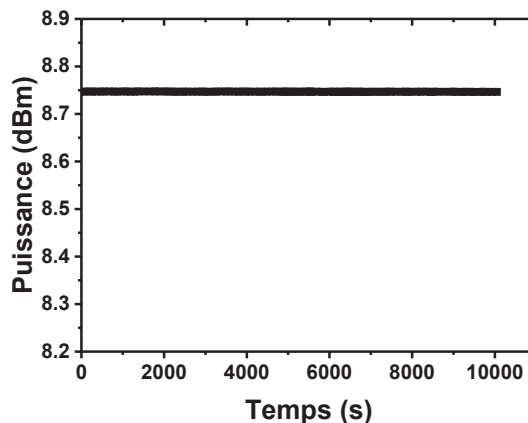


Figure II.38 : Puissance du laser pendant les 10^4 s de la mesure de la figure II.37

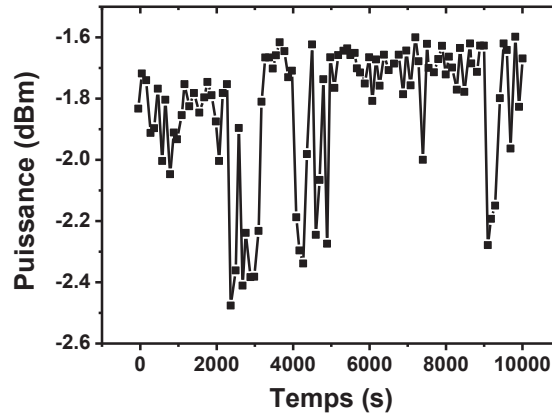


Figure II.39 : Puissance du laser mesurée à la sortie du guide d'onde pendant les 10^4 s de la mesure de la figure II.37

A contrario, la puissance mesurée en sortie du guide d'onde, comme indiqué sur la chaîne de mesure de la figure II.36, est, elle aussi, bruitée, mais de façon beaucoup plus importante. Un bruit de mesure de 0,6 dBm est obtenu, ce qui est une source plus probable des variations de courant photonique observé. Le problème se situe donc le long de la chaîne de mesure passant par le composant de test.

Ce nouveau résultat se rajoute aux interrogations qui ont déjà été soulignées lors de la mesure du courant photonique en fonction de la température. Il semble que cette mesure ne soit pas reproductible et qu'un élément de la chaîne de mesure du courant photonique soit défaillant.

IV.3. Rôle du boîtier

Les résultats non concluants obtenus sur les mesures de courant photonique nous ont donc poussé à étudier la structure du boîtier et les connectiques optiques. N'ayant à disposition qu'un schéma structurel et ne connaissant pas complètement la procédure de fabrication du boîtier, nous avons décidé d'ouvrir l'un d'eux, déjà testé. Nous l'avons donc noyé dans une cire protectrice puis nous l'avons poli jusqu'à pouvoir accéder à l'intérieur du boîtier dont la photographie est présentée sur la figure II.40.

On constate que la structure est conforme à celle du schéma de la figure II.4. Un V-groove amène des fibres optiques en contact avec la puce et ses coupleurs. Une connectique électrique sur la droite permet de mesurer le courant ou d'amener les signaux. Cependant, un point est à noter vis-à-vis des tests effectués précédemment : le V-groove amenant les fibres n'est fixé que par sa base. L'ensemble de celui-ci comme les fibres optiques ne sont pas solidarisés au boîtier pour prévenir le transfert des chocs mécaniques, en particulier de traction, sur les fibres de l'extérieur à l'intérieur du boîtier. Ceci expliquerait dans un premier temps la sensibilité des mesures aux perturbations environnementales du banc.

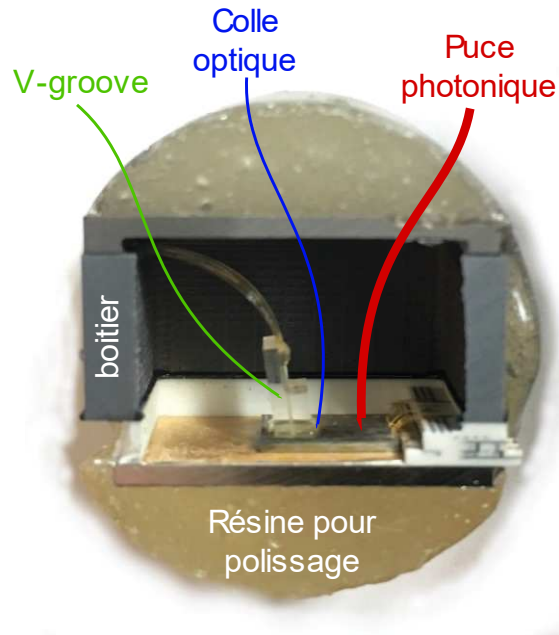


Figure II.40: Photographie de l'intérieur du boîtier de test montrant la puce photonique et les interconnexions électriques et optiques

L'assemblage mécanique de la connexion optique est donc mise en cause. Celui-ci n'est fixé que par une couche de colle optique, non homogène dans le cas du boîtier qui a été ouvert. Or, dans le cas de mesure de fiabilité, les variations en températures sont indispensables, comme illustré dans les parties précédentes. La dilatation thermique de cette colle, qui est inconnue, et son inhomogénéité peut donc être la source de variation de puissance optique non prévisible dans la puce en fonction de la température. En effet, un déplacement même de quelques fractions de microns des fibres aux regards des coupleurs peut entraîner des variations importantes de puissance. Dans ce cas, elles seraient dépendantes de la répartition de la colle et de la dilatation de celle-ci, qui n'est pas maîtrisée. Une étude complète de cet aspect aurait nécessité la compréhension des mécanismes de dilatation de la colle et des simulations mécaniques. Une telle étude sortait du cadre de ce travail, d'autant plus que les boîtiers incriminés ne sont pas les boîtiers utilisés en production par STMicroelectronics.

Dans ce contexte, il a donc été décidé de continuer les études de fiabilité sans le boîtier de test et donc de passer à des études sur gaufre ou sur puce découpée. De plus, cette partie a montré que seule la photodiode présentait de façon certaine des dégradations. Nous avons donc décidé de nous focaliser sur l'étude de ce composant.

V. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les résultats des travaux réalisés dans le cadre des études de fiabilité des photomodulateurs HSPM et photodiodes HSPD de la technologie PIC25G, encapsulés dans un boîtier photonique. La première partie de ces travaux a été consacrée à la quantification des incertitudes de mesure liées à l'utilisation des différents appareils de la chaîne de mesure, du banc dédié à cette étude. Elle a aussi permis de mettre en évidence les perturbations pouvant entraîner une instabilité de la puissance optique en sortie du boîtier photonique. Cette étude préliminaire a permis une meilleure interprétation des

mesures qui ont ensuite été effectuées. Le HSPM a été caractérisé par des mesures des pertes statiques et dynamiques mais aussi du déphasage en fonction de la tension et de la température. Ensuite les mesures de ces paramètres sous un stress en tension et en température ont montré que les performances du HSPM ne se dégradaient pas malgré un stress à 5V et 85°C sur des temps très longs (3×10^6 s). Cette robustesse serait peut-être liée à la physique intrinsèque du photomodulateur dont le fonctionnement est basé sur une déplétion d'une jonction PN. Sa dégradation nécessiterait des énergies supérieures à celles appliquées pendant le stress mais une limitation à 85°C de la température appliquée au boîtier nous empêche d'approfondir nos explorations. De même, les courants du HSPD ont été mesurés en fonction de la tension et à différentes températures. Les mesures du courant d'obscurité ont montré une variation importante en fonction de la tension qui indique une forte contribution de la conduction tunnel bande à bande sur ce paramètre. Le courant d'obscurité présente une caractéristique très stable et une faible dispersion entre composants. Ce n'est pas le cas du courant photonique dont la variabilité entre composants est très importante et dont la caractéristique en température présente des variations erratiques. Ceci a permis de mettre en évidence le rôle du boîtier sur l'instabilité de la puissance optique et des mesures optiques qui est dû à l'assemblage des connexions optiques réalisé par un V-groove collé de manière non homogène et uniquement sur la base, sur les coupleurs de la puce photonique. Les mesures du courant photonique sous stress réalisées par la suite sont de ce fait non interprétables. Les mesures du courant d'obscurité ont montré une dégradation importante de l'ordre d'une décade après 10^5 s. La suite des travaux présentés dans cette thèse sera donc dédiée à la photodiode HSPD et présentera les études faites sur plaque, afin d'approfondir les mécanismes en cause dans sa fiabilité.

**CHAPITRE 3 : MECANISMES DE
DEGRADATION DES PHOTODETECTEURS
GERMANIUM SUR SILICIUM**

I. Introduction

Les premiers tests effectués sur le photodétecteur encapsulé montrent une dégradation importante du courant d'obscurité. Ces tests n'ont pas été concluants sur les paramètres électro-optiques à cause des problèmes de précision liés aux mesures optiques ainsi que les problèmes de qualité du boîtier optique. Afin d'améliorer la précision des mesures et de fournir une interprétation plus fiable, une étude expérimentale sur gaufre a été effectuée. Les tests de dégradation accélérée ont été faits avec la station de test sous pointe opto-électrique du laboratoire LP2C du Leti. La disponibilité de cet instrument de test étant très limitée, pour optimiser nos études, la photodiode à homojonction présentant la dégradation la plus importante a d'abord été étudiée. Les résultats obtenus seront présentés dans ce chapitre. Pour expliquer ceux-ci, nous proposerons un modèle analytique des courants de la photodiode que nous validerons par des mesures d'énergie d'activation. La modélisation sera ensuite étendue à la fréquence de coupure de la photodiode et confrontée aux résultats des mesures effectuées à haute fréquence. Finalement, une comparaison entre une photodiode à homojonction et une photodiode à hétérojonction sera effectuée.

II. Géométrie du photodétecteur

La photodiode à homojonction dont l'architecture est décrite sur la Figure III.1, est constituée d'une zone active en germanium et est appelée **HSPD** (High Speed PhotoDiode). Le dispositif est fabriqué sur une gaufre de type SOI (Silicon On Insulator). Un dépôt d'oxyde au-dessus du silicium permet d'obtenir un bon confinement de la lumière dans la couche de silicium, nécessaire pour le guidage. Pour absorber la lumière, une cavité est creusée sur une partie du silicium où une épitaxie permet d'obtenir du germanium. Ce germanium est ensuite dopé pour réaliser une diode PIN. Le couplage entre la photodiode et le guide d'onde silicium se fait directement en bout (butt-coupling) et la lumière entre donc dans le dispositif parallèlement aux interfaces des couches dopées comme décrit dans la Figure III.1.a. Huit contacts métalliques installés le long de la couche, au-dessus des zones n et p permettent de collecter le courant. La concentration des différents dopages est donnée dans le Tableau III.1. Les zones n et p sont fortement dopées avec respectivement $6 \cdot 10^{18}$ atomes/cm³ et $3 \cdot 10^{19}$ atomes/cm³. La zone centrale malgré son appellation intrinsèque est légèrement dopée p avec un dopage de $3 \cdot 10^{16}$ cm⁻³. La photodiode fait 14 μm de long pour une largeur de 1,34 μm et une épaisseur de 0,35 μm . La zone intrinsèque s'étend sur 0,7 μm et les zones dopées font 0,32 μm de large chacune.

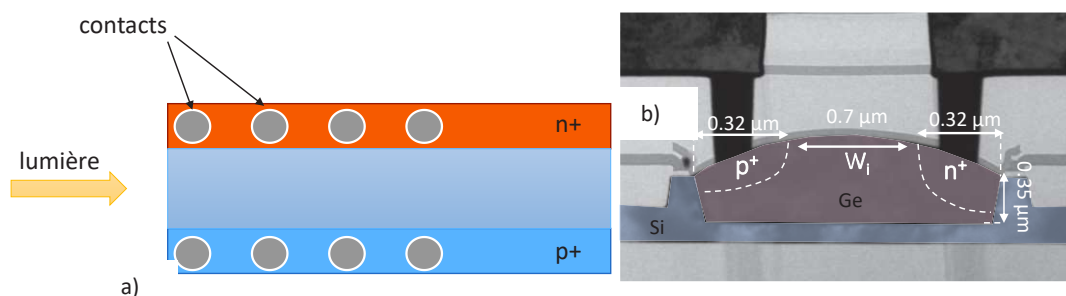


Figure III.1: architecture de la photodiode à homojonction montrant les matériaux, les différentes dimensions caractéristiques ainsi que les zones dopées : a. vue de dessus, b. vue transverse

	P+	N+	P-	Ge intrinsèque
Dopage (cm ⁻³)	3.10 ¹⁹	6.10 ¹⁸	3.10 ¹⁶	2.10 ¹³

Tableau III.1: Concentrations des dopages des différentes zones p, i, n ainsi que du Germanium intrinsèque

III. Etude de la fiabilité sur gaufre

Un test de dégradation accélérée est effectué sur la photodiode à homojonction. La structure de test ainsi que l'instrumentation utilisée sont présentées ci-dessous. La tension normale de fonctionnement est de -1,6 V. La photodiode est utilisée à la longueur d'onde de 1310 nm.

III.1. Structure de test

La structure utilisée pour les tests de fiabilité est décrite sur la figure III.2. Elle est constituée de la photodiode ainsi que des « pads optiques » (les réseaux de couplage) et des « pads » électriques (des contacts métalliques) permettant d'y accéder. Les pads électriques sont désignés par N+ et P+ et représentent respectivement la cathode et l'anode. Le contact N+ est dédoublé pour adapter la structure à des tests haute fréquence utilisant des sondes coplanaires. La photodiode se trouve en dessous du contact P et un coupleur à réseau suivi d'un guide d'onde optique permet d'y envoyer un signal optique. Le coupleur à réseau est désigné par O₁ sur la Figure III.2. Une partie du signal optique envoyé à la photodiode est transmise à un autre coupleur à réseau (O₂) grâce à des diviseurs optiques placés sur le chemin optique.

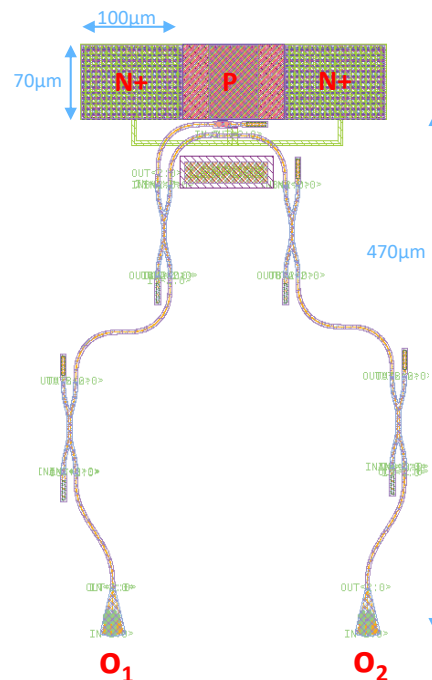


Figure III.2: Description de la structure de test composée de la photodiode et des pads électriques et optiques

III.2. Instrumentation

Le banc de test est composé d'une station sous pointe reliée à différents équipements électriques et optiques, le tout est piloté par un ordinateur. L'instrumentation utilisée est décrite sur la Figure III.3. Elle est composée d'une unité de source et mesure appelé SMU (Source/Measurement Unit) qui permet d'envoyer ou de recevoir un signal électrique (tension ou courant). Cette unité est reliée à l'anode et la cathode de la photodiode par une sonde RF GSG (Ground Signal Ground). L'entrée optique O_1 est reliée à un laser via un modulateur optique. Lorsque le modulateur n'est pas activé, une puissance continue du laser est injectée à la photodiode et permet de mesurer sa réponse statique. Si le modulateur est piloté par une source haute fréquence, la puissance optique modulée en amplitude envoyée à la photodiode permet de mesurer la réponse fréquentielle de celle-ci. Le photocourant généré est alors dirigé par les sondes RF vers un analyseur de réseau vectoriel (VNA) qui permet l'extraction des paramètres haute fréquence (paramètres S). L'ensemble VNA, source RF et modulateur est constitué par un seul équipement appelé LCA (Lightwave Component Analyzer). La séparation entre les signaux continus et haute fréquence est faite par un T polarisé. Enfin, un puissance mètre optique (powermeter) relié à la sortie optique O_2 permet de mesurer une partie du signal optique reçu par la photodiode. Cette mesure permet de surveiller les variations du signal optique reçu par la photodiode qui peuvent avoir un impact sur le photocourant.

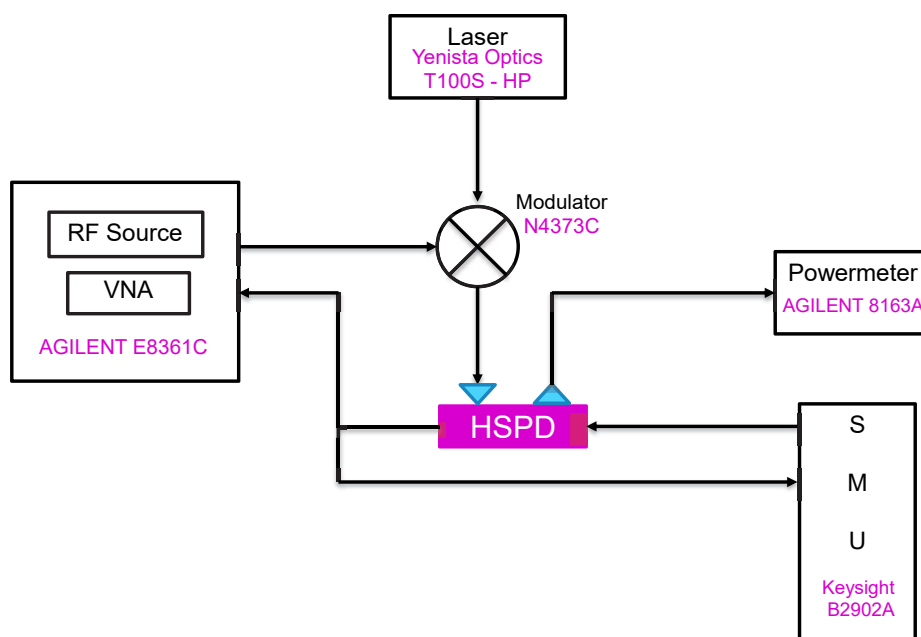


Figure III.3: instrumentation utilisée pour réaliser les tests de fiabilité sur wafer

III.3. Protocole expérimental

Le protocole expérimental permettant la réalisation de ce test ainsi que la mesure des paramètres est décrit dans la Figure III.4. Il comprend une étape de stress et une étape de caractérisation.

Le test commence par une caractérisation. Pendant cette étape, différentes mesures sont effectuées :

- Etape C1 : le courant d'obscurité est mesuré avec une tension appliquée de -3,2 V à 0 V.
- Etape C2 : le laser est allumé et délivre une puissance de 3dBm (2mW) à une longueur d'onde de 1310 nm. Le courant photonique est mesuré avec une tension appliquée sur la photodiode allant de -3,2 V à 0 V. Ensuite, une mesure de la puissance optique de sortie est effectuée par le puissance-mètre.
- Etape C3 : La photodiode est polarisée à -1.6 V. Le signal du laser est modulé avec le *LCA* de manière à avoir une valeur moyenne de 3 dBm en sortie. Ce signal est envoyé à la photodiode. Un traitement des signaux par le *VNA* permet ensuite une extraction des paramètres S. Ce qui permet de calculer la fréquence de coupure de la photodiode.

Ces étapes de caractérisation sont suivies par un stress. Pendant le stress, une tension de -9 V est appliquée, à température ambiante pendant un temps t . Le stress s'arrête ensuite pour une étape de caractérisation. Le stress reprend après la caractérisation et ces étapes se reproduisent jusqu'à la fin du temps de stress. Une dernière caractérisation est effectuée à la fin du stress. La durée totale du stress est de 10^6 s. Comme indiqué sur la Figure III.4, cette durée n'inclut pas le temps de caractérisation. Le nombre total de caractérisation au cours du stress est de 40.

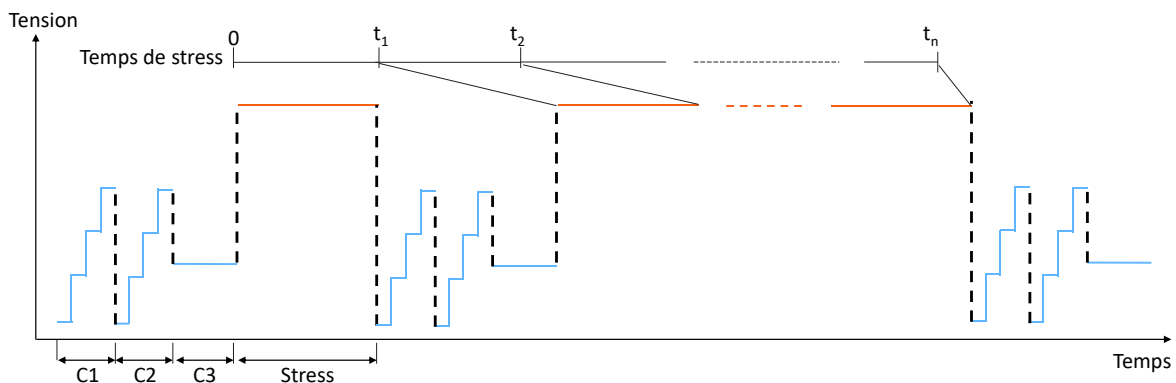


Figure III.4: Protocole expérimental utilisé pour le test de fiabilité montrant les différentes étapes de stress et de caractérisation

III.4. Résultats

III.4.a. Dégradation des courants d'obscurité et photonique

Une mesure du courant d'obscurité à la tension normale de fonctionnement -1,6 V a permis d'obtenir la courbe représentée sur la Figure III.5. Elle représente l'évolution du courant d'obscurité I_{dark} au cours du stress. On y voit une augmentation du courant très importante de deux décades entre le début et la fin du stress. On note cependant deux comportements différents. Le premier apparaît au début des étapes de stress. Il est caractérisé par une augmentation d'environ une décade du courant d'obscurité suivie d'une décroissance. Le deuxième se manifeste aux alentours de 10.000 s et est caractérisé par une augmentation très significative de I_{dark} .

Le courant photonique représenté sur la Figure III.6 a aussi été mesuré à -1.6 V. Une décroissance générale est observée. Cependant comme le montre la mesure de la puissance optique représentée sur la même figure, la puissance optique n'est pas constante contrairement à ce qu'on pourrait s'attendre. Ces variations ont un impact sur le courant photonique. Comme on peut le voir sur cette figure, la mesure du courant photonique ne représente pas uniquement la dégradation de ce paramètre mais est très fortement influencée par les variations de la puissance optique. Pour extraire uniquement la variation de ce paramètre électro-optique, un calcul de la responsivité est nécessaire.

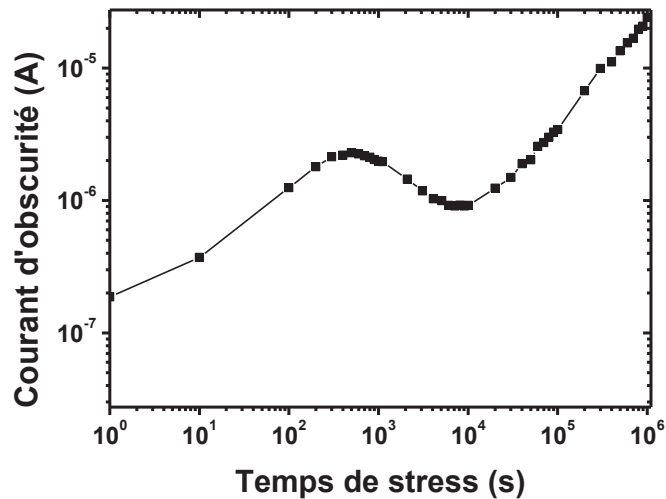


Figure III.5: Evolution du courant d'obscurité au cours du stress montrant une première oscillation suivie d'une augmentation très importante

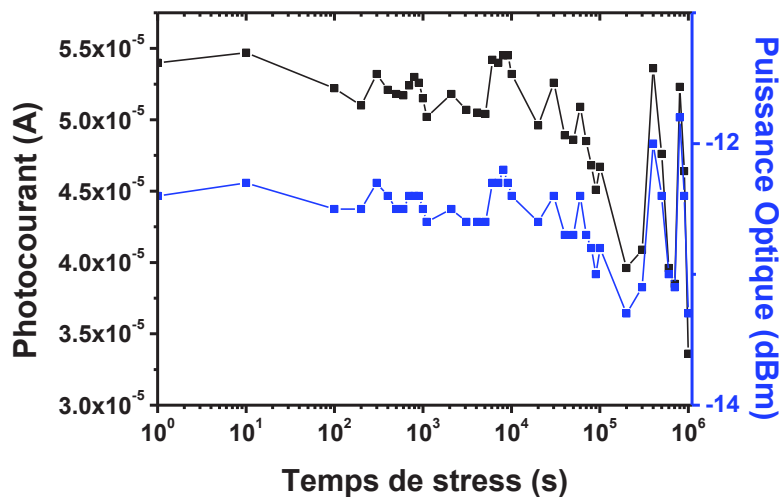


Figure III.6: évolution du courant photonique et de la puissance optique pendant le stress montrant une similarité entre ces deux mesures

III.4.b. Dégradation de la responsivité

La responsivité est calculée suivant l'équation (III.1). I_{phot} est le courant mesuré et P_{opt} (en mW) est la puissance optique reçue par la photodiode. Cette puissance est calculée en utilisant la relation (III.2). P_{out} est la puissance mesurée en O₂ et les pertes sont celles du chemin optique entre la photodiode et le coupleur à réseau et sont estimées à 8,8 dB.

$$R = \frac{I_{phot}}{P_{opt}} \quad (III.1)$$

$$P_{opt}(dBm) = P_{out}(dBm) + pertes \quad (III.2)$$

Le calcul de la responsivité permet de s'affranchir des variations dues à la puissance optique et de garder uniquement la dégradation intrinsèque du composant. Ce paramètre dépend uniquement des propriétés intrinsèques du matériau, comme l'indique sa formule donnée en (I.15). Les résultats de ce calcul sont ensuite représentés dans la Figure III.7 en fonction du temps de stress. La courbe ainsi obtenue est plus cohérente et montre une diminution de la responsivité au cours du stress. On note également que la décroissance observée commence aux alentours de 10.000 s, tout comme l'augmentation du courant d'obscurité pendant sa deuxième phase de dégradation.

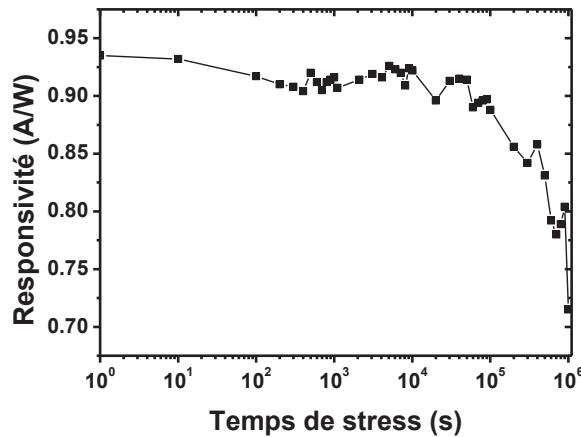


Figure III.7: évolution de la responsivité au cours du stress

III.4.c. Dégradation de la fréquence de coupure

La fréquence de coupure calculée à partir des mesures de paramètres S est représentée sur la Figure III.8 en fonction du temps de stress. On note une décroissance générale malgré quelques fluctuations. La dégradation observée en fin de stress est significative puisque la fréquence de coupure passe de 10GHz à 2 GHz soit une décroissance de 80%.

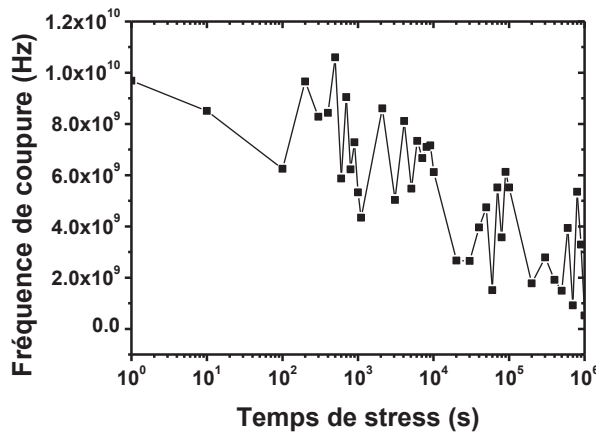


Figure III.8: Fréquence de coupure mesurée au cours du stress

Ce test, en plus de confirmer la dégradation du courant d'obscurité, permet de mettre en évidence la dégradation de plusieurs figures de mérite de la photodiode à homojonction Ge comme la responsivité et la bande passante. La précision de la mesure de la responsivité est améliorée grâce à la mesure de la puissance optique. La fréquence de coupure présente une décroissance significative en fin de stress. La confirmation de cette dégradation nécessite une mesure supplémentaire. Pour comprendre l'origine de ces dégradations, la partie suivante présente l'étude et la modélisation des mécanismes de conduction dans une photodiode PIN.

IV. Modélisation analytique et physique

Afin de fournir un modèle précis, il est important de comprendre les phénomènes physiques entrant en jeu lors du fonctionnement de la photodiode. C'est pourquoi, les mécanismes entraînant la génération de courant sont présentés dans cette partie.

IV.1. Mécanismes de conduction dans une photodiode PIN

Comme évoqué précédemment, le courant dans une photodiode sous illumination est la somme d'un courant d'obscurité et d'un courant photonique. Le courant d'obscurité est modélisé conventionnellement par la diffusion des porteurs en bords de ZCE. Cependant, en présence de génération/recombinaisons assisté par les défauts (Shockley-Read-Hall), une contribution en provenance majoritaire de la ZCE s'ajoute au courant conventionnel. Le courant photonique comprend quant à lui une composante de dérive pour les porteurs générés dans la ZCE et de diffusion pour ceux générés en dehors. Dans certaines conditions, d'autres contributions comme la conduction tunnel ou l'ionisation par impact peuvent cependant s'y ajouter.

IV.1.a. Courant de dérive

Le courant de dérive dans une photodiode est dû à une génération de porteurs dans la ZCE. Les porteurs séparés par le champ électrique, sont envoyés vers les contacts où ils sont collectés. Ce courant peut avoir deux origines selon que la photodiode est éclairée ou non.

Lorsque la puissance optique est nulle, la photodiode se comporte comme une diode. Le courant de dérive a alors comme origine la génération thermique de porteurs minoritaires. Cette génération est due à la présence de défauts dans la structure introduisant des niveaux d'énergie dans le gap. La Figure III.9 illustre ce phénomène. Un niveau d'énergie E_t introduit entre la bande de valence et la bande de conduction permet à un électron excité thermiquement de transiter vers la bande de conduction avec une énergie inférieure à celle du gap.

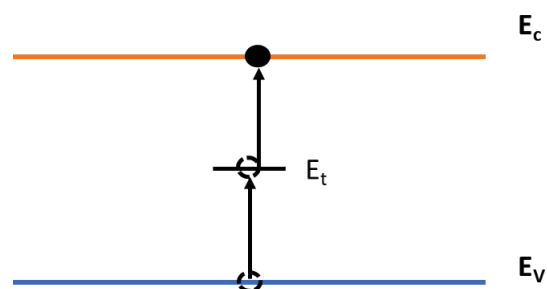


Figure III.9: illustration de la génération thermique dans la ZCE

Lorsque la puissance optique est non nulle, les photons absorbés permettent aux électrons de gagner de l'énergie et de transiter dans la bande de conduction. Ce phénomène appelé photogénération a été présenté dans la partie III.4.a du premier chapitre.

IV.1.b. Courant de diffusion

Les porteurs créés par génération thermique ou optique hors de la ZCE sont à l'origine du courant de diffusion. A cause de la polarisation inverse du dispositif, les porteurs sont attirés vers les zones où ils sont majoritaires et diffusent vers les celles-ci. Arrivés dans la ZCE, ils sont envoyés par le champ électrique vers les contacts. Pour que les porteurs puissent diffuser jusqu'à la zone de charge d'espace sans se recombiner, la longueur de diffusion dont l'expression est donnée en (III.3) doit être supérieure à la distance entre la zone de création des porteurs et le bord de la zone de charge d'espace.

$$L_{D_{n,p}} = \sqrt{\tau \cdot D_{n,p}} \quad (III.3)$$

Avec

$$D_{n,p} = \frac{k_B T \mu_{n,p}}{q} \quad (III.4)$$

τ est la durée de vie effective des porteurs. $D_{n,p}$ est la constante de diffusion des électrons ou des trous, son expression est donnée en (III.4), k_B est la constante de Boltzmann, T la température et $\mu_{n,p}$ est la mobilité des électrons ou des trous.

IV.1.c. Le courant de conduction par effet tunnel

Dans les semi-conducteurs à faible gap, lorsque le champ électrique devient important, les bandes de valence et de conduction se déforment et les porteurs peuvent transiter de la bande de valence vers la bande de conduction. On parle de conduction tunnel bande à bande. La conduction tunnel peut aussi être assistée par des pièges. On parle alors de conduction tunnel assistée par piège.

IV.2. Modélisation des courants

Afin d'étudier le fonctionnement de la photodiode pour comprendre l'origine des dégradations observées, un modèle analytique et physique basé sur l'étude précédente a été développé sur Matlab. La géométrie utilisée est présentée dans la Figure III.10. On considère une structure rectangulaire constituée de germanium sur une couche de silicium. Les dimensions et les dopages sont les mêmes que ceux présentés dans la partie II de ce chapitre.

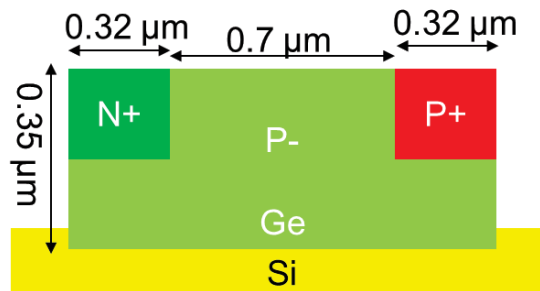


Figure III.10: Schéma de la section transversale de la géométrie de la photodiode utilisée pour le modèle

On considère uniquement les courants de dérive et de diffusion. Nous verrons par la suite que la prise en compte de contribution de type tunnel n'est pas nécessaire à cette étude.

IV.2.a. Modèle de dérive

- **Photodiode sous obscurité**

Le modèle de dérive du courant d'obscurité est basé sur la théorie de Shockley-Read-Hall (SRH). Dû à la présence d'impuretés, la ZCE dans une diode est le siège de mécanismes de génération et de recombinaison de porteurs. Ces défauts peuvent constituer un centre de recombinaison ou un piège à électron. L'étude de ces phénomènes a mené au calcul du taux de recombinaison r . Sa formule dans le modèle SRH [33] est donnée dans l'équation (III.5). Lorsque la polarisation est positive, r est positif : il y a recombinaison de porteurs dans la zone de charge d'espace. Lorsque la polarisation est inverse, r est négatif et il y a génération thermique dans la zone de charge d'espace.

$$r = \frac{1}{\tau} \frac{n_i^2 \left(e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right)}{2n_i + p + n} \quad (\text{III.5})$$

Où n_i est la concentration des porteurs intrinsèques, p la concentration des trous, n celle des électrons. V est la tension de polarisation, q la charge élémentaire, k_B la constante de Boltzmann et T la température. τ est la durée de vie effective des porteurs minoritaires.

Lorsque la polarisation est inverse, comme dans notre cas, les concentrations de porteurs n et p deviennent négligeables devant n_i . L'expression de r se simplifie et devient :

$$r = -\frac{n_i}{2\tau} \quad (\text{III.6})$$

Le courant de génération thermique s'écrit alors :

$$I_{drift}^{dark} = -\frac{qn_i}{2\tau} W_{ZCE} S_1 \quad (\text{III.7})$$

W_{ZCE} est la largeur de la ZCE et S_1 est la section traversée par le flux sortant du courant et sa formule est donnée en (III.8)

$$S_1 = t_{Ge} L \quad (\text{III.8})$$

t_{Ge} est l'épaisseur de la photodiode et L sa longueur.

- **Photodiode éclairée**

Lorsque la puissance optique est non nulle, le courant de dérive est fonction de la constante de génération optique G_{opt} . Sa formule donnée dans [34] s'écrit suivant l'équation (III.9) :

$$I_{drift}^{phot} = -qW_{ZCE} G_{opt} S_1 \quad (\text{III.9})$$

Avec

$$G_{opt} = \frac{\alpha P_{opt}}{h\nu S_2} \quad (\text{III.10})$$

α est le coefficient d'absorption du germanium à 1310 nm, P_{opt} la puissance optique absorbée, $h\nu$ l'énergie du photon et S_2 la section illuminée dont la formule est la suivante :

$$S_2 = W t_{Ge} \quad (\text{III.11})$$

W est la largeur de la photodiode.

IV.2.b. Modèle de diffusion

Le calcul du courant de diffusion est basé sur le modèle physique de la photodiode p-i-n fait par Afzalian et Flandre [35]. Ce calcul requiert la résolution de l'équation de continuité dans un semi-conducteur (III.12).

$$\frac{1}{q} \operatorname{div} (J_n) + G_{opt}(x, y) - \frac{\Delta n(x, y)}{\tau_n} = 0 \quad (\text{III.12})$$

Dans une approche unidimensionnelle, en tenant compte uniquement du courant de diffusion, on obtient l'équation suivante pour les électrons :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D_n \frac{\partial \Delta n}{\partial x} \right) = \frac{\Delta n(x)}{\tau} - G_{opt} \quad (\text{III.13})$$

Δn est la concentration des électrons, τ la durée de vie effective des porteurs.

En effet, la recombinaison ainsi que la densité de courant dans le volume ont été négligés dans cette équation.

Cette équation inclut également la durée de vie effective, qui est une fonction de la durée de vie intrinsèque des porteurs ainsi que des vitesses de recombinaison en surface. Son expression est la suivante :

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_i} + \frac{s_0 + s_t}{t_{Ge}} \quad (\text{III.14})$$

τ_i est la durée de vie intrinsèque des porteurs. t_{Ge} est l'épaisseur de la photodiode, s_0 et s_t les vitesses de recombinaison sur les interfaces entre le germanium et l'oxyde et entre le germanium et le silicium respectivement.

Afin de résoudre cette équation et calculer le courant de diffusion, la géométrie ainsi que le repère utilisé sont présentés dans la Figure III.11. L'origine est prise au niveau de la zone p⁺. L'équation de continuité est résolue uniquement dans les zones non déplétées, p⁺ pour les électrons et n⁺ pour les trous, les courants de diffusion étant générés dans ces parties de la photodiode.

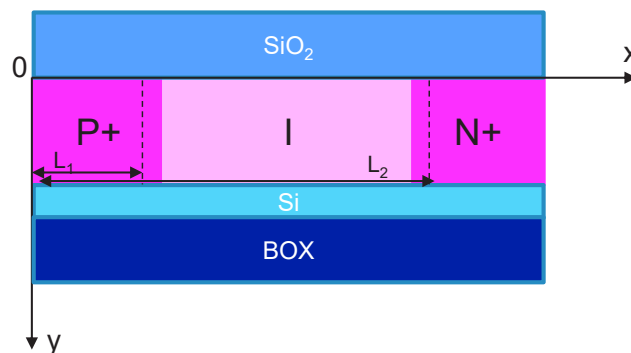


Figure III.11: Géométrie de la photodiode pour le calcul du courant de diffusion

La résolution de cette équation différentielle du second ordre nécessite des conditions aux limites. Les hypothèses qui ont été faites sont les suivantes :

A $x=0$, on suppose un contact avec le métal. D'où :

$$\frac{\partial \Delta n}{\partial x} = 0 \quad (\text{III.15})$$

A $x=L_1$, L_1 étant la largeur de la zone non déplétée dans la zone p^+ , la condition aux limites appliquée est celle de Maxwell-Boltzmann.

$$\Delta n(x) = \frac{n_i^2}{N_a} \left(e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) \quad (\text{III.16})$$

La résolution de l'équation avec les hypothèses citées précédemment permet d'obtenir l'équation suivante pour la concentration totale des électrons (générés thermiquement et photogénérés) dans la zone p^+ .

$$n_{light}(x) = B_i \cosh\left(\frac{x}{L_{Dn}}\right) + \frac{n_i^2}{N_a} + G_{opt}\tau \quad (\text{III.17})$$

Avec :

$$B_i = \frac{\frac{n_i^2}{N_a} \left(e^{\left(\frac{qV}{k_B T}\right)} - 1 \right) - G_{opt}\tau}{\cosh\left(\frac{L_1}{L_{Dn}}\right)} \quad (\text{III.18})$$

N_a est la concentration des accepteurs.

La densité de courant de diffusion correspondante s'obtient avec l'équation suivante :

$$J_n = qD_n \frac{\partial \Delta n}{\partial x} \quad (\text{III.19})$$

D'où :

$$J_n^{light} = q \frac{D_n}{L_{Dn}} B_i \sinh\left(\frac{x}{L_{Dn}}\right) \quad (\text{III.20})$$

On obtient ainsi le courant de diffusion total (d'obscurité et photonique) pour les électrons en multipliant l'équation (III.20) par la section longitudinale S_1 .

$$I_n^{light} = q \frac{D_n}{L_{Dn}} B_i \sinh\left(\frac{x}{L_{Dn}}\right) S_1 \quad (\text{III.21})$$

L'expression de la concentration des trous générés s'obtient en résolvant l'équation (III.12) dans la zone n^+ . En suivant la même démarche, la solution obtenue pour le courant de diffusion des trous est donnée par l'équation (III.22).

$$I_p^{light} = q \frac{D_n}{L_{Dn}} B_i \left(e^{-2\frac{L}{L_{Dn}}} e^{\frac{x}{L_{Dn}}} - e^{-\frac{x}{L_{Dn}}} \right) S_1 \quad (\text{III.22})$$

Avec :

$$B_i = \frac{\frac{n_i^2}{N_a} \left(e^{\left(\frac{qV}{k_B T} \right)} - 1 \right) - G_{opt} \tau}{e^{-\frac{L_2}{L_{Dn}} + \frac{1}{e^{L_{Dn}} (L_2 - 2L)}}} \quad (\text{III.23})$$

L est la largeur totale du dispositif, $L_2 = L_1 + W_{ZCE}$.

Le courant d'obscurité s'obtient à partir de cette équation en annulant la constante optique G_{opt} . Le courant photonique correspond à la différence entre le courant total et le courant d'obscurité.

Le modèle ainsi obtenu servira dans un premier temps à étudier analytiquement le comportement de la photodiode afin de comprendre l'influence des paramètres géométriques et physiques dans la conduction de la photodiode. Il sera ensuite confronté aux résultats expérimentaux. Ceci permettra une meilleure interprétation des mesures et éventuellement de comprendre l'origine de la dégradation.

V. Exploitation du modèle et comparaison avec les résultats expérimentaux

V.1. Résultats du modèle

- Courant d'obscurité de diffusion

L'équation (III.17) permet de représenter dans la Figure III.12 la variation de la concentration des électrons et des trous générés sous obscurité dans les zones dopées en fonction de la distance x . Pour les électrons comme pour les trous, la concentration des porteurs est à sa valeur maximale aux extrémités des zones dopées et diminue lorsqu'on se rapproche de la zone de charge d'espace pour atteindre le minimum aux bords de cette zone. En effet, les porteurs présents aux alentours de la zone de charge d'espace et à une distance inférieure à la longueur de diffusion vont diffuser vers celle-ci où ils sont transportés par le champ électrique, tandis que les porteurs minoritaires qui sont générés hors de la zone de diffusion auront plus tendance à diffuser aléatoirement, augmentant ainsi leur probabilité de recombinaison, éliminant ainsi leur contribution au courant total.

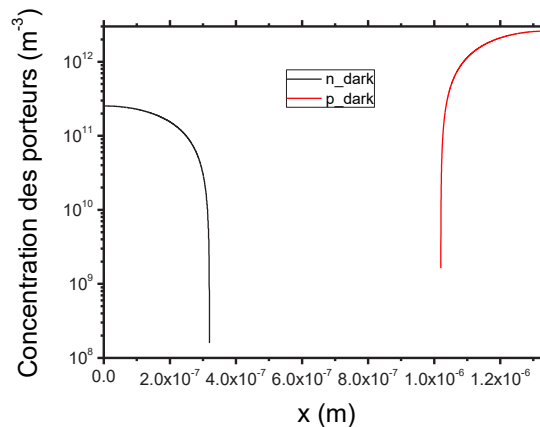


Figure III.12: Concentration des porteurs générés thermiquement dans les zones dopées. Les électrons sont générés dans la zone $p+$ et les trous dans la zone $n+$

Les porteurs qui rejoignent la zone de charge d'espace sont à l'origine des courants de diffusion représentés dans la Figure III.13. Le courant de diffusion est nul à 0V et augmente dès que la tension inverse est supérieure à la constante $\frac{q}{k_B T}$. Par la suite, il ne varie plus avec la tension. En effet, l'augmentation du courant de diffusion dépend principalement de l'augmentation de la longueur de diffusion, or la tension n'a aucun effet sur celle-ci.

On note aussi que le courant des trous est supérieur à celui des électrons. Ceci est dû à la concentration des donneurs plus faible que celle des accepteurs dans les zones dopées.

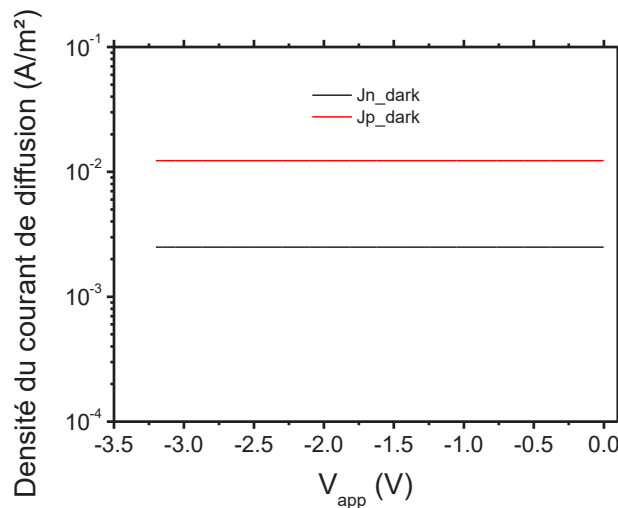


Figure III.13: Densité du courant de diffusion des électrons et des trous générés dans le noir

- **Courant photonique de diffusion**

Les concentrations des porteurs photogénérés représentées dans la Figure III.14 présentent la même évolution que celles des porteurs générés dans le noir. La diffusion des porteurs est la même dans une photodiode dans le noir et illuminée. Cependant, la concentration des porteurs est plus importante. Ceci est dû à une génération plus importante due à l'absorption de photons.

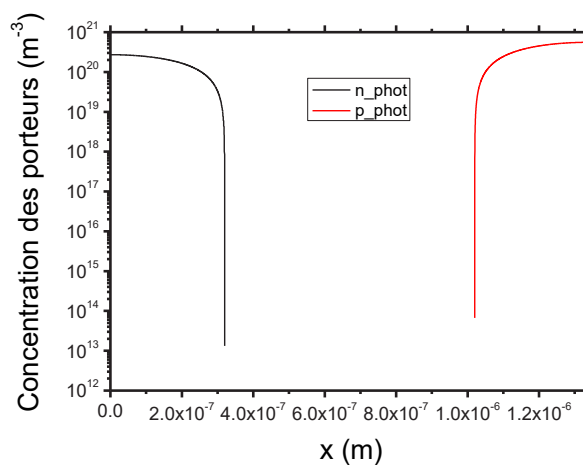


Figure III.14: Concentration des électrons et des trous photogénérés dans les zones dopées

Les courants photoniques correspondants sont représentés sur la Figure III.15. On note aussi qu'ils sont indépendants de la tension pour la même raison que pour le courant

d'obscurité. La légère différence entre le courant des trous et celui des électrons vient du fait que la longueur de diffusion des trous est légèrement plus faible que celle des électrons.

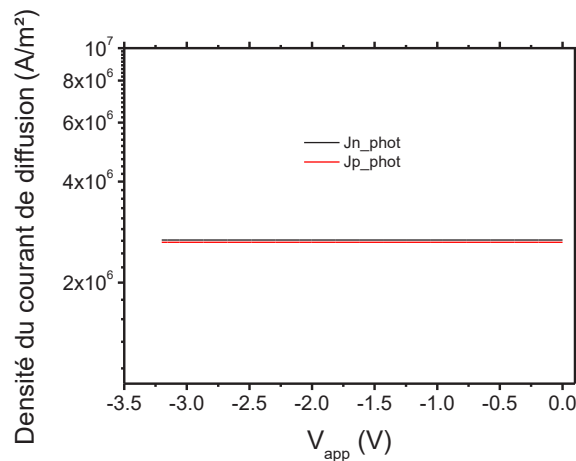


Figure III.15: Courants de diffusion photonique des électrons et des trous

- **Courant d'obscurité total**

Le courant de dérive sous obscurité est calculé suivant l'expression (III.7). Sa variation en fonction de la tension est représentée sur la Figure III.16. Le courant de dérive ne dépend pas de la tension appliquée. A cause des fortes concentrations de dopants, la zone de charge d'espace s'étend principalement sur la zone intrinsèque et très faiblement sur les zones dopées. De plus, sa variation avec la tension est négligeable. La largeur de la zone de charge d'espace W_{ZCE} étant quasiment constante avec la tension, la variation du courant de dérive avec la tension devient négligeable. La Figure III.16 représente aussi le courant de diffusion total dans le noir en fonction de la tension. Ce courant est calculé en faisant la somme entre le courant d'électrons et le courant de trous dont les expressions sont données en (III.21) et (III.22). Ces courants sont calculés aux bords de la zone de charge d'espace, c'est-à-dire en $x = L_1$ pour le courant d'électrons et $x=L_2$ pour le courant de trous. On remarque que le courant de dérive est fortement supérieur au courant de diffusion. Ceci confirme que le courant de saturation des diodes est en général principalement constitué de courant de génération SRH dans la zone de charge espace, tandis que le courant de diffusion des porteurs minoritaires reste négligeable. L'inverse ne se produit que pour les composants dont les taux de défauts sont extrêmement faibles.

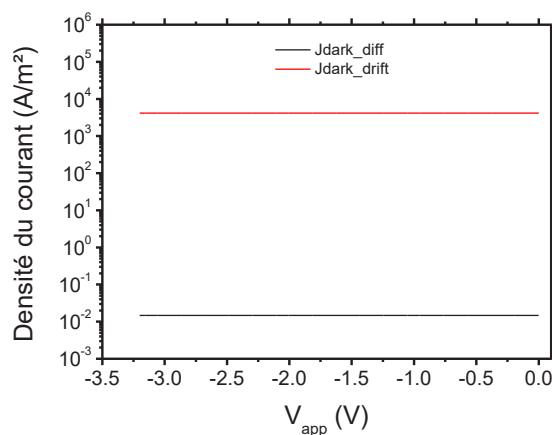


Figure III.16: Courants d'obscurité de diffusion et de dérive en fonction de la tension appliquée

- **Courant photonique total**

Comme pour le courant d'obscurité, le courant photonique de diffusion est constitué des courants d'électrons et des trous dans les zones dopées. La figure suivante représente les courants de dérive ainsi que de diffusion en fonction de la tension appliquée. De même, le courant de dérive photonique ne dépend pas de la tension à cause de la zone de déplétion maintenue constante par les concentrations de dopants élevées. Contrairement au courant d'obscurité, le courant de diffusion photonique est légèrement plus faible que le courant de dérive photonique. La génération optique dont dépendent ces deux contributions est considérée comme étant la même dans toute la photodiode. La dérive n'est dans ce cas pas favorisée par rapport à la diffusion. La légère différence entre ces deux contributions est due à la présence du champ électrique dans la zone de charge d'espace qui empêche toute recombinaison et permet une collecte rapide de tous les porteurs générés, contrairement aux zones dopées où tous les porteurs ne sont pas collectés.

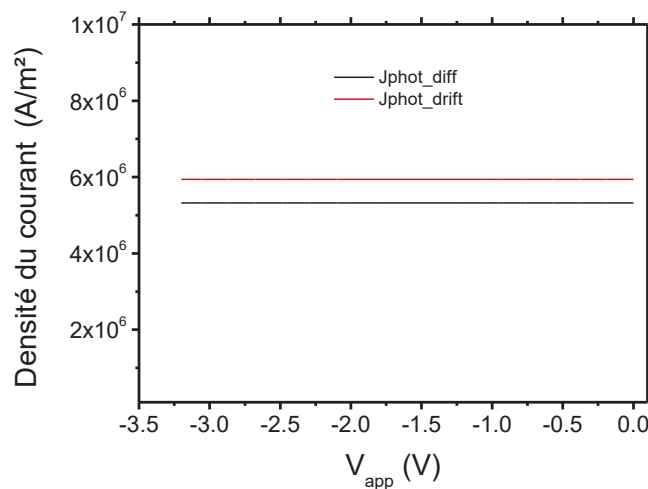


Figure III.17: Courants de diffusion et de dérive photonique en fonction de la tension appliquée

Si la présence d'une zone intrinsèque dans la photodiode permet un meilleur contrôle de la zone de charge d'espace afin d'améliorer la génération d'un courant de dérive, elle ne permet pas de limiter la génération d'un courant de diffusion. Nous verrons dans la suite quel est l'influence des paramètres de modélisation sur les différentes contributions de courant.

Nous avons vu précédemment que le courant de diffusion est indépendant de la tension appliquée à partir d'une certaine valeur (<1 mV), le courant de dérive ne dépend pas non plus de la tension. Les autres paramètres susceptibles de varier dans le temps sont la largeur de la zone de charge d'espace ainsi que la durée de vie effective des porteurs minoritaires. L'impact de ces deux paramètres dans la conduction de la photodiode doit donc être étudié.

V.2. Estimation du rapport entre les différentes contributions de courant

V.2.a. Influence de la largeur de la ZCE sur les différentes contributions

Comme nous l'avons vu précédemment, la contribution dominante au courant traversant la photodiode est le courant de dérive, aussi bien dans l'obscurité qu'en présence de lumière. En augmentant la largeur de la zone de charge d'espace (Figure III.18), la différence dans les

proportions des deux contributions reste la même. Le courant de dérive a tendance à augmenter et le courant de diffusion diminue. En effet, une augmentation de la zone de charge d'espace diminue la zone de diffusion des porteurs et donc le courant de diffusion. Comme on peut s'y attendre ces variations sont très légères car la variation de la ZCE est peu importante.

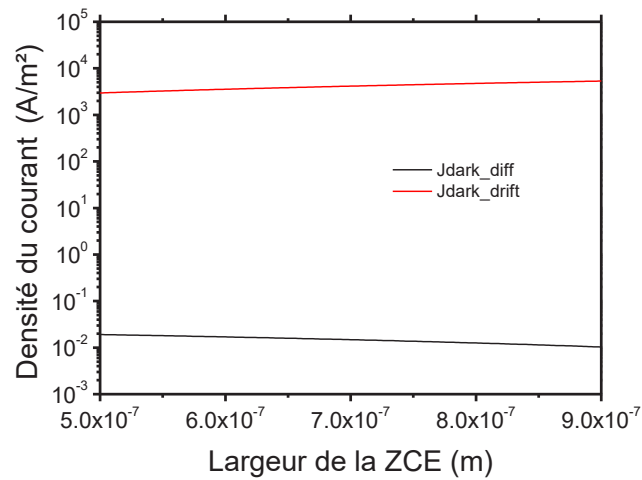


Figure III.18: Variation des courants de dérive et de diffusion d'obscurité en fonction de la largeur de la ZCE

Les courants photoniques de diffusion et de dérive présentent aussi les mêmes variations en fonction de la largeur de la ZCE. Comme le montre la Figure III.19, lorsque la largeur de la ZCE augmente, le courant de dérive augmente légèrement tandis que le courant de diffusion diminue. Le courant de dérive est inférieur au courant de diffusion pour les largeurs de ZCE inférieures à 0,664 μm et est supérieur au courant de diffusion au-delà. Cependant la différence reste légère.

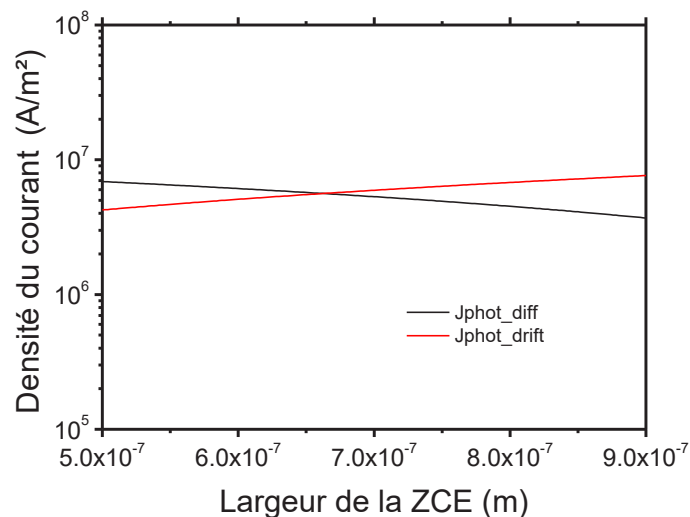


Figure III.19: Variation des courants photonique de diffusion et de dérive en fonction de la largeur de la ZCE

En somme, une augmentation de la largeur de la ZCE a peu d'impact sur le rapport entre les courants de dérive et de diffusion. Lorsque la puissance optique est nulle, le courant de diffusion reste inférieur au courant de dérive tandis que le rapport entre les photocourants de dérive et de diffusion reste toujours faible.

V.2.b. Influence de la durée de vie effective des porteurs

L'impact de la durée de vie effective des porteurs sur les différentes contributions du courant d'obscurité est représenté dans la Figure III.20. Lorsque la durée de vie effective diminue, on note une augmentation importante des deux contributions.

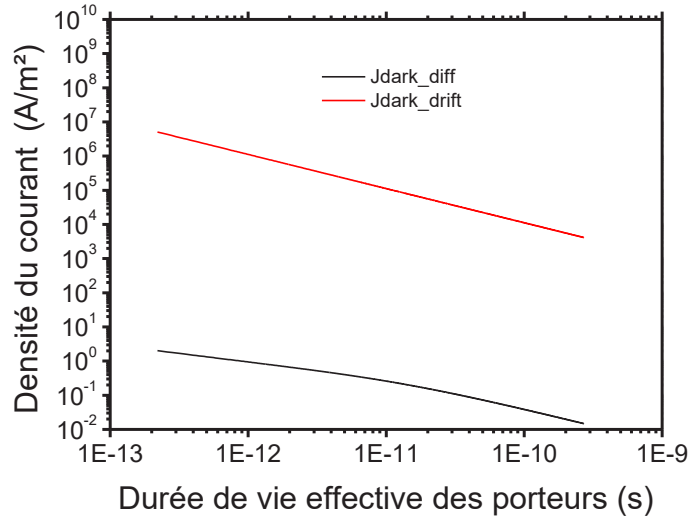


Figure III.20: Evolution des courants de dérive et de diffusion dans le noir en fonction d'une variation de la durée de vie effective des porteurs dans le Ge

L'évolution du courant photonique est différente lorsque la durée de vie effective des porteurs varie. En effet, seul le photocourant de diffusion est affecté. Le photocourant de dérive reste constant car il ne dépend pas de la durée de vie comme le montre l'expression (III.9). Contrairement au courant d'obscurité de diffusion, le photocourant de diffusion diminue lorsque la durée de vie des porteurs diminue.

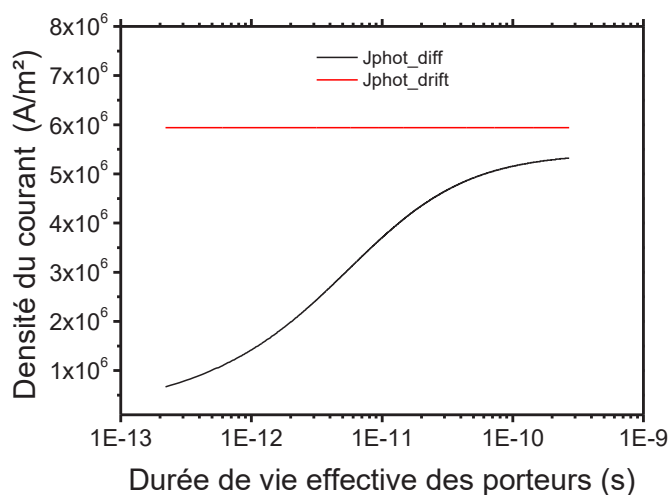


Figure III.21: Impact de la variation de la durée de vie effective des porteurs sur les courants de diffusion et de dérive photoniques

La durée de vie effective des porteurs a un impact différent sur les différentes contributions de courant selon que la photodiode est éclairée ou non. Son influence est plus importante sur le courant d'obscurité que sur le photocourant.

Comme on peut le voir, les variations de la largeur de la ZCE et de la durée de vie effective des porteurs ont un impact plus ou moins important, suivant certaines conditions, sur la variation des courants d'obscurité et photonique. Dans la suite, nous verrons si la variation de ces paramètres peut être à l'origine des dégradations de performance que nous avons mesurées. Mais avant cela, nous allons vérifier la validité de notre modèle en comparant les courbes obtenues avec celui-ci aux mesures effectuées avant le stress.

V.3. Ajustement du modèle sur les mesures avant stress

Pour reproduire les courants mesurés avant stress, les valeurs des paramètres géométriques utilisés (L_i , L_n^+ , L_p^+ , W , t et L) sont celles de la structure et sont donnés dans la Figure III.1. Les dopages sont ceux donnés dans le Tableau III.1. Tous les paramètres physiques supposés constants sont ceux du Ge. La durée de vie effective a été ajusté pour reproduire le courant d'obscurité avant stress en fonction de la tension appliquée. Afin que le courant du modèle corresponde au courant mesuré à $-1,6V$, ce paramètre a été estimé à $0,27$ ns, ce qui est très faible par rapport à la durée de vie intrinsèque des porteurs dans le Ge qui est de l'ordre de la microseconde. Cette même valeur de durée de vie a été utilisée pour le courant photonique et la constante de génération optique ajustée à $5,3 \times 10^{31} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ afin d'obtenir un courant photonique de 10^{-5} A à $-1,6 \text{ V}$ et 3 dBm à l'entrée du photodétecteur.

La Figure III.22 représente les mesures des courants d'obscurité et photonique ajustées au modèle. Le modèle du courant d'obscurité est constant avec la tension tandis que les mesures expérimentales présentent une légère variation. Cette variation avec la tension pourrait provenir de la contribution d'une conduction par effet tunnel qui elle dépend du champ électrique et donc de la tension appliquée. Cette contribution n'est pas prise en compte dans le modèle du fait de la complexité et de la non fiabilité des modèles existants [36] [37]. Aussi, nous verrons dans la suite que l'impact de cette contribution dans la dégradation du courant d'obscurité est négligeable.

Le modèle du courant photonique comme on peut le voir sur la Figure III.22 reproduit fidèlement les mesures expérimentales. Seules la durée de vie et la constante de génération optique ont été ajustés afin d'obtenir ces courbes. La même valeur de durée de vie a été utilisée pour les deux courants.

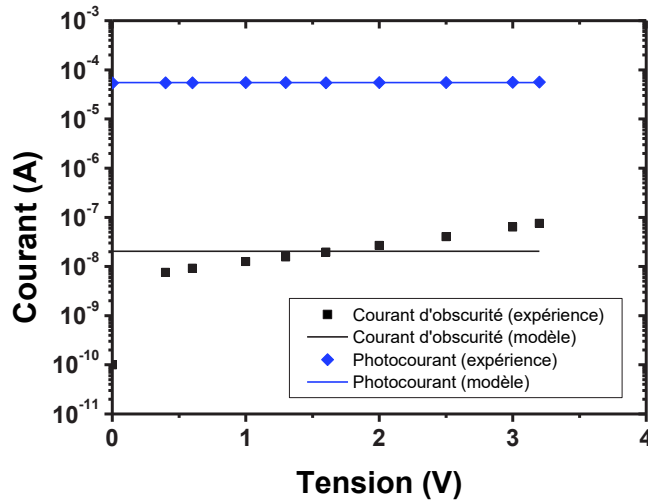


Figure III.22: Ajustement des mesures des courants d'obscurité et photonique sur le modèle des courants correspondants

La reproduction de ces mesures confirme la validité du modèle ainsi que les hypothèses qui ont été émises. A partir des valeurs de courants obtenus à -1,6 V, nous allons essayer de reproduire les mesures expérimentales du courant d'obscurité et de la responsivité obtenues pendant le stress.

V.4. Explication des résultats expérimentaux

La partie précédente a montré que certains paramètres comme la largeur de la ZCE ou la durée de vie effective des porteurs, pourraient avoir un impact sur la variation des contributions de courant dans le noir et sous éclairage. Nous allons voir dans la suite si la variation de ces paramètres joue un rôle dans les dégradations obtenues expérimentalement.

V.4.a. Variation de la géométrie

La Figure III.23 représente la variation du courant d'obscurité et de la responsivité en fonction de la largeur de la ZCE. Afin d'obtenir des variations les plus proches des valeurs expérimentales, les valeurs des paramètres utilisés pour l'ajustement des courbes I-V expérimentales ont été conservées. La responsivité est calculée avec une puissance optique de -12 dBm qui correspond à la valeur reçue par la photodiode. Lorsque la largeur de la ZCE augmente, le courant d'obscurité ainsi que de la responsivité augmentent aussi. Ces variations ne vont pas dans le même sens que les dégradations mesurées. Les amplitudes de variation sont par ailleurs très faibles comparées aux dégradations expérimentales. La dégradation du courant d'obscurité mesurée (2 décades) est nettement supérieure à celle qui est obtenue avec le modèle (<2). De même, la variation obtenue sur la responsivité est en dessus des mesures expérimentales et les sens de variation sont opposés.

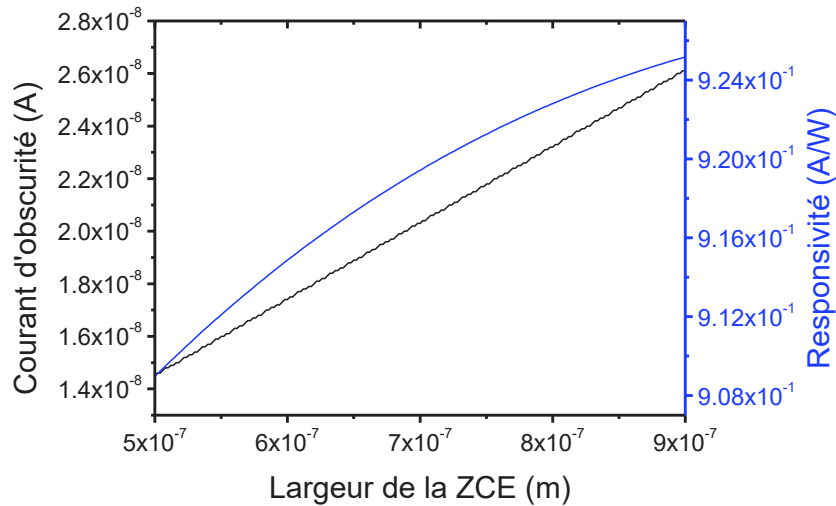


Figure III.23: Impact de la variation de la ZCE sur le courant d'obscurité et la responsivité

V.4.b. Variation de la durée de vie effective

Les variations obtenues avec la durée de vie effective semblent plus correspondre avec les mesures expérimentales. En effet, une diminution de la durée de vie effective des porteurs entraîne une augmentation du courant d'obscurité ainsi qu'une diminution de la responsivité. De plus les ordres de grandeur des variations sont plus proches de ceux mesurés. Sur la Figure III.24, le courant d'obscurité augmente de 3 décades lorsque la durée de vie effective passe de 0,27 ns à 0,27 ps tandis que la responsivité passe de 0,9 à 0,5 A/W pour la même variation de τ .

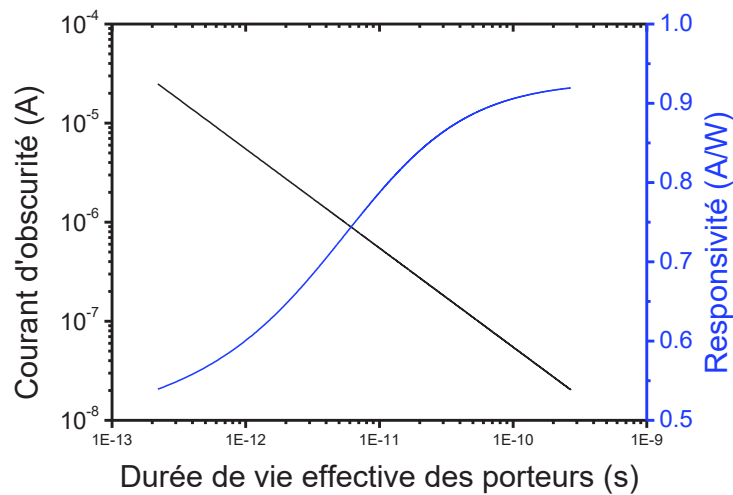


Figure III.24: Impact de la variation de la durée de vie effective sur le courant d'obscurité et la responsivité

La variation de la durée de vie effective des porteurs pourrait donc être la cause des dégradations du courant d'obscurité et de la responsivité. Les sens de variation et les amplitudes semblent correspondre aux mesures obtenues en stress. Afin de vérifier cela, un ajustement des dégradations expérimentales avec le modèle est nécessaire. Pour cela, il faut déterminer l'évolution temporelle de la durée de vie effective des porteurs afin d'obtenir à partir du modèle les variations correspondantes en fonction du temps de stress.

V.5. Ajustement du modèle sur les dégradations expérimentales

Les mesures expérimentales ont montré que les dégradations du courant d'obscurité et de la responsivité pourraient avoir la même origine. Cette origine pourrait être la dégradation de la durée de vie effective des porteurs qui semble avoir le même effet sur ces deux paramètres. Afin de reproduire ces dégradations, une fonction empirique a été utilisée pour exprimer la durée de vie effective en fonction du temps. Cette fonction est donnée dans l'équation (III.24).

$$\tau(t) = \tau_0 e^{\frac{-t}{\tau_c}} \quad (\text{III.24})$$

τ_0 et τ_c sont des constantes qui ont été obtenues en ajustant les valeurs des paramètres modélisés à 10^4 s et à 10^6 s.

Cette même fonction empirique est utilisée dans les équations du courant d'obscurité et de la responsivité. Les variations qui ont été obtenues ainsi que les mesures expérimentales correspondantes sont représentées dans la Figure III.25.

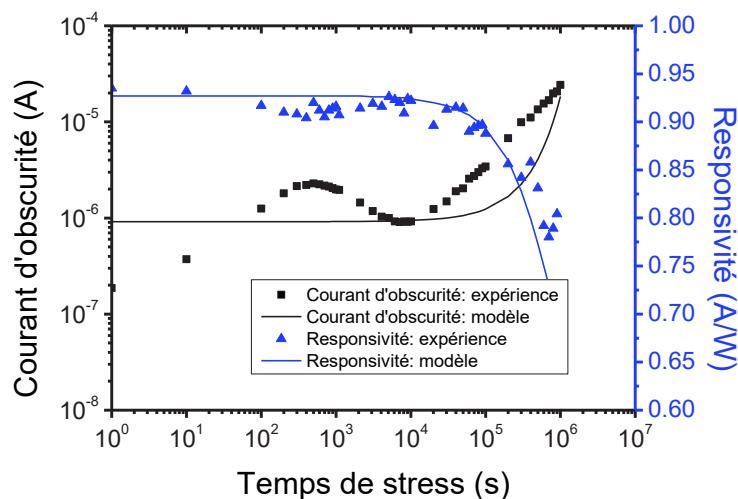


Figure III.25: ajustement des mesures expérimentales aux modèles du courant d'obscurité et de la responsivité avec la même variation de la durée de vie

Le modèle ajusté semble correctement reproduire la dégradation de la responsivité. Les amplitudes ainsi que les variations sont bien décrites. La dégradation du courant d'obscurité dans sa deuxième phase est assez proche du modèle. Les amplitudes correspondent mais les variations sont légèrement différentes.

La proximité entre les modèles et les résultats expérimentaux permet de confirmer que la variation de la durée de vie des porteurs pourrait bien être à l'origine de la dégradation du courant d'obscurité ainsi que de la responsivité du photodétecteur Ge à homojonction. La différence entre les variations du modèle et du courant d'obscurité pourrait signifier que la variation de la durée de vie ne suit pas la même dynamique pour le courant d'obscurité et la responsivité. Comme le montre les Figure III.20 et Figure III.21, les contributions affectées par la dégradation de la durée de vie ne sont pas les mêmes pour le courant d'obscurité et la responsivité. En effet, la dégradation du courant d'obscurité est principalement due à une

augmentation du courant de dérive tandis que celle de la responsivité est due à la diminution du courant de diffusion. La dynamique de la durée de vie en fonction du temps de stress pourrait être différente dans les zones où sont générées ces deux contributions.

L'ajustement du modèle ne tient pas compte de la variation qui se produit entre le début du stress et 10^4 s. Ce comportement qui semble être lié à une réorganisation des charges dans les premiers temps de stress suite à la forte tension qui est appliquée, a été caractérisé sur plusieurs dispositifs mais n'a pour le moment pas été compris. C'est pour cette raison qu'il n'est pas inclus dans le modèle. Par ailleurs, l'amplitude de cette variation ne semble pas influencée par la tension de stress, comme le montre la Figure III.26.

La dégradation du courant d'obscurité à 85°C et différentes tensions montre une accélération de la dégradation avec la tension. Ce qui réduit le temps d'oscillation lorsque la tension augmente. Pour une même tension de stress, l'amplitude de l'oscillation augmente avec la température. Par ailleurs la dégradation qui se produit après l'oscillation ne semble pas affectée par la température comme le montre la Figure III.27.

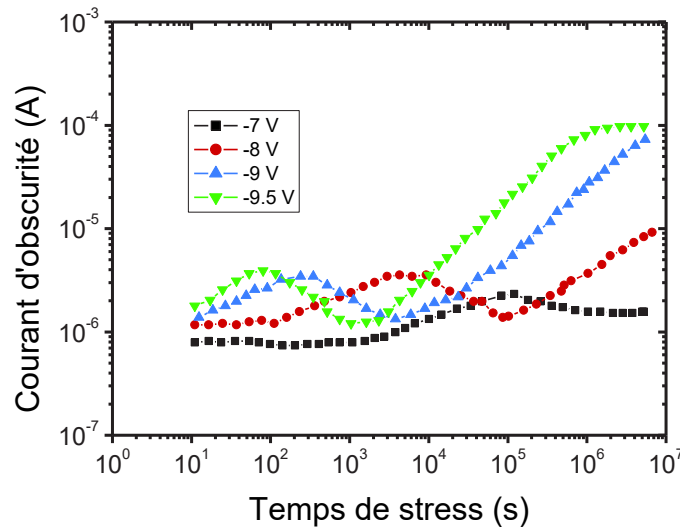


Figure III.26: Dégradation du courant d'obscurité. Stress à 85°C et différentes tensions

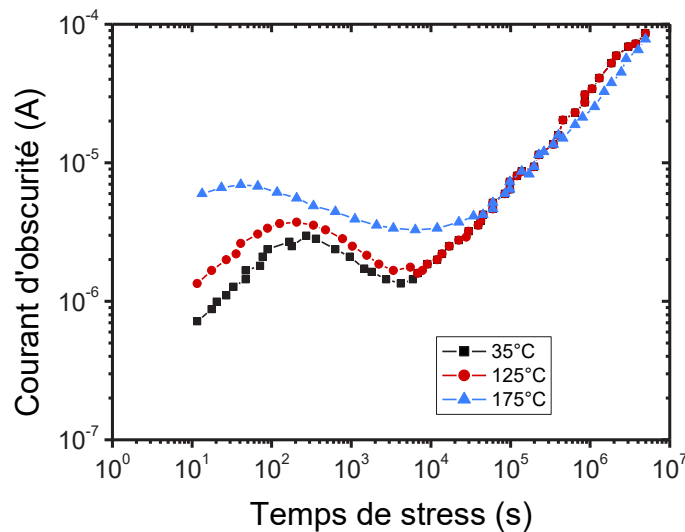


Figure III.27: Dégradation du courant d'obscurité. Stress à 9V et à différentes températures

V.6. Origines possibles de la variation de la durée de vie

Comme le montre l'équation (III.14), la variation de la durée de vie pourrait venir d'une variation de l'épaisseur de la photodiode, de la durée de vie intrinsèque ou alors des vitesses de recombinaison en surface aux interfaces entre le Ge et le Si et entre le Ge et l'oxyde. Les deux premiers étant des paramètres constants et ne pouvant pas être impactés par un stress en tension, une augmentation de la vitesse de recombinaison en surface serait plus probablement à l'origine de la dégradation de la durée de vie des porteurs. Cette augmentation peut être causée par une création de défauts aux interfaces au cours du stress. Cette hypothèse vient s'ajouter aux conclusions des études [30] et [32] qui montrent que la dégradation du courant d'obscurité pourrait fortement être liée à la présence de défauts aux interfaces entre le Ge et les matériaux environnants. En réalité, en raison de la différence de maille cristalline entre le Ge et le Si, il existe des liaisons pendantes à l'interface entre ces deux matériaux. De ce fait, une passivation est effectuée après l'épitaxie du Ge sur le Si afin d'améliorer l'état des surfaces. Cette passivation sert à fixer des atomes d'hydrogène aux liaisons pendantes du Ge et du Si. Cependant au cours du stress, la forte tension appliquée pourrait casser ces liaisons. Ce qui permettrait la création d'états électroniques pouvant constituer des pièges à électrons [30].

VI. Validation du modèle

L'ajustement du modèle sur les mesures expérimentales avant et après le stress permet de confirmer sa validité. Cependant, afin de renforcer sa fiabilité, des études expérimentales supplémentaires ont été effectuées. Ces mesures ont permis d'extraire l'énergie d'activation thermique avant et après le stress afin de déterminer l'origine des variations du courant au cours du stress.

VI.1. Mesure de l'énergie d'activation

Le même dispositif a été utilisé pour effectuer ces mesures. Avant d'appliquer le stress, les courants d'obscurité et photonique ont été mesurés en fonction de la tension à différentes températures. Un stress de -9,5 V a été ensuite appliquée pendant 24 h. A la fin du stress, les courants ont été à nouveau mesurés dans les mêmes conditions. La figure III.28 montre le protocole de test qui a été utilisé. Les étapes C1 et C2 représentent les mesures des courants d'obscurité et photonique respectivement. Ces mesures ont été faites en fonction d'une tension inverse de 0 V à 3,2 V. et à différentes températures entre 10°C et 40°C. A la fin de ces mesures, la température est ramenée à 25°C à l'étape C3, puis le stress est appliqué. A la fin du stress, les étapes C1 et C2 sont répétées pour mesurer les courants d'obscurité et photonique.

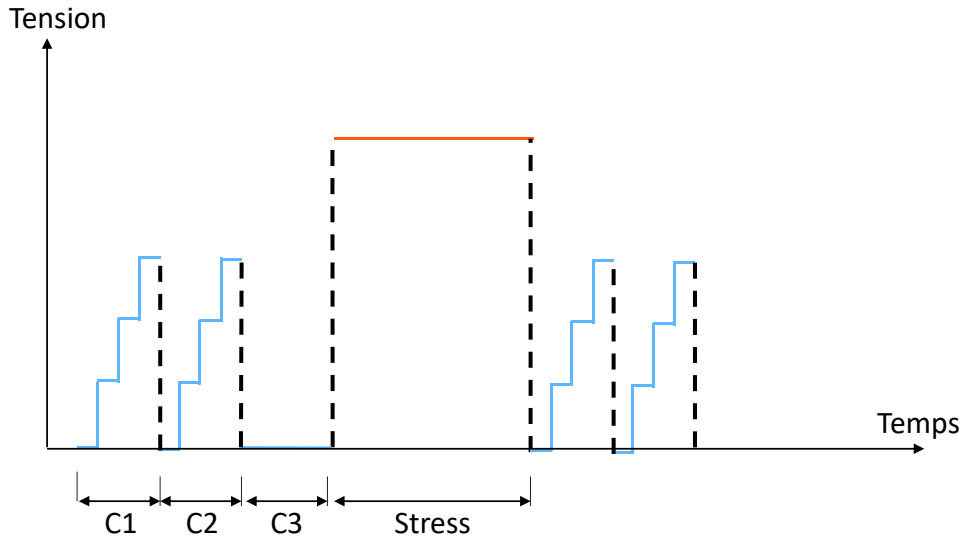


Figure III.28: Protocole de mesure des courants pour une extraction des énergies d'activation

VI.2. Mesure de l'énergie d'activation du courant d'obscurité

Les figures suivantes représentent l'évolution du courant d'obscurité en fonction de la tension appliquée pour les différentes températures. De manière générale, on note une augmentation du courant avec la température. Outre l'augmentation du courant après le stress, ces mesures montrent de plus une dynamique différente en fonction de la tension avant et après le stress. Cette différence est confirmée par les courbes d'énergie d'activation thermique en fonction de la tension pour les différentes températures représentées dans la Figure III.30.

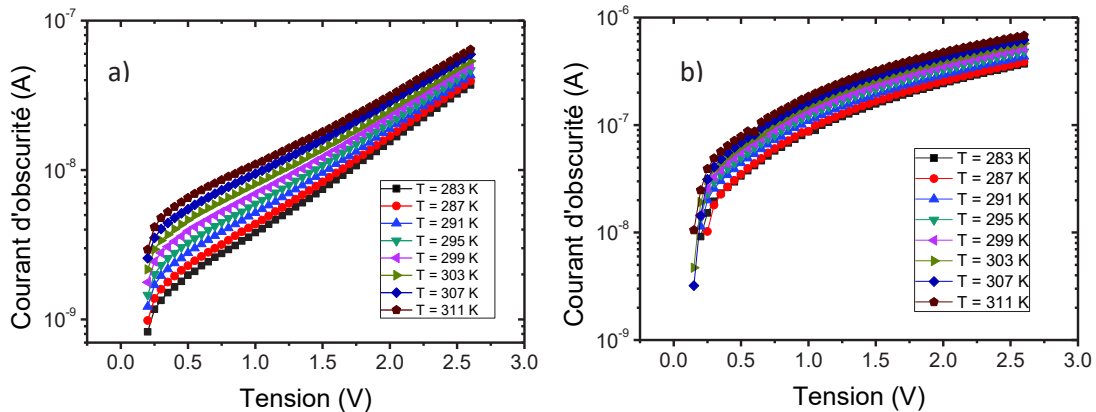


Figure III.29: Courant d'obscurité en fonction de la tension et de la température : a) Mesures avant stress b) Mesures après stress

La dépendance du courant avec la température permet l'extraction d'une énergie d'activation thermique. Cette énergie d'activation est calculée en utilisant la formule suivante :

$$E_a = \frac{d \ln (I_{dark})}{d \left(\frac{1}{k_B T} \right)} \quad (III.25)$$

On note une dépendance de l'énergie d'activation avec la température et la tension. La dépendance en température est plus difficilement exploitable du fait des incertitudes sur la

mesure de la température, tandis que la variation en tension semble plus nette. Avant le stress, l'énergie d'activation se situe entre 0,3 eV et 0,4 eV pour les faibles tensions. Lorsque la tension augmente, elle diminue et est autour de 0,1 eV à 2,6V. Après le stress, la dépendance avec la tension change et l'énergie d'activation est presque constante avec la tension. Une valeur de l'énergie d'activation proche de 0,3 eV correspond à une génération SRH. Cette contribution est associée à une énergie d'activation égale à la moitié du gap dans le Ge, soit 0,33 eV ($E_g=0,66$ eV) [38]. Les valeurs faibles sont associées à une conduction tunnel [38]. Avant le stress, la contribution dominante aux faibles tensions est une génération SRH. Lorsque la tension augmente, une autre contribution apparaît, la conduction par effet tunnel, et augmente avec la tension, d'où la valeur de l'énergie d'activation proche de 0,1 eV. Après le stress l'énergie d'activation est quasi constante et sa valeur est proche de 0,3 eV, ce qui montre une augmentation de la contribution SRH qui domine la conduction tunnel après le stress sur toute la plage de tension. Ces résultats suggèrent que l'origine de l'augmentation du courant d'obscurité est bien dûe à une augmentation des contributions SRH, elle-même probablement induite par une dégradation de la durée de vie effective des porteurs.

Ces résultats confirment par ailleurs que la dégradation du courant n'est pas liée à une modification d'une contribution du courant tunnel et que cette dernière peut effectivement être négligée dans l'étude de la fiabilité du photodétecteur à homojonction Ge. L'hypothèse d'une dégradation du courant SRH est ainsi d'autant plus renforcée.

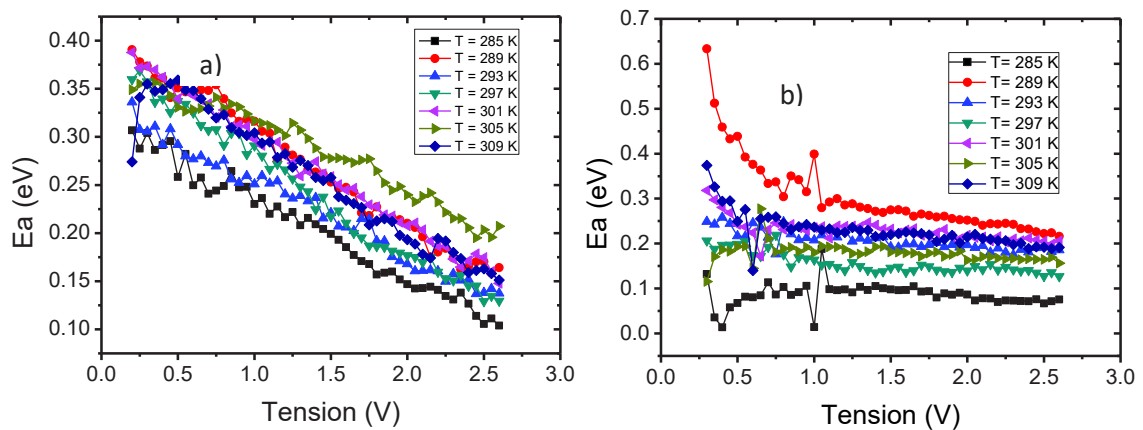


Figure III.30: Energie d'activation thermique en fonction de la tension. a) Mesures effectuées avant le stress b) Mesures après stress

VI.3. Mesure de l'énergie d'activation du courant photonique

Sur la base des résultats de modélisation du courant photonique, il serait attendu que la source principale de dégradation ait aussi pour origine une variation de durées de vie effectives des porteurs. Il serait donc pertinent d'effectuer la même mesure d'énergie d'activation thermique en fonction de la polarisation, mais sous illumination. Cependant, pour extraire cette énergie d'activation, il faudrait mesurer une variation du courant liée uniquement à la variation du transport des charges avec la température. Or la variation du courant photonique avec la température dans les dispositifs étudiés est la somme des variations du transport des charges et de la puissance optique reçue par la photodiode.

Comme on peut le voir sur la Figure III.2, la puissance optique reçue par le dispositif est envoyée à la photodiode via un coupleur à réseau et un guide d'onde en silicium. Lorsque ce

dispositif est soumis à une variation de température, le silicium se dilate entraînant un désalignement du coupleur avec la fibre externe. Ceci entraîne une diminution de la puissance optique due aux pertes de couplage et par suite une diminution du courant photonique. D'autre part, la même variation de température entraîne une augmentation du courant photonique due à l'influence de la température sur les mécanismes de transport de charge dans la photodiode. Cependant cette augmentation ne sera pas mesurable car le courant photonique est plus sensible aux variations de puissance optique. Une diminution totale du courant sera donc mesurée lors de cette variation de température.

La Figure III.31 montre le courant photonique mesuré avant le stress pour différentes températures. On peut voir que lorsque la température augmente, le courant photonique mesuré diminue. Ce qui rend donc impossible toute extraction de l'énergie d'activation du courant photonique. Pour résoudre ce problème, un ajustement automatique et dynamique de la puissance optique serait nécessaire, afin de la maintenir constante au cours de la variation de température. Des dispositifs de tests adéquats ainsi qu'un banc de mesure adapté pour la mise en place de cette expérience n'étant pas disponible à temps, ces mesures n'ont pas été effectuées dans le cadre de ces travaux de recherche.

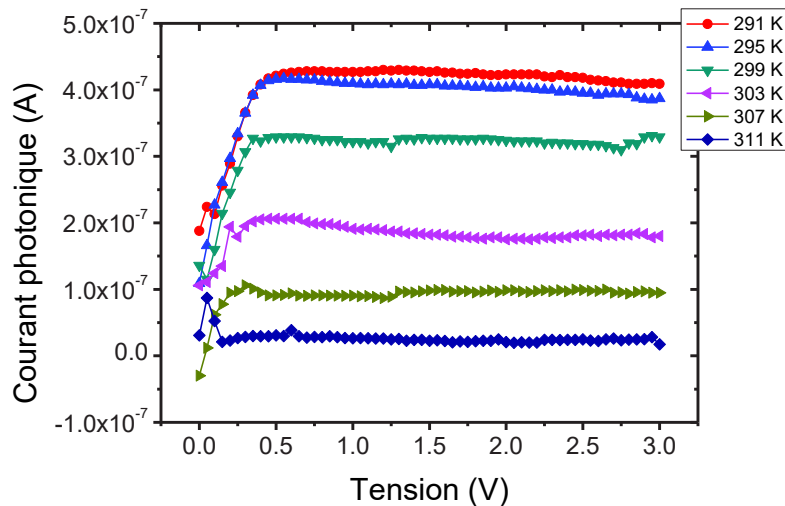


Figure III.31: Courant photonique mesurée en fonction de la tension à différentes températures

La dégradation du courant d'obscurité mesurée sur la structure à homojonction a aussi été mesurée sur la structure à hétérojonction avec une amplitude plus faible. Les évolutions de ces deux dégradations étant similaires, nous allons voir si leurs origines sont les mêmes.

VII. Comparaison des structures homojonction et hétérojonction

Dans sa deuxième génération de *transcievers* photoniques, PIC50G, STMicroelectronics propose des photodiodes de 50 GHz de bande passante. Ces photodiodes sont en fait constituées d'hétérojonctions Si-Ge qui permettent de limiter la génération d'un courant de diffusion. Elles sont constituées de Si dans une ou la totalité des zones dopées, le silicium étant transparent aux longueurs d'onde des télécommunications ne permet pas d'absorber de la lumière et donc de générer un courant.

Les études de cette thèse concernent uniquement les composants de la technologie PIC25G et donc les photodiodes à homojonction, mais à titre comparatif, les résultats de stress effectués sur cette structure sont présentés ci-dessous.

VII.1. Architecture

L'architecture de la structure est présentée dans la figure ci-dessous. Il s'agit d'une jonction p-i-n verticale. Les zones P et I sont constituées de germanium et la zone N est faite de silicium. Comme pour la structure à homojonction, une cavité creusée dans le silicium sert à la croissance du germanium par épitaxie. La lumière arrive par un guide d'onde silicium et le couplage avec la photodiode est direct.

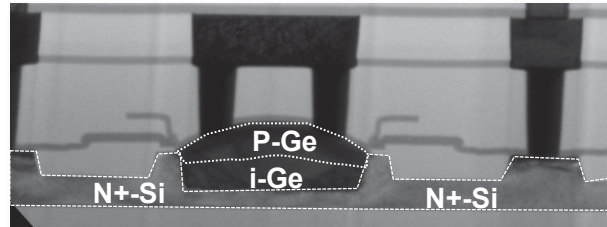


Figure III.32: Coupe TEM de la structure hétérojonction montrant les différents matériaux de la jonction

Si la lumière arrive dans la zone dopé P en Germanium, elle sera absorbée et un photocourant de diffusion sera généré. Cependant, ce photocourant devrait être moins important que celui généré dans une photodiode à homojonction. Afin de comparer l'évolution des performances dans le temps des deux structures, le même stress en tension est appliqué à la structure hétérojonction.

VII.2. Résultats expérimentaux

Suivant un protocole similaire à celui défini en III.3 un stress à différentes tensions et températures est appliqué sur la photodiode. Les courants d'obscurité et photonique sont mesurées au cours du stress à -1,6 V. Les résultats obtenus pour le courant d'obscurité sont présentés dans les figures ci-dessous. La Figure III.33 présente les dégradations obtenues pour un stress à température constante de 85°C et pour des tensions de -7 V, -8 V, et -9 V. On note une augmentation du courant d'environ une décade, à la fin du stress de 10^7 s. L'évolution du courant est similaire à celle mesurée sur la photodiode à homojonction. En effet, on note un comportement similaire à l'oscillation observée dans les premiers temps de stress sur la structure à homojonction suivie d'une augmentation du courant. Cependant, la deuxième augmentation est moins abrupte que la première, contrairement à l'homojonction. Le stress étant accélérée par la tension, ces deux comportements n'apparaissent que sur la courbe où le stress est à -9 V. Pour les tensions de stress inférieures, on note uniquement un début d'oscillation. De plus, l'amplitude de la première augmentation du courant est plus forte pour ces tensions. D'une manière générale, la diminution qui suit l'augmentation du courant au début du stress semble plus légère et la dégradation globalement est moins importante que sur la photodiode à homojonction.

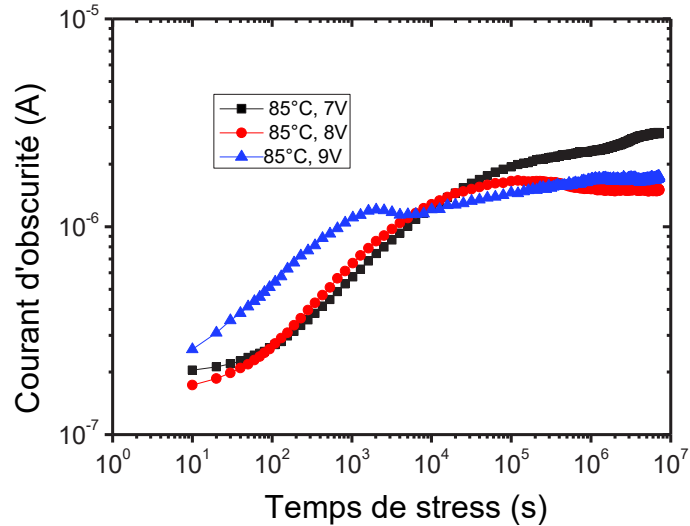


Figure III.33: Evolution du courant d'obscurité au cours du stress, impact de la tension de stress

Les dégradations obtenues pour la même tension de -9 V et pour des températures de 35°C, 85°C et 125°C sont présentées sur la Figure III.34. L'augmentation de la température est caractérisée par une augmentation du courant pendant tout le stress. L'amplitude de la dégradation ne semble pas affectée, cependant on note une légère accélération de l'apparition du premier pic de dégradation.

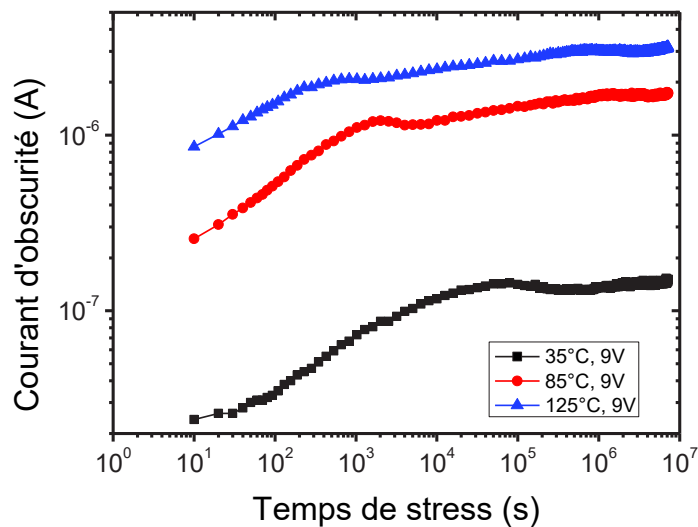


Figure III.34: Evolution du courant d'obscurité en fonction de la température appliquée au cours du stress

Ces différents résultats montrent que le courant d'obscurité de la structure à hétérojonction résiste plus au stress que celui de la photodiode à homojonction. Les résultats obtenus pour le courant photonique ne montrent pas de dégradation quelles que soient la tension et la température de stress. Cependant, nous avons vu dans la partie III.4.b que la mesure de ce paramètre sans celle de la puissance optique ne permet pas de mettre en évidence une dégradation. Afin de vérifier si la dégradation pourrait avoir la même origine que celle de la structure à homojonction, le modèle avec une variation de la durée de vie effective des porteurs est ajusté au courant d'obscurité obtenu pour un stress à -9 V et 85°C.

VII.3. Modélisation

Comme pour l'homojonction, l'ajustement est fait uniquement sur la deuxième partie de la dégradation. La fonction utilisée pour la durée de vie des porteurs est une fonction en puissance qui semble plus correspondre à la variation du courant d'obscurité. Son expression est donnée par l'équation (III.26).

$$\tau(t) = 7 \cdot 10^{-12} \tau_0 t^{\frac{1}{\tau_c}} \quad (\text{III.26})$$

τ_0 et τ_c sont respectivement égaux à $7 \cdot 10^{-12}$ s et 17,86 s et ont été ajustés pour obtenir le même courant mesuré expérimentalement à 10^4 , 10^5 , 10^6 et 10^7 s.

L'oscillation ainsi que la partie la précédant ne sont pas prises en compte. On note que le modèle ainsi que la dégradation suivant l'oscillation sont assez proches et semblent suivre la même loi de variation. Cette loi de variation en puissance par ailleurs semble le mieux reproduire la dégradation du courant d'obscurité de la photodiode à homojonction. La dégradation du courant d'obscurité de la photodiode à hétérojonction pourrait donc être interprétée à travers ce modèle par une diminution de la durée de vie effective des porteurs due à une augmentation de la vitesse de recombinaison en surface.

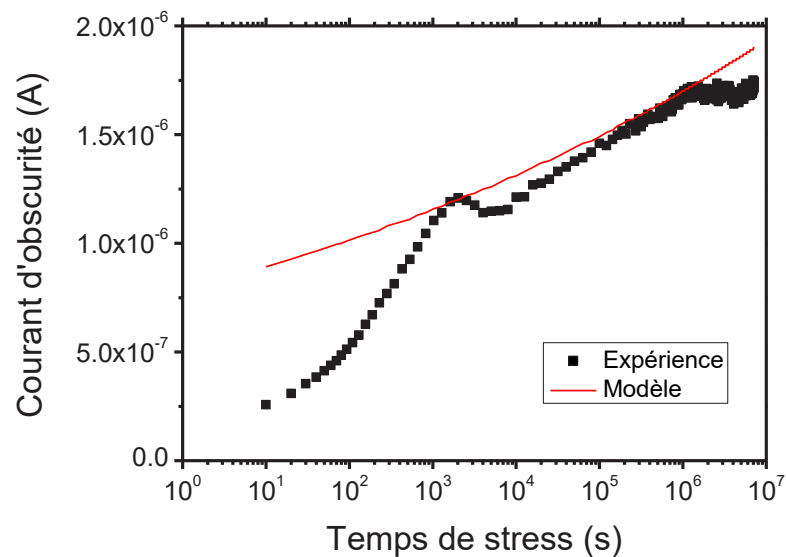


Figure III.35: Ajustement du modèle sur le courant de d'obscurité de la photodiode à simple hétérojonction verticale

Jusque-là, toutes les dégradations mesurées semblent avoir une seule et même origine. La première mesure de la fréquence de coupure montre aussi une dérive importante de ce paramètre au cours du stress. Afin de vérifier si cette évolution est cohérente avec l'hypothèse concernant l'origine de la dégradation, c'est-à-dire une diminution de la durée de vie des porteurs, le modèle a été étendu à la fréquence de coupure afin d'étudier l'origine de la variation mesurée.

VIII. Modélisation de la fréquence de coupure

VIII.1. Fonctionnement en haute fréquence

Une photodiode en haute fréquence se comporte comme un filtre passe-bas dont la bande passante est $[0 ; f_c]$, f_c étant la fréquence de coupure. La bande passante est la gamme de fréquence que la photodiode est capable de détecter sans que le signal soit altéré. Lorsqu'un signal présente une fréquence en dehors de la bande passante, c'est-à-dire dont la fréquence est supérieure à la fréquence de coupure, le signal de sortie est atténué. En effet, la fréquence de coupure est fonction du temps de réponse de la photodiode, temps nécessaire pour que le mécanisme de conversion soit achevé. Lorsque la fréquence du signal est supérieure à la fréquence de coupure de la photodiode, le mécanisme de conversion inachevé conduit à une perte du signal de sortie. Comme évoqué dans la section III.4.e.3 du chapitre 1, le temps de réponse d'une photodiode est limité par trois phénomènes : le temps de transit des porteurs dans la ZCE, le temps de diffusion dans les zones dopées ainsi que la constante de temps RC de la photodiode.

La fréquence de coupure s'obtient en calculant la réponse fréquentielle de la photodiode par la résolution de l'équation de continuité temporelle.

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G_{opt}(z, t) - \frac{\Delta n}{\tau_n} + \frac{1}{q} \frac{\partial}{\partial z} J_n \quad (\text{III.27})$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G_{opt}(z, t) - \frac{\Delta p}{\tau_p} + \frac{1}{q} \frac{\partial}{\partial z} J_p \quad (\text{III.28})$$

Ce calcul est cependant complexe. La deuxième possibilité consiste à calculer le temps de réponse de la photodiode en calculant les différentes contributions.

- **Constante de temps RC**

Une photodiode PIN est en général modélisée par un générateur de courant en parallèle avec une résistance R_i et une capacité C_i , résistance et capacité équivalente de la zone I. L'ensemble est en série avec une résistance R_s , résistance du substrat et des contacts et une résistance de charge R_L . Le schéma équivalent correspondant est représenté dans la Figure III.36.

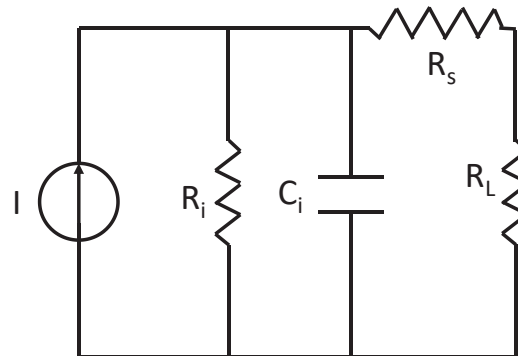


Figure III.36: Schéma équivalent d'une photodiode PIN

La résistance de la zone intrinsèque est très grande devant les résistances R_s et R_L , cette dernière est en général égale à 50 ohms. R_s peut varier entre 10 et 500 ohms en fonction de la taille de la photodiode.

La capacité C_i se calcule de la manière suivante :

$$C_i = \frac{\epsilon A}{W_{dep}} \quad (\text{III.29})$$

ϵ est la permittivité de la zone I, A est égale à la section S_1 et W_{ZCE} est la largeur de la ZCE.

La constante de temps de RC est ainsi égale à :

$$\tau_{RC} = (R_s + R_L)C_i \quad (\text{III.30})$$

- **Temps de transit**

Le temps de transit est le temps que mettent les porteurs dans la ZCE avant d'être collectés par les contacts. Si on sépare la contribution des électrons et des trous, on obtient les expressions suivantes :

$$\tau_{tr}^{n,p} = \frac{W_{dep}}{2 v_{drift}^{n,p}} \quad (\text{III.31})$$

$v_{drift}^{n,p}$ est la vitesse de dérive des électrons et des trous et sa formule est donnée par :

$$v_{drift}^{n,p} = \mu E = \mu \frac{V_{bi} + V_{app}}{W_{dep}} \quad (\text{III.32})$$

Par suite, on obtient l'expression suivante pour le temps de transit.

$$\tau_{tr}^{n,p} = \frac{W_{dep}^2}{2 \mu (V_{bi} + V_{app})} \quad (\text{III.33})$$

- **Temps de diffusion**

Le temps de diffusion est le temps que mettent les porteurs pour diffuser des zones neutres vers la ZCE. Il est considéré égal à la durée de vie effective des porteurs τ .

VIII.2. Analyse du comportement sous stress

Comme nous l'avons vu au chapitre III, la fréquence de coupure de la photodiode a été fortement dégradée par le stress que nous lui avons appliqué. Nous allons essayer ici de proposer quelques pistes possibles d'analyse de ce comportement. Sachant que le *deembedding* des mesures de fréquence de coupure que nous avons faites n'a pas pu être réalisé, nous nous contenterons d'une approche qualitative.

Une réduction de la fréquence de coupure veut dire qu'au moins un des temps de réponse caractéristiques que nous venons d'évoquer a augmenté. D'après notre modèle de la réponse au stress de la responsivité de la photodiode, la durée de vie effective des porteurs diminue avec la durée du stress. Cela veut donc dire que le temps caractéristique lié aux courants de diffusion baisse. On ne peut donc attribuer à ces derniers la baisse de la fréquence de coupure.

Ainsi, il semblerait que la mesure de la fréquence de coupure permet d'identifier un autre mécanisme physique de dégradation dans les photodiodes.

Lorsqu'on étudie le temps de transit, on remarque que celui-ci est directement proportionnel à la taille de la zone de charge d'espace. Une augmentation de celle-ci aurait donc pour conséquence une diminution de la fréquence de coupure. En début de test, nous avons une fréquence de coupure de 10 GHz tandis qu'elle était de 2 GHz à la fin du protocole. Si seule la taille de la zone de charge d'espace était responsable de cette variation, cela voudrait dire que celle-ci a donc été multipliée par 5. Or, à minima, la taille de la zone de charge d'espace initiale est égale à celle de la zone intrinsèque qui vaut $0,7 \mu\text{m}$. Le quintuple de cette largeur excède largement la largeur totale du dispositif qui n'est que de $1,34 \mu\text{m}$. Nous ne pouvons donc pas imputer la diminution de la fréquence de coupure de la photodiode à une variation des dimensions de la taille de la zone de charge d'espace. Néanmoins, le temps de transit dépend aussi de la mobilité des porteurs. Le stress apporté au dispositif pourrait avoir dégradé celle-ci, ce qui entrainerait une baisse de la fréquence de coupure.

La constante de temps « RC » de la photodiode dépend de sa capacité de jonction et de sa résistance série. Ci étant proportionnelle à la taille de la zone de charge d'espace, le raisonnement que nous avons fait pour le temps de transit s'applique aussi. C'est pourquoi, une variation de la capacité de jonction ne peut être considérée comme la principale cause de la dégradation observée. La résistance série du dispositif comprend entre autres la résistance de ses contacts dont on sait, grâce à l'expérience acquise sur les composants microélectroniques, qu'ils peuvent être une source de défauts. C'est pourquoi, nous avons décidé d'étudier de façon plus détaillée la réponse des contacts de la photodiode au stress grâce à une structure dédiée.

La structure de test est constituée de contact en Ti sur un barreau de Ge dopé p^+ et sur lequel est déposée une couche de métal, comme le montre la figure III.37. Le stress consiste à injecter un courant dans le contact à travers le métal, à une température donnée. Le courant traverse le barreau de Ge et est récupéré par un autre contact. Ce courant ainsi que la tension mesurée permettent de calculer la résistance du contact afin de suivre son évolution au cours du stress. Le courant injecté peut provoquer une dégradation dans le contact, dans le Ge mais aussi dans le métal. Différentes conditions sont appliquées afin de décorrélérer ces différentes contributions. Les courants injectés sont 2mA, 3 mA, 4 mA et 5 mA à des températures de 250°C , 300°C et 350°C .

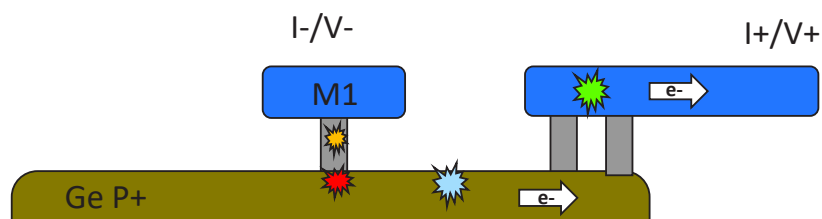


Figure III.37: Schéma de la structure de test des contacts de la photodiode

Les résultats obtenus sont présentés dans les figures suivantes. Ces résultats montrent une dégradation de la résistance des contacts, accélérée par la température et le courant injecté. La figure III.38 montre une augmentation de la résistance des contacts avec la température de stress mais aussi une accélération de la dégradation pour la température la plus élevée

(350°C). De même, la figure III.39 montre une dégradation plus importante suite à un courant injecté de 4mA. Lorsque la température augmente, cette dégradation augmente aussi et survient plus rapidement dans le temps.

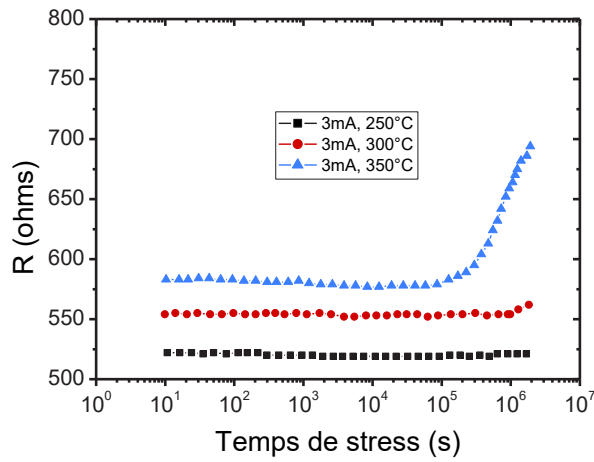


Figure III.38: Evolution de la résistance du contact au cours du stress, impact de la température à 3mA de courant injecté

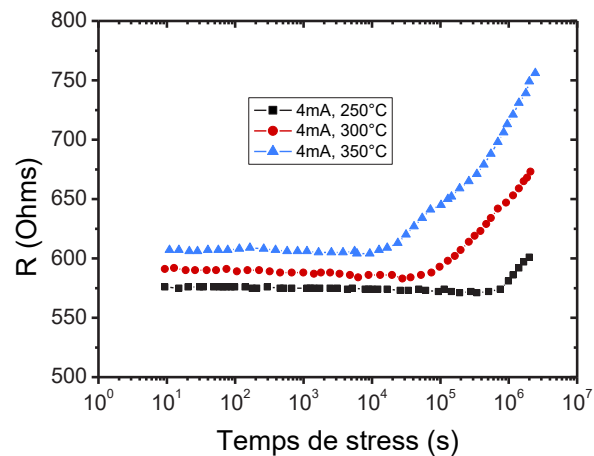


Figure III.39: Evolution de la résistance du contact au cours du stress, impact de la température à 4mA de courant injecté

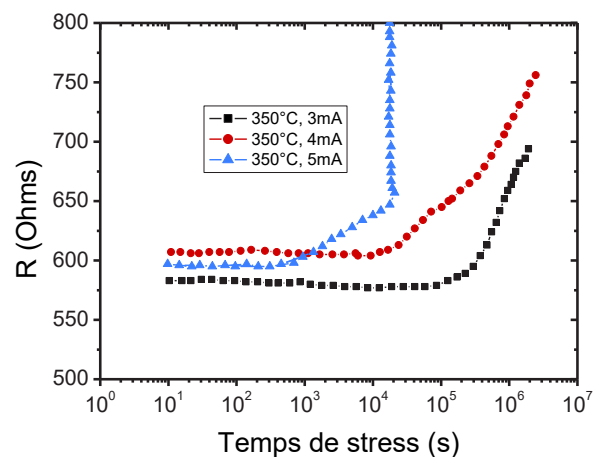


Figure III.40: Evolution de la résistance du contact au cours du stress, impact du courant injecté à 350°C

Mais au-delà de cela, ces courbes montrent aussi un comportement caractéristique de la fusion du contact. Sur la figure III.40, après 3h pour la condition de stress nominale (5 mA, 350°C), on remarque une augmentation importante de la résistance de contact. Une coupe TEM de la structure présentée sur la figure III.41 confirme cette hypothèse.

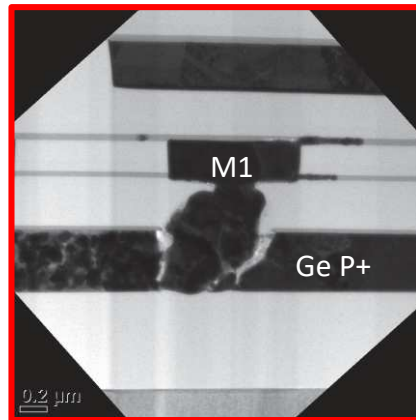


Figure III.41: Coupe TEM de la structure de test d'un contact montrant la fusion du contact

Les résultats obtenus sur les structures de test dédiées montrent donc qu'une dégradation des contacts pourrait être à l'origine des variations de la fréquence de coupure observées.

En conclusion, nous pouvons dire que l'explication de la dégradation de la fréquence de coupure de la photodiode n'est pas triviale et exigerait une étude dédiée, plus approfondie, avec un temps d'accès aux instruments de mesure RF beaucoup plus conséquent que celui dont nous avons disposé. Néanmoins, grâce à nos travaux préliminaires, nous avons identifié deux causes possibles dont les impacts respectifs peuvent s'ajouter : une dégradation de la mobilité des porteurs dans la zone de charge d'espace et une altération de la résistance série du dispositif.

IX. Synthèse des résultats et perspectives

La dégradation des photodiodes en Ge utilisées dans la technologie photonique sur silicium étudiée dans ce chapitre montre que la mise en place d'un protocole expérimental spécifique est nécessaire pour une mesure correcte des paramètres dépendant de la puissance optique. En particulier, ce protocole expérimental a permis de mettre en évidence la dégradation de la responsivité. Cette dégradation ainsi que celle du courant d'obscurité peuvent être expliquées par une dégradation de la durée de vie effective des porteurs due à la génération de défauts aux interfaces de la couche de Ge. Le modèle qui a été développé au cours de cette étude a permis de proposer les origines de ces dégradations. Ces dégradations ainsi que la compréhension de leurs origines constituent une avancée non négligeable dans l'étude de la fiabilité des photodétecteurs utilisés en photonique sur Si. Cette étude montre aussi que les photodétecteurs à hétérojonction même si moins sensibles au stress en tension sont aussi confrontés à la dégradation de la durée de vie effective des porteurs entraînant une dégradation du courant d'obscurité. Cette étude a aussi permis de mettre en évidence la difficulté de mesurer un courant photonique en fonction de la température. Des améliorations sont à faire sur les structures ainsi que les bancs de tests afin de quantifier l'impact de la température sur le courant photonique. Les différents phénomènes mis en évidence dans la mesure du courant d'obscurité ne sont pas tous expliqués par le modèle. L'oscillation

apparaissant en début de stress ne serait peut-être pas due à une dégradation de la durée de vie effective des porteurs et nécessite des études supplémentaires. Enfin la dégradation de la fréquence de coupure qui pourrait être expliquée par une diminution de la mobilité des porteurs ou une augmentation de la résistance série du dispositif, nécessite des mesures supplémentaires pour une caractérisation plus précise de ce paramètre.

X. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les travaux réalisés pour la compréhension des mécanismes de dégradation en jeu dans les photodiodes HSPD de la technologie PIC25G. Cette étude réalisée sur gaufre permet d'obtenir plus de fiabilité sur les mesures optiques qui comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent sont très impactés par l'instabilité de la puissance optique sur le boîtier photonique. Nous avons confirmé la dégradation du courant d'obscurité et avons pu mesurer une dégradation de la responsivité grâce à une structure et un protocole expérimental permettant de mesurer la puissance optique en sortie de la photodiode et ainsi décorrélérer les instabilités optiques, de la dégradation des paramètres optiques du photodétecteur. Nous avons ensuite modélisé les courants du HSPD, qui sont la somme d'un courant de dérive dans la ZCE et de diffusion dans les zones dopées. Ce modèle analytique et physique basé sur la génération thermique (Shockley-Read-Hall) et optique pour la dérive et sur le modèle de diffusion de Afzalian et Flandre [35], inclut la durée de vie effective des porteurs dont la variation nous a permis d'expliquer l'origine des dégradations observées sur le courant d'obscurité et le courant photonique. Le modèle ne nous a cependant pas permis d'expliquer la dégradation de la fréquence de coupure qui serait lié à un phénomène différent. La dégradation de la durée de vie effective des porteurs pourrait être due à la génération de défauts aux interfaces entre le Ge et les autres matériaux utilisés dans la fabrication de la photodiode, qui augmenterait les vitesses de recombinaison en surface. La mesure de l'énergie d'activation pendant et après le stress nous a permis de valider ce modèle en confirmant que l'augmentation du courant d'obscurité est due à l'augmentation des contributions Shockley-Read-Hall. Nous avons aussi comparé la dégradation du courant d'obscurité de la photodiode à homojonction avec celle de la photodiode à hétérojonction et montré à l'aide du modèle qu'elles pourraient avoir la même origine. Enfin ce chapitre se termine sur des perspectives d'amélioration du modèle, qui ne prend pas en compte l'oscillation présente en début du stress sur le courant d'obscurité et nécessite des études plus poussées pour expliquer la diminution de la fréquence de coupure observée pendant le stress. De même, afin de mieux caractériser le courant photonique en température, une amélioration des structures de test ainsi que du banc de mesures sont nécessaires.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Les études menées dans le cadre de ces travaux de recherche se sont concentrées sur le domaine neuf de l'étude physique de la fiabilité des composants optoélectroniques de la photonique sur silicium. Le démarrage de cette activité de recherche et développement a donc marqué ce travail. Il a donc permis de mettre en évidence des points bloquant, des fausses routes et des phénomènes potentiellement cruciaux pour ces composants, jusqu'alors non clairement identifiés.

La première partie de ces travaux, dédiée à l'étude des composants sous boîtier, a montré la difficulté de l'utilisation de ce type de structure de test. En effet, d'une part, les fibres optiques limitent fortement les températures utilisables pour contraindre les composants, ce qui empêche le déclenchement de certains mécanismes de dégradation. Le boîtier lui-même est un point bloquant important. Le collage des fibres par le biais d'un V-groove ne semble pas être adéquate pour des études de fiabilité. Le déplacement induit par la dilation de la colle ou par les fibres dans le boîtier noie les variations des propriétés des composants, empêchant l'étude plus poussée des composants. Il semble cependant que les photomodulateurs soient des composants robustes, puisqu'aucune contrainte ne semble avoir affecté leurs propriétés. Ceci peut s'expliquer par le fait que le principe de fonctionnement de ces composants repose sur une variation de largeur de zone de charge d'espace, elle-même contrôlée par un profil de dopage, difficilement dégradable avec les plages de tension et de température utilisées. Cette première étude a donc motivé une deuxième, basée sur des mesures sur substrat.

Cette deuxième étude s'est concentrée sur la fiabilité des photodétecteurs, qui avaient présenté une variation de caractéristique dans la première étude sous boîtier. Cette deuxième partie a confirmé les résultats de dégradation : sous contrainte de tension, le courant d'obscurité et photonique des photodétecteurs se dégradent à partir de 10^4 s. La rapidité avec laquelle cette dégradation intervient semble liée à l'intensité des contraintes appliquées, mais de nouveaux tests sont nécessaires pour identifier plus systématiquement cette tendance.

Ces dégradations ont été modélisées analytiquement et l'interprétation basée sur ce modèle des dégradations attribue les variations de courants observées à une diminution de la durée de vie effective des porteurs dans le photodétecteur. Cette origine physique permet d'expliquer à la fois l'augmentation du courant d'obscurité et la baisse du courant photonique. La diminution de la durée de vie effective peut être attribuée à différents mécanismes, dont une augmentation des recombinaisons aux interfaces du composant.

Par sa nature exploratoire et d'une certaine manière novatrice, ce travail présente donc de nombreuses perspectives.

Tout d'abord, un travail de simulation est nécessaire pour déterminer le domaine de validité du modèle employé ainsi que ses limitations. Ces simulations permettront par ailleurs d'explorer le rôle de différents modes de transport dans les photodiodes, comme par exemple le tunnel bande à bande ou le tunnel assisté par piège. Elles permettront de tester l'hypothèse du rôle des recombinaisons de surface sur la dégradation des durées de vie des porteurs.

Le travail expérimental devrait être poursuivi, tout d'abord en identifiant plus clairement les conditions de dégradation du courant d'obscurité, en particulier du rôle de la température

et de la tension de contrainte sur la dérive des paramètres. Cette étude pourrait permettre de relier ces dégradations à des mécanismes déjà connus, comme ceux intervenant dans les interfaces des transistors MOSFETs, mais impactant la tension de seuil du transistor.

L'étude de la nature du courant photonique est aussi à compléter. Les mesures nécessaires sont complexes à mettre en place. En particulier, la séparation de la variation du courant photonique due à la variation du couplage optique avec la variation du courant due aux dépendances des paramètres physiques avec la température nécessite d'améliorer l'instrumentation utilisée ainsi que les structures de tests employées.

D'autres méthodes de caractérisations peuvent par ailleurs être utilisés pour étudier les photodétecteurs, comme le bruit basse fréquence. Cette méthode complexe permet en effet de déterminer la nature des défauts présent dans les composants électroniques, en particulier ceux présent aux interfaces.

Enfin, l'ensemble des résultats obtenus sont potentiellement valides pour d'autres photodiodes, utilisée pour d'autres applications. L'ensemble des connaissances obtenues et des méthodologies développées dans le cadre de ces études seront donc cruciales pour une meilleure compréhension des mécanismes de vieillissement des photodiodes en général.

PUBLICATIONS

Article dans une revue

F. Sy, Q. Rafhay, J. Poette, G. Grosa, G. Beylier, P. Grosse, D. Roy, J-E. Broquin, « Reliability Characterization and Modelling of High Speed Germanium Photodetectors » IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2019

Conférences internationales

F. Sy, Q. Rafhay, D. Roy, C. Besset, G. Beylier, P. Grosse, J-E. Broquin, « Reliability of High Speed Photodetectors for Silicon Photonic Applications » IEEE International Integrated Reliability Workshop, 2018

F. Sy, Q. Rafhay, J. Poette, G. Grosa, C. Besset, G. Beylier, P. Grosse, D. Roy, J-E. Broquin, « Characterization and Modelling of High Speed Germanium Photodetectors Reliability » IEEE International Reliability Physics Symposium, 2019 – **Best Poster Award**

BIBLIOGRAPHIE

- [1] J. Hecht, «A short history of laser development,» *Applied Optics*, 2010.
- [2] R. G. Hunsperger, *Integrated Optics Theory and Technology*, sixth edition, New York: Springer, 2009.
- [3] M. Paniccia et S. Koehl, «The Silicon Solution,» *IEEE Spectrum*, 2005.
- [4] T. Barnett, A. Sumits, S. Jain, U. Andra et T. Khurana, «Cisco Global Cloud Index 2015 - 2020,» 2016.
- [5] Google, «Google.com,» [En ligne]. Available: <https://www.google.fr/about/datacenters/gallery/index.html#/locations/lenoir>.
- [6] R. Soref et J. Lorenzo, «All-silicon active and passive guided-wave components for $\lambda = 1.3$ and $1.6 \mu\text{m}$,» *IEEE Journal of Quantum Electron*, p. 873–879, 1986.
- [7] R. Soref et B. Brian, «Electrooptical Effects in Silicon,» *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1987.
- [8] R. A. Soref, J. Schmidtchen et K. Petermann, «Large single-mode rib waveguides in GeSi and Si-on-SiO₂,» *IEEE Journal of Quantum Electron*, p. 1971–1974, 1991.
- [9] B. Jalali et S. Fathpour, «Silicon Photonics,» *Journal of Lightwave Photonics*, 2006.
- [10] F. Boeuf, S. Cremer, E. Temporiti, M. Ferè, M. Shaw, C. Baudot, N. Vulliet, T. Pinquet, A. Mekis, G. Masini, H. Petiton, P. Le Maitre, M. Traldi et L. Maggi, «Silicon Photonics R&D and Manufacturing on 300-mm Wafer Platform,» *J. Lightwave Technology* 34, pp. 286-295, 2016.
- [11] D. Marris-Morini, L. Vivien et G. Rasigade, «Optical Modulators in Silicon Photonic Circuits,» Institut d'Electronique Fondamentale - Université Paris Sud, Paris, France, 2009.
- [12] J. Liu, D. Pan, J. Samerkhae, K. Wada, L. C. Kimerling et J. Michel, «Design of monolithically integrated GeSi electro-absorption modulators and photodetectors on an SOI platform,» *Optics Express*, 2007.
- [13] J. Liu, D. Pan, J. Samerkhae, K. Wada, L. C. Kimerling et J. Michel, «Waveguide-integrated, ultralow-energy GeSi electro-absorption modulators,» *Nature Photonics*, 2008.
- [14] R. S. Jacobsen et e. al, «Strained silicon as a new electro-optic material,» *Nature*, 2006.
- [15] G. Cocorullo et I. Rendina, «Thermo-Optical Modulation at 1.5 μm in Silicon Etalon,» *Electronics Letters*, 1992.
- [16] S. C. Baker-Finch, K. R. McIntosh, D. Yan et K. C. Fong, «Near-infrared free carrier absorption in heavily doped silicon,» *Journal of Applied Physics*, 2014.
- [17] D. K. SCHRODER, R. N. THOMAS et J. C. SWARTZ, «Free Carrier Absorption in Silicon,» *IEEE Journal of Solid-States Circuits*, 1978.

- [18] M. Rüdiger, J. Greulich, A. Richter et H. Martin, «Parameterization of Free Carrier Absorption in Highly Doped Silicon for Solar Cells,» *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2013.
- [19] J. Isenberg et W. Warta, «Free carrier absorption in heavily doped silicon layers,» *Applied Physics Letters*, 2004.
- [20] M. Nedeljkovic, R. Soref et G. Z. Mashanovich, «Free-Carrier Electrorefraction and Electroabsorption Modulation Predictions for Silicon Over the 1–14- μm Infrared Wavelength Range,» *IEEE Photonics Journal*, 2011.
- [21] A. Liu et e. al., «A high-speed silicon optical modulator based on a metal–oxide–semiconductor capacitor,» *Nature*, 2004.
- [22] C. A. Barrios, V. R. Almeida, R. Panepucci et M. Lipson, «Electrooptic Modulation of Silicon-on-Insulator Submicrometer-Size Waveguide Devices,» *Journal of Lithwave Technology*, 2003.
- [23] Q. Xu et e. al, «Micrometre-scale silicon electro-optic modulator,» *Nature*, 2005.
- [24] W. M. J. Green, M. J. Rooks, L. Sekaric et Y. A. Vlasov, «Ultra-compact, low RF power, 10 Gb/s silicon Mach-Zehnder modulator,» *Optics Express*, 2007.
- [25] C. A. Van, T. Hof et T. Bakker, «Noise measurements on germanium avalanche photodetectors,» *Applied Scientific Research*, 1974.
- [26] T. Kaneda, H. Fukuda, T. Mikawa, Y. Banba, Y. Toyama et H. Ando, «Shallow-junction p+-n germanium avalanche photodiodes (APD's),» *Applied Physics Letters*, 2008.
- [27] M. T. Currie, S. B. Samavedam, T. A. Langdo, C. W. Leitz et F. E. A., «Controlling threading dislocation densities in Ge on Si using graded SiGe layers and chemical-mechanical polishing,» *Applied Physics Letters*, 1998.
- [28] A. Nayfeh, C. O. Chui et K. C. Saraswat, «Effects of hydrogen annealing on heteroepitaxial-Ge layers on Si: Surface roughness and electrical quality,» *Applied Physics Letters*, 2004.
- [29] T. Technologies, Generic Reliability Assurance Requirements for Optoelectronic Devices Used in Telecommunication Equipement, 2004.
- [30] Z. Tu, Z. Zhou et X. Wang, «Reliability considerations of high speed Germanium waveguide Photodetectors,» chez *SPIE OPTO*, San Francisco, 2014.
- [31] V. Huarda, M. Denais, F. Perrier et et al, «A thorough investigation of MOSFETs NBTI degradation,» *Microelectronics Reliability*, pp. 83-98, 2005.
- [32] A. Leśniewska, S. A. Srinivasan, J. Van Campenhout, B. J. O'Sullivan et K. Croes, «Accelerated Device Degradation of High-Speed Ge Waveguide Photodetectors,» chez *International Reliability Physics Symposium*, Monterey, 2019.
- [33] H. Mathieu, *Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques*, Paris: Dunod, 2004.
- [34] S. M. SZE, *Physics of semi-conductors Devices*, 1981.

- [35] A. Afzalian et D. Flandre, «Physical Modelling and Design of Thin-Film SOI Lateral PIN Photodiodes,» *IEEE Transactions on Electron Devices*, June 2005.
- [36] E. O. Kane, «Theory of tunneling,» *Journal of Applied Physics*, Janvier 1961.
- [37] W. Vandenberghe, B. Sorée, W. Magnus et M. Fischetti, «Generalized phonon-assisted Zener tunneling in indirect semiconductors with non-uniform electric fields: A rigorous approach,» *Journal of Applied Physics*, 2011.
- [38] H. Chen, P. Verheyen, P. De Heyn, G. Lepage, J. De Coster, S. Balakrishnan, P. Absil, G. Roelkens et J. Van Campenhout, « Dark current analysis in high-speed germanium pin waveguide photodetectors,» *Journal of Applied Physics* , 2016.
- [39] E. D. Palik, *Handbook of optical constant of solids*, New York, 1985.
- [40] A. V. Krishnamoorthy, K. W. Goossen, W. Jan, X. Zheng, G. Li, R. Rozier, F. Liu, D. Patil, J. Lexau, H. Schwetman, D. Feng, M. Asghari, T. Pinguet et J. E. Cunningham, «Progress in Low-Power Switched Optical Interconnects,» *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, pp. 357-376, 2011.

Titre: Etude et modélisation de la fiabilité des dispositifs avancés en Photonique intégrés sur Silicium

Résumé en français:

Les télécommunications par voie optique recouvrent de nos jours une part majoritaire dans l'échange des données numériques. L'augmentation des débits et des volumes de données échangées poussent à l'amélioration constantes des technologies qui les sous-tendent. La photonique sur silicium s'inscrit dans ce développement et vise à co-intégrer aux plus près les composants optiques et les composants électroniques en utilisant comme interface les composants optoélectroniques. Cette thèse s'inscrit dans cette thématique et plus particulièrement dans le cadre de la caractérisation de la technologie PIC25G développée par STMicroelectronics. Cette dernière a pour objectif de pouvoir amener les connexions optiques directement sur les serveurs des centres de données internet, pour ainsi augmenter les performances globales de l'échange des données.

Comme toutes technologies, il est nécessaire de mener un suivi continu de ses performances par de la caractérisation électrique et, ici, optique. Mais il est aussi crucial de pouvoir évaluer le plus précisément possible la durée de fonctionnement de ces composants dans des conditions nominales. Une étude de fiabilité des composants de la photonique sur silicium était donc indispensable pour STMicroelectronics. Cependant, très peu d'études ont été menées sur ce sujet. L'objectif de cette thèse est l'étude de la fiabilité des composants optoélectroniques visant les applications de télécommunication.

La première partie de ces travaux de recherches est consacrée à la validation d'un banc de caractérisation optoélectronique, puis aux premiers tests réalisés sur des composants mis en boîtier. La deuxième partie regroupe les différentes caractérisations effectuées sur des photodétecteurs de la technologie PIC25G, nous y montrons comment les dégradations de performance observées lors de tests de stress réalisés peuvent être expliquées par un modèle physique que nous avons validé. Finalement, les perspectives ouvertes par ces travaux seront abordées non seulement par rapport à la problématique de STMicroelectronics mais aussi dans le cadre plus général de la fiabilité des dispositifs optoélectroniques et photoniques intégrés.

Title: Reliability study and modelling of advanced devices in Integrated Silicon Photonics

Abstract:

Optical telecommunications currently cover a significant part in the digital data exchanges. The increasing rate of the exchanged data is pushing to the continuous improvement of involved technologies. Silicon photonics is a part of this development and aims to closely co-integrate optical and electronic components, using optoelectronics components as interfaces. This thesis is part of this theme and more particularly in the context of the characterization of PIC25G technology developed by STMicroelectronics. This technology aims to bring optical connections directly to the servers of internet data centers in order to increase the overall data exchange performances.

Like all technologies, it is necessary to perform a continuous monitoring of its performances through electrical and, here, optical characterization. But it is also important to be able to assess as accurately as possible the lifetime of these components under nominal conditions. A reliability study of silicon photonics components was therefore essential for STMicroelectronics. However, very few studies have been done on this topic. The objective of this thesis is the reliability study of optoelectronic components used in telecommunication applications.

The first part of this research work is dedicated to the validation of an optoelectronic characterization bench, then to the first tests performed on packaged components. The second part is dedicated to the various characterizations performed on photodetectors of PIC25G technology and shows how the degradation of the performances observed during stress tests can be explained by a physical model that we have validated. Finally, the perspectives opened by this work will be addressed in the more general context of the reliability of optoelectronic devices and integrated photonics.