



HAL
open science

Analyse de défaillance dans les transistors de puissance grand gap par électroluminescence spectrale

Niemat Moulitif

► **To cite this version:**

Niemat Moulitif. Analyse de défaillance dans les transistors de puissance grand gap par électroluminescence spectrale. Electronique. Normandie Université, 2017. Français. NNT : 2017NORMR052 . tel-01691916

HAL Id: tel-01691916

<https://theses.hal.science/tel-01691916>

Submitted on 24 Jan 2018

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.



Normandie Université

THESE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

Spécialité Génie électrique, électronique, photonique et systèmes

Préparée au sein de « l'Université de Rouen Normandie »

Analyse de défaillance dans les transistors de puissance grand gap par électroluminescence spectrale

**Présentée et soutenue par
Niemat MOULTIF**

**Thèse soutenue publiquement le 22/09/2017
devant le jury composé de**

Madame Marise BAFLEUR	Directeur de recherche, LAAS-CNRS, Toulouse	Examineur
Monsieur Bruno ALLARD	Professeur, Ampère-CNRS, Lyon	Rapporteur
Madame Nathalie MALBERT	Professeur, IMS-CNRS, Bordeaux	Rapporteur
Monsieur Olivier LATRY	Maître de conférences HDR, GPM-CNRS, Rouen	Directeur de thèse
Monsieur Eric JOUBERT	Maître de conférences, GPM-CNRS, Rouen	Encadrant
Monsieur Daniel TRIAS	Directeur recherche et développement, SERMA, Bordeaux	Invité
Monsieur Jean-François GOUPY	Ingénieur recherche et développement, Thalès Air Systems, Ymare	Invité
Monsieur Xavier PARIS	Ingénieur recherche et développement, Thalès Air Systems, Ymare	Invité

Thèse dirigée par Olivier LATRY et encadrée par Eric JOUBERT laboratoire GPM



UNIVERSITÉ DE ROUEN NORMANDIE
ÉCOLE DOCTORALE PSIME

Physique, Sciences de l'Ingénieur, Matériaux, Energie

T H È S E

pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de Rouen Normandie

Discipline : PHYSIQUE

**Spécialité : GÉNIE ÉLECTRIQUE, ÉLECTRONIQUE,
PHOTONIQUE ET SYSTÈMES**

Présentée et soutenue publiquement le 22-09-2017 par

Niemat MOULTIF

**Analyse de défaillance dans les transistors de
puissance grand gap par électroluminescence
spectrale**

Thèse dirigée par Olivier LATRY et encadrée par Eric JOUBERT

Version finale

Membres du Jury :

Marise BAFLEUR	Directeur de recherche, LAAS-CNRS, Toulouse	Examineur
Bruno ALLARD	Professeur, Ampère-CNRS, INSA Lyon	Rapporteur
Nathalie MALBERT	Professeur, IMS-CNRS, Univ. Bordeaux 1	Rapporteur
Olivier LATRY	Maître de conférences-HDR, GPM-CNRS, Univ. Rouen	Directeur
Eric JOUBERT	Maître de conférences, GPM-CNRS, Univ. Rouen	Encadrant
Daniel TRIAS	Directeur recherche et développement, SERMA, Bordeaux	Invité
Jean-François GOUPY	Ingénieur recherche et développement, Thales Air Systems, Ymare	Invité
Xavier PARIS	Ingénieur recherche et développement, Thales Air Systems, Ymare	Invité

Remerciements

Cette thèse a été réalisée à l'université de Rouen Normandie au sein du laboratoire Groupe de physique des matériaux (GPM) de Rouen et l'équipe Défaillance Électronique et Fiabilité (ERDEFI). A ce titre, je tiens à remercier Monsieur le Professeur Philippe PAREIGE, directeur du GPM, pour m'avoir permis de conduire mes travaux de recherche dans d'excellentes conditions.

Que Madame Marise BAFLEUR du LAAS de Toulouse, trouve ici l'expression de ma considération pour l'honneur qu'elle me fait en présidant ce jury.

Mes profonds remerciements vont à Monsieur Bruno ALLARD du l'INSA de Lyon, Madame Nathalie MALBERT de l'université de Bordeaux 1, Monsieur Daniel Trias de SERMA de Bordeaux, Monsieur Jean-François GOUPY de Thales Air Systems de Ymare, et Monsieur Xavier PARIS de Thales Air Systems de Ymare, qui m'ont fait l'honneur d'accepter de participer a mon jury de thèse. Je tiens à leur témoigner ici, de ma profonde reconnaissance et ma grande déférence pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.

Je remercie chaleureusement tous les partenaires du projet FIRST-MFP pour le partage d'informations ainsi que leur retour critique constructif lors des réunions de suivi de mon travail. Ma participation à ce projet qui était l'appui financier de cette thèse, a été très enrichissantes sur les plans personnel et scientifique.

J'exprime ma plus vive reconnaissance à Monsieur Olivier LATRY, Maître de conférences au GPM pour la confiance qu'il a placé en moi afin de mener ce travail. Je vous remercie très sincèrement pour m'avoir pris en stage au sein de l'équipe ERDEFI et Thales Air Systems, étape essentielle sans laquelle je n'en serai pas là ! Vous m'avais donné l'opportunité de travailler sur un sujet aussi intéressant. Nos échanges ont été extrêmement enrichissants et ont rendu nos séances de travail très productives. Je vous remercie pour vos remarques précieuses, votre regard critique et averti, et pour avoir dirigée l'ensemble de ces travaux.

Ma gratitude s'étend naturellement à Monsieur Eric JOUBERT, Maître de conférences au GPM, que je tiens à le remercier pour son suivi, son encadrement, son investissement, sa patience et la confiance qu'il m'a accordé. A travers ces trois années de doctorat, il m'a transmis sa rigueur scientifique et son exigence.

Je souhaite remercier Fabien CUVILLY, Emmanuel CADEL et Célia CASTRO, membres du service technique du GPM, sans qui les analyses physiques n'auraient pas été possibles.

Mes profonds remerciements vont à Martin Brault membre du service technique du GPM, qui m'a formé sur le microscope à émission de photon, et m'a beaucoup assisté dans mes débuts sur les analyses à émission de photon.

Je souhaite remercier aussi Monsieur Bertrand BOUDART et son équipe du LUSAC pour leur collaboration sur les mesures RAMAN.

Ma reconnaissance va également à Mohamed MASMOUDI, Maître de conférences au GPM, pour ses échanges sur les mesures et analyses C-V, ainsi que pour son sens d'humour et l'ambiance joyeuse qu'il crée lors de nos séances de travail.

Cela risque d'être difficile de citer tout le monde au GPM, alors ne m'en veuillez pas trop si votre nom n'apparaît pas explicitement. Merci à l'ensemble de mes collègues, en particulier ceux de l'équipe ERDEFI, pour leur accueil au sein du laboratoire et l'aide qu'ils ont pu m'apporter tout au long de ces travaux. Pascal, Jean-Batiste, Alexis, et Andres, travailler et discuter avec vous a été un plaisir. Je tiens à remercier en particulier Wadia pour ses encouragements durant la phase de rédaction et pour tous l'aide et le soutien qu'il m'a apporté. Tu es une vraie source inépuisable de motivation et un vrai ami sur lequel on peut toujours compter.

J'ai toujours considérée mes amis comme une extension de ma propre famille. Je me dois donc de les citer tous. Une pensée toute particulière à Dalal, Saida, chadia, Dina, Sahar, et fatima zohera.

Cette thèse m'a cependant éloigné de mon pays natale (le Maroc), et par conséquent de ma famille que je tiens à remercier chaleureusement pour leur affection et les moments de décompression qu'ils ont pu m'offrir à chaque fois que j'ai eu l'occasion de les voir. Une mention spéciale est décernée à mes parents pour m'avoir toujours soutenu dans la poursuite de mes études, ainsi qu'à ma sœur Nadia et mon frère Mohamed pour leurs encouragements et leurs énergie communicative même à longue distance. A tous les membres de ma famille un grand merci.

Dédicaces

A ma très chère mère Nouzha Halouiya

Autant de phrases aussi expressives soient-elles ne sauraient montrer le degré d'amour et d'affection que j'éprouve pour toi. Tu m'as comblé avec ta tendresse et affection tout au long de mon parcours. Tu n'as cessé de me soutenir et de m'encourager durant toutes les années de mes études. En ce jour mémorable, pour moi ainsi que pour toi, reçoit ce travail en signe de ma vive reconnaissance et mon profond estime.

A la mémoire de mon défunt Père Massoud Moulitif

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.

A tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer

Table des matières

Remerciements	i
Liste des Figures	ix
Liste des tableaux	xvii
Abréviations	xix
Symboles	xxi
Introduction générale	1
1 Analyse de défaillance des composants électroniques : la problématique liée à la localisation et l'identification de la nature de défaut	7
1.1 Analyse de défaillance	7
1.2 Techniques de localisation de défauts	9
1.2.1 Cristaux liquides	9
1.2.2 Microscopie infrarouge	10
1.2.3 Techniques basées sur le faisceau d'électrons	10
1.2.3.1 CIVA : Charge Induced Voltage Alteration	13
1.2.3.2 EBIC : Electron Beam Induced Current	14
1.2.3.3 EBAC : Electron Beam Absorbed Current	15
1.2.4 Techniques basées sur un faisceau optique	18
1.2.4.1 OBIC : Optical Beam Induced Current	20
1.2.4.2 LIVA : Light Induced Voltage Alteration	21
1.2.4.3 OBIRCH : Optical Beam Induced Resistance Change	21
1.2.4.4 TIVA : Thermally Induced Voltage Alteration	23
1.2.4.5 SEI : Seebeck Effect Imaging	24
1.2.5 Techniques basées sur l'émission de lumière	25
1.2.5.1 Luminescence et principe d'émission de lumière	25
1.2.5.2 Microscopie à émission de photons	26
1.2.5.3 Microscopie à émission de lumière dynamique (PICA)	27
1.2.6 Choix de la technique de localisation	29
1.3 Conclusion	29

2	Introduction à la Microscopie à émission de photons conventionnelle et spectrale.	33
2.1	Introduction	33
2.2	Microscopie à émission de photons conventionnelle	34
2.2.1	Principe de mesure	34
2.2.2	Physique de l'émission de lumière	35
2.2.2.1	L'émission de lumière dans le Si	38
2.2.2.2	L'émission de lumière dans le GaAS	39
2.2.3	Limitations et amélioration de la technique	39
2.2.3.1	Nature de défaut	39
2.2.3.2	Détection de lumière	40
2.2.3.3	Préparation d'échantillon	42
2.3	Microscopie à émission de photons spectrale	44
2.3.1	Notion de la signature spectrale	44
2.3.2	Systèmes d'analyse spectrale en émission de photons	45
2.3.2.1	Système à base de filtre passe bande	45
2.3.2.2	Système à base d'un miroir semi-ellipsoïdal	46
2.3.2.3	Système à base d'un prisme	47
2.3.3	Système d'analyse spectrale en émission de photons à base d'un réseau de diffraction	48
2.3.3.1	Théorie de la diffraction	49
2.3.3.2	Description et étalonnage du système	54
2.4	Méthodologie d'étude	59
2.5	Conclusion du chapitre	60
3	Application de la microscopie à émission de photons spectrale à l'analyse de défaillance des MOSFETs SiC de puissance	63
3.1	Introduction	63
3.2	Présentation du composant d'étude	64
3.3	Mécanismes de défaillance des MOSFETs de puissance	65
3.3.1	Effet des porteurs chauds (Hot Carrier lifetime)	66
3.3.2	Electromigration	67
3.3.3	Time-Dependent Dielectric Breakdown (TDDB)	67
3.4	Origine de l'émission de lumière dans les MOSFETs en Carbure de silicium	68
3.5	Caractérisation d'un véhicule de test de référence en photoémission classique et en photoémission spectrale	69
3.6	Étude de la robustesse des MOSFETs SiC aux décharges électrostatiques	77
3.6.1	Description du test	79
3.6.2	Caractérisation électrique	80
3.6.3	Analyses en microscopie à émission de photons	83
3.6.4	Analyses en microscopie à émission de photons spectrale	84
3.6.5	Analyses physique	85
3.6.5.1	Nano-SIMS	86
3.6.5.2	Sonde atomique	88
3.6.5.3	Mesure C-V	90
3.6.5.4	EBIC	93
3.7	Caractérisation de l'effet de la température sur les MOSFETs SiC	94

3.7.1	Etude A : Stress à paliers de température	95
3.7.1.1	Description du test	95
3.7.1.2	Caractérisation électrique	97
3.7.1.3	Analyses en microscopie à émission de photons spectrale	99
3.7.2	Étude B : Stress à température constante	102
3.7.2.1	Description du test	102
3.7.2.2	Caractérisation électrique	103
3.7.2.3	Analyses en microscopie à émission de photons	108
3.7.2.4	Analyses en microscopie à émission de photons spectrale	108
3.8	Conclusion du chapitre	109
4	Application de la microscopie à émission de photons spectrale à l'analyse de défaillance des HEMTs AlGa_N/Ga_N	113
4.1	Introduction	113
4.2	Généralités sur les HEMTs AlGa _N /Ga _N	114
4.3	Mécanismes de défaillance des HEMTs AlGa _N /Ga _N	115
4.4	Émission de lumière dans les HEMTs AlGa _N /Ga _N	117
4.5	Présentation du composant d'étude	118
4.6	Description du test et caractérisation électrique	120
4.7	Analyse en microscopie à émission de photons	123
4.8	Analyse en spectrométrie RAMAN	127
4.9	Analyse en microscopie à émission de photons spectrale	130
4.10	Analyse Micro-structurale	134
4.10.1	Préparation d'échantillon	134
4.10.2	Observations au Microscope Électronique en Transmission	135
4.11	Conclusion du chapitre	140
	Conclusion générale et perspectives	143
	Publications relatives à ce travail	147
1	Articles de revue	147
2	Chapitres d'ouvrage	147
3	Conférences internationales avec Actes et Comité de Lecture	148
4	Autres Conférences	148
	Bibliographie	149
	Résumé/Abstract	172

Table des figures

1	Comparaison des propriétés des semi-conducteurs [3]	3
1.1	Méthodologie d'une analyse de défaillance	8
1.2	(a) : Influence des cristaux liquides sur le faisceau de lumière incident pour $T < T_{transition}$. (b) : Influence des cristaux liquides sur le faisceau de lumière incident pour $T > T_{transition}$ [2]	10
1.3	Principe de la thermographie IR	11
1.4	Les effets produits suite au bombardement par faisceau d'électrons	12
1.5	Formation de l'image en électrons secondaires.	12
1.6	Principe général du CIVA	13
1.7	Produit d'interaction d'un faisceau d'électrons primaire de 10 keV avec le SiO_2	13
1.8	Principe de la mesure EBIC	14
1.9	Mesure EBIC réalisée chez PointElectronic (Halle) sur un de nos échantillons HEMT AlGaIn/GaN : (a) Image MEB, (b) Image EBIC, (c) MEB/EBIC Image	14
1.10	Image EBIC typique d'une couche GaN obtenue pour $E_b = 35eV, I_b = 3.10^{-10} A$ [30]	15
1.11	Schéma illustrant les différentes géométries utilisées dans la technique EBIC : (a) parallèle et (b) perpendiculaire à la jonction pn [31]	15
1.12	Principe de la technique EBAC	16
1.13	Principe de la technique RCI	17
1.14	Représentation de l'interaction du faisceau laser avec un CI. Les perturbations induites dans le CI peuvent être détectées par mesures optiques ou par mesures électriques.	18
1.15	Classement non exhaustif des techniques de stimulation par faisceau laser	19
1.16	Configuration d'amplification de l'OBIC	20
1.17	Principe de l'OBIRCH [73]	22
1.18	Analyse OBIRCH réalisée au GPM par la face avant en Mode diode drain-source d'un MOSFET type aéronautique vieilli (Thales) en ESD	22
1.19	Analyse OBIRCH par la face arrière d'un MOSFET SiC neuf en mode transistor. (a) Image du Pattern, (b) Image OBIRCH, (c) Superposition de l'image (a) et (b)	23
1.20	Principe de la technique TIVA [77]	23
1.21	Principe de la technique SEI	24
1.22	Jonction latérale (gauche), jonction verticale (droite) non polarisée et soumise à une stimulation thermique laser	25
1.23	Principe de la luminescence	25
1.24	L'émission de lumière d'un transistor MOS latéral	28

1.25	Détection résolue en temps des émissions de photons à l'aide d'une technique TRE. Deux courbes représentent les photons émis par un n-FET et par un p-FET de l'inverseur quand un signal 0/1 a été envoyé en boucle sur Vin [101] [10]	29
1.26	Localisation d'un défaut ponctuel d'un de nos composants MOSFET stressé en ESD. (a) par microscopie à émission de photon. (b) par OBIRCH	31
1.27	Techniques usuelles de localisation de défaut	31
2.1	Système de base d'un microscope à émission de photons.	34
2.2	(a) image du pattern d'un MOSFET SiC ouvert en face arrière. (b) Image d'émission. (c) Superposition des deux images (a) et (b) [104].	35
2.3	Les différentes transitions possibles de l'émission de lumière	35
2.4	Illustration du phénomène de photoémission dans les semi-conducteurs à gap direct (gauche) et gap indirect (droite)	36
2.5	Localisation de défaut en terme de longueur d'onde	40
2.6	Réponse spectrale des détecteurs conventionnels dans la PEM [2].	41
2.7	Schéma standard d'une lentille à immersion solide hémisphérique (h-SIL) [119]	42
2.8	Ouverture en face avant d'un MOSFET Si de puissance (a) Image en Rayons X, (b) Après Ablation Laser, (c) Après Attaque chimique	43
2.9	Vue optique de la face avant du (a) MOSFET(A), (b) MOSFET(B) (Présence d'une couche de métallisation sur la face avant de ces deux composants qui rend la PEM en face avant impossible)	43
2.10	(a) Vue en FIB d'une cellule élémentaire d'un MOSFET Si de puissance neuf : (2 μm de largeur). (b-c) Ouverture face arrière : (b) Le MOSFET est cassé au milieu lors de l'amincissement du substrat. (c) Fissure de la puce du MOSFET lors de l'amincissement du substrat.	44
2.11	(a) Vue optique d'une micro-section (polissage) d'un MOSFET Si de puissance neuf enrobé dans une résine conductrice. (b) Composant enrobé	45
2.12	Les différentes étapes d'ouverture en face arrière d'un MOSFET de puissance	45
2.13	Enveloppe spectrale des différents mécanismes de défaillance des composants Si [124][125].	46
2.14	Schéma d'un microscope à émission de photons spectrale avec des filtres passe bande [124]	46
2.15	Microscope à émission de photons spectrale à base d'un miroir semi-ellipsoïdale comme collecteur [123]	47
2.16	Schéma d'un microscope à émission de photons spectrale développé par Kort [128]	47
2.17	Schéma d'un microscope à émission de photons spectrale développé par Rastras [130]	48
2.18	Analyse spectrale en photoémission avec un prisme [131]	49
2.19	Principe général d'un réseau de diffraction	50
2.20	Type de réseau de diffraction : Droite : Réseau par réflexion, Gauche : Réseau par transmission	50
2.21	Réseau blazé : (a) : par Transmission, (b) : par Réflexion	51
2.22	Représentation d'un faisceau gaussien en 2 dimensions se propageant suivant l'axe z	52

2.23	Profil d'intensité d'un faisceau gaussien polychromatique à la sortie d'un réseau de diffraction	54
2.24	(a) Microscope à émission de photon PHEMOS 1000 à l'intérieur d'une chambre noire. (b) Schéma du microscope.	55
2.25	L'insertion du réseau de diffraction dans le chemin optique du microscope.	56
2.26	Spectre réel de la diode électroluminescente RVB extrait par un analyseur de spectre optique.	56
2.27	Diffraction de la source ponctuelle illuminée par une diode électroluminescente multi-couleur (Bleu & Rouge)	57
2.28	Profil d'intensité en fonction des positions image	57
2.29	Tracé automatique de la droite avec affichage de ses caractéristiques	58
2.30	Traitement des spectres : (a) : Spectres d'un composant neuf (bleu) et d'un composant stressé en HTRB (vert), (b) : Spectres fittés (composant neuf (bleu) et composant stressé (rouge)), (c) extraction des gaussiennes du spectres Neuf, (d) extraction des gaussiennes du spectres, (e) paramètres des gaussiennes	59
2.31	Méthodologie d'analyse de défaillance	60
2.32	Étapes d'analyse spectrale en photoémission	60
3.1	Vue de la structure d'une cellule élémentaire du D-MOSFET (Haut). Vue en microscope électronique à balayage de la structure du D-MOSFET SiC (Bas)	65
3.2	Analyse en EDX du composant d'étude	66
3.3	Génération et injection d'électrons chauds dans un transistor MOSFET à canal de type n [144].	67
3.4	Les voids et les saillies entraînent la défaillance du circuit	67
3.5	(a) La dégradation du diélectrique se produit à cause de la rupture des liaisons/ la création des pièges dans le diélectrique et sur l'interface Oxyde/Si. (b) Le piégeage des trous suivi d'un piégeage d'électrons se poursuit jusqu'au point de la rupture catastrophique, qui crée un court-circuit du poly-grille avec le substrat de silicium [153]	68
3.6	Émission de lumière d'une diode de protection en polarisation directe	69
3.7	Émission de lumière suite à une fuite de courant dans l'oxyde	70
3.8	Schéma 3D de la structure du composant d'étude	70
3.9	Ouverture Face avant du composant d'étude	71
3.10	Étapes d'ouverture en Face arrière du composant d'étude	71
3.11	Composant Neuf : A gauche : Caractéristique de sortie $I_{ds} = f(V_{ds})$ pour $V_{gs}=2.6V$ vs PE, à droite : Caractéristique d'entrée $I_{ds} = f(V_{gs})$ pour $V_{ds}=8.6V$ vs PE	72
3.12	Signature en PE Vs Polarisation électrique	73
3.13	haut : Diffraction de la signature en EL du composant d'étude (Pour $V_{ds} = 16V; I_{ds} = 15.536mA; V_{gs} = 1.63V$). Bas : Forme de diffraction des différents mécanismes d'EL dans un MOSFET [135].	74
3.14	Image de la coupe du composant d'étude	74
3.15	Origine de l'émission de lumière dans le composant d'étude	75
3.16	Visualisation de l'EL guidée sur la coupe du composant	75
3.17	Génération et guidage de la lumière dans le MOSFET sous test	75

3.18	Indice de réfraction des matériaux constituant le MOSFET sous test [159] [157] [158]	76
3.19	Électroluminescence et propagation de la lumière : (1) pour $V_{ds}=8V$; $I_{ds}=15,601$ mA ; $V_{gs}=2,60V$. (2) pour $V_{ds}=10V$; $I_{ds}=22,167$ mA ; $V_{gs}=2,60V$	77
3.20	Circuit de base d'un pistolet ESD selon la norme " EN 61000-4-2 " (Décharge par Contact).	80
3.21	Évolution du réseau de sortie du transistor C07 suite au stress ESD	82
3.22	Évolution du réseau de sortie du transistor C46 suite au stress ESD	82
3.23	Évolution de la caractéristique d'entrée du transistor C07 suite au stress ESD	83
3.24	Évolution de la caractéristique d'entrée du transistor C07 suite au stress ESD	83
3.25	Comparaison de la signature en PE d'un composant stressé versus le composant de référence	84
3.26	Composant Vieilli : A gauche : Caractéristique de sortie $I_{ds} = f(V_{ds})$ pour $V_{gs}=2,91V$ versus PE, à droite : Caractéristique d'entrée $I_{ds} = f(V_{gs})$ pour $V_{ds}=8,5V$ vs PE	85
3.27	Comparaison du spectre du composant neuf et du composant vieilli en ESD à 8kV : C06 : Neuf : $V_{ds}=8,8V$; $I_{ds}=18,76$ mA ; $V_{gs}=2,67V$. C07 : Vieilli $V_{ds}=11,8$ V ; $V_{gs} =2,19$ V ; $I_{ds}= 27,651$ mA [155]	86
3.28	Comparaison entre le spectre du composant neuf (C06) et celui du composant vieilli en ESD à 6kV (C46)	86
3.29	Principe d'un spectromètre de masse d'ions secondaires [177]	87
3.30	Cartographie SIMS d'une cellule d'un transistor neuf : (31P) : Révélation de la présence du phosphore. (27Al) : Présence de l'aluminium en source et sur le caisson P. (12C14N)et (28Si) : Révélation du type du substrat (SiC)	88
3.31	Principe de la sonde atomique tomographique. Les atomes évaporés depuis la surface de l'échantillon sont identifiés par spectrométrie de masse à temps de vol. Leurs positions sont calculées (projection quasi stéréographique) à partir des coordonnées des impacts sur le détecteur spatial. L'aire grisée de l'échantillon représente le volume analysé.[178]	89
3.32	Préparation au FIB d'une pointe de rayon de 100 nm	90
3.33	Spectre de masse 1 : Présence de Silicium (Si), Carbone (C), Aluminium (Al), Phosphore(P)	90
3.34	Reconstruction 3D du sommet de la pointe	91
3.35	Caractéristique C-V à 1 MHz du C46 avant et après stress ESD	92
3.36	Comparaison de la caractéristique C-V à 1 MHz d'un composant Neuf à celle d'un composant Vieilli	93
3.37	Localisation du défaut : (top) OBIRCH, (middle) PEM, et (bottom) Analyse EBIC	94
3.38	Analyses en EBIC de la cross section du composant stressé à des grossissements et des tensions différents	95
3.39	Banc du vieillissement	97
3.40	Synopsis du test de vieillissement de grille statique en palier de température	97
3.41	Évolution de $R_{ds(on)}$ et V_{th} du C13 au cours du vieillissement HTRB	98
3.42	Évolution du réseau de sortie du transistor C13 au cours du vieillissement HTRB	98

3.43	Évolution de la tension du pincement des transistors C11 et C12 au cours du vieillissement HTGB	99
3.44	Évolution du réseau d'entrée du transistor C11 au cours du vieillissement HTGB	99
3.45	Évolution de la résistance à l'état passant des transistors C11 et C12 au cours du vieillissement HTGB	100
3.46	Évolution du réseau de sortie du transistor C11 au cours du vieillissement HTGB	100
3.47	Évolution du courant de fuite de drain des transistors C11 et C12 au cours du vieillissement HTGB	101
3.48	Évolution du courant de fuite de drain du transistor C13 au cours du vieillissement HTRB	101
3.49	Comparaison de la réponse en PE du composant vieilli (C13) versus le composant de référence (C06)($V_{ds} = 9V ; I_{ds} = 18,961mA$)	102
3.50	Comparaison entre le spectre du composant neuf et celui du composant vieilli en HTGB	102
3.51	Comparaison des caractéristiques C-V d'un composant vieilli en HTRB (C13) avec les caractéristiques de quatre composants neufs.	103
3.52	Caractéristique d'entrée du C50 avant et après stress ($I_{ds} = f(V_{gs})$ à 25 °C)	104
3.53	Caractéristique C-V du C50 avant et après stress HTRB ($C_{gs} = f(V_{gs})$ à 1MHz)	105
3.54	Caractéristique C-V du C50 avant et après stress HTRB ($C_{ds} = f(V_{ds})$ à 1MHz)	105
3.55	Modélisation de la distribution de charges après le stress pour $V_{ds}=960V$	106
3.56	Schéma équivalent de la structure du D-MOSFET après stress	106
3.57	Caractéristiques de sortie du C50 avant et après stress ($I_{ds} = f(V_{ds})$ à 25 °C)	107
3.58	pour $I_{ds} = 22.1mA$: Signature en émission de photon du composant de référence (Gauche). Signature du composant vieilli(C50)	108
3.59	Localisation en face arrière des spots du transistor C50	108
3.60	Spectre d'émission de photons du (C50) après stress : (a) Spot sous la grille côté source. (b) Diffraction du Spot. (c) Extraction du spectre (pour $I_{ds} = 22.3mA$).	109
3.61	Spectre du deuxième spot lumineux Vs Spectre du composant référence	110
4.1	Structure d'un HEMT AlGaIn/GaN	115
4.2	Mécanismes de dégradation dans les structures HEMTs AlGaIn/GaN	117
4.3	Boîtier non adapté du CHK025A-SOA	119
4.4	Image MEB du composant décapsulé	119
4.5	Mesure de diode en direct pendant le vieillissement	120
4.6	Mesure de diode en inverse pendant le vieillissement	121
4.7	Évolution de la caractéristique de sortie avec le vieillissement pour le point de repos ($V_{ds},V_{gs}=(0V,0V)$)	122
4.8	Évolution de la caractéristique de sortie avec le vieillissement pour le point de repos ($V_{ds},V_{gs}=(-7V,0V)$)	122
4.9	Évolution de la caractéristique de sortie avec le vieillissement pour le point de repos ($V_{ds},V_{gs}=(-7V,50V)$)	123

4.10	Caractéristique d'entrée du composant d'étude pour plusieurs points de repos	124
4.11	Évolution de la caractéristique d'entrée avec le vieillissement pour le point de repos (0V,0V)	124
4.12	Ouverture face arrière : Étapes de polissage du composant	125
4.13	Localisation des spots sur un composant neuf en photo-émission : (a) : en mode diode (Grille - Source) : ($V_{gs} = -15V$). (b) : en mode diode : $V_{gd} = -30V$	126
4.14	(a) : Distribution en EL du composant neuf polarisé en mode transistor : (V_{gs}, V_{ds}) = (-7V, 30V). (b) : Distribution en EL du composant vieilli polarisé en mode transistor : (V_{gs}, V_{ds}) = (-7V, 30V). (c) : Distribution en EL du composant vieilli polarisé en mode transistor (V_{gs}, V_{ds})=(-7V, 50V).	127
4.15	Localisation des spots. (a) : Spot sous la grille côté source. (b) : (1) Spots sous la grille côté drain, (2) spots au milieu de la grille.	128
4.16	Localisation en PE des doigts à analyser en Raman	129
4.17	(a) : Composant d'étude. (b) : Branchement pour l'analyse Raman	129
4.18	(a) :Déplacements atomiques associés aux modes optiques de vibration des cristaux dans la structure hexagonal wurtzite. (b) : Géométrie Z(-,-) \bar{Z} utilisée pour l'étude des spectres Raman du GaN. (c) : Règle de sélection en rétrodiffusion sur la face (0001) du système hexagonal wurtzite [220].	130
4.19	Variation du nombre d'onde du spectre Raman le long de la grille de deux doigts du transistor : (a) Variation du mode E2(high) du GaN. (b) Variation du mode A1(LO) du GaN. (c) Variation du mode A1(LO) du SiC. (d) Variation du mode SiC du SiC.	131
4.20	Variation de la largeur mi-hauteur du spectre Raman le long de la grille de deux doigts du transistor	132
4.21	Diffraction d'un spot de PE d'un composant neuf	132
4.22	Comparaison du spectre d'émission des composant neuf et composant vieilli	133
4.23	Les niveaux d'énergie autorisés à l'intérieur de la bande interdite du GaN causés par des défauts intrinsèques et des dislocations [223]	133
4.24	Position des deux lames : TEM1 (L1) sur le spot de PE et TEM2 (L2) sur un endroit où il y a pas de spot	134
4.25	Récupération du composant en face avant	135
4.26	Préparation de la lame TEM (Usinage au FIB) : (a) Dégagement du pont au FIB par la face frontale.(b) : Dégagement du bord de l'échantillon. (c) Révélation de la structure (d) : Extraction de la lame TEM après l'avoir soudé sur une pointe	136
4.27	Amincissement de la lame TEM : (a) Avant amincissement. (b) Après l'amincissement à faible courant.	136
4.28	Lame TEM1 : (a) et (b) Vue en mode STEM-LAADF de l'échantillon, (c) Vue en mode STEM-HAADF de l'échantillon	137
4.29	Lame TEM1 : (a) : Vue en TEM en champ clair (BF) en mode 2 ondes (avec la caméra Orius) des dislocations en dessous de la grille. (b) : L'échantillon est orienté selon l'axe de zone [01-10] et nous avons pris le vecteur $g=[0002]$	137
4.30	Lame TEM2 : (a) et (b) Vue en mode STEM-LAADF de l'échantillon, (c) Vue en mode STEM-HAADF de l'échantillon	138

4.31 Électroluminescence d'un HEMT AlGa _N /Ga _N due à la présence des dislocations	138
4.32 Ligne de profil EDS perpendiculaire aux dislocations	139
4.33 Analyse EDS des deux points	139
4.34 Cartographie EDX au milieu de la grille	140
4.35 Cartographie EDX au coin de la grille	140
4.36 Cartographie EDX du contact de drain	141
4.37 Cartographie EDX du contact de source	141

Liste des tableaux

3	caractéristiques physiques des principaux matériaux semi-conducteur	3
1.1	Comparaison des techniques de localisation de défaut basées sur un faisceau d'électrons	17
1.2	Les types de luminescence	26
1.3	Comparaison des techniques de localisation de défaut : Type de défauts localisés et limitations	30
2.1	Les types d'émissions avec leurs conditions correspondantes	38
2.2	Spécifications de la caméra Si-CCD implémenté dans le PHEMOS1000 . . .	55
3.1	Récapitulatif des diverses normes ESD [173].	79
3.2	Niveau de conformité pour la norme IEC 61000-4-2 [173].	79
3.3	Évolution des caractéristiques électriques des composants SiC suite au stress ESD	81
3.4	Protocoles des tests de vieillissement & Récapitulatif du stress appliqué sur chaque MOSFET	96
3.5	Évolution des caractéristiques électriques après le stress HTRB de 24h à 150°C et 1100V	103
4.1	Quantification du “ gate-lag ” et du “ drain-lag ” avant et après le stress .	121

Abréviations

GPM	G roupe de P hysique des M atériaux
CI	C ircuit I ntégré
DUT	D evice U nder T est
MOS	M etal O xide S emiconductor
MOSFET	M etal O xide S emiconductor F ield E ffect T ransistor
HEMT	H igh E lectron M obility T ransistor
SiC	S ilicon C arbide
GaN	G allium N itride
GaAS	G allium A rsenide
PEM	P hotoemission M icroscopy
SPEM	S pectral P hotoemission M icroscopy
EL	E lectroluminescence
PL	P hotoluminescence
HTRB	H igh T emperature R everse B ias
HTGB	H igh T emperature G ate B ias
SAM	S canning A coustic M icroscopy
FIB	F ocused I on B eam
MEB	M icroscopie É lectronique à B alayage
MET	M icroscopie É lectronique en T ransmission
SIMS	S econdary I on M ass S pectrometry
CIVA	C harge I nduced V oltage A lteration
EBIC	E lectron B eam I nduced C urrent
EBAC	E lectron B eam A bsorbed C urrent
TIVA	T hermally I nduced V oltage A lteration
OBIRCH	O ptical B eam I nduced R esistance C hange

RCI	Resistive Contrast Imaging
SEI	Seebeck Effect Imaging
OBIC	Optical Beam Induced Current
LIVA	Light Induced Voltage Alteration
LADA	Laser Assisted Device Alteration
SDL	Soft Defect Localization
RIL	Resistive Interconnection Localization
TLSIM	Thermal Laser Signal Injection Microscopy
DVM	Delay Variation Mapping
PVM	Phase Variation Mapping
NBC	National Bureau of Standard
ESD	Electrostatic Discharge
EOS	Electrical Overstress
HBM	Human Body Model
MM	Machine Model
CDM	Charged Device Model
DEL	Diode Électroluminescente
PICA	Picosecond Imaging Circuit Analysis
TRE	Time Resolved Emission
IR	Infrarouge
UV	Ultraviolet
InGaAs	Indium Gallium Arsenide
HgCdTe	Mercury Cadmium Telluride
Si-CCD	Silicon Charge Coupled Device
EDX	Energy Dispersive X-ray
TDDDB	Time Dependent Dielectrique Breakdown
RF-HTOL	Radio Frequency High Temperature Operating Life
STEM	Scanning Transmission Electron Microscopy
LAADF	Low Angle Annular Dark Field
HAADF	High Angle Annular Dark Field

Symboles

E_g	Bande interdite
V_{sat}	Vitesse de saturation
E_{crit}	Champ électrique critique
K	Conductivité thermique
$T_{transition}$	Température de transition
ΔI	Variation du courant
R	Résistance du composant
V_{ds}	Tension drain-source
V_{gs}	Tension grille-source
Q_{1-2}	Pouvoir thermoélectrique
V_{th}	Tension de seuil
$R_{ds(on)}$	Résistance à l'état passant
I_{dss}	Courant de fuite de drain
I_{gss}	Courant de fuite de grille
I_{sat}	Courant de saturation
C_{gs}	Capacité grille-source
C_{ds}	Capacité drain-source
SiO_2	Dioxyde de silicium
E_{ph}	Énergie des photons émis
K	Constante de Boltzman
h	Constante de Planck
ν	Fréquence
ϵ_0	Permittivité du vide
D	Diamètre de la fente circulaire du système optique
$O.N$	Ouverture numérique

n_i	Indice du milieu
a	Pas du réseau de diffraction (la période)
W_0	"Waist" du faisceau gaussien
$W(z)$	Largeur du faisceau gaussien sur l'axe optique
z_0	Longueur de Rayleigh
$R(z)$	Rayon de courbure du faisceau gaussien par rapport à l'axe optique
k	Nombre d'onde
$t(x)$	Coefficient de transmission du réseau de diffraction
N	Nombre de motifs
e	Charge élémentaire
M	Masse de l'ion
v	Vitesse de l'ion
n	Charge de l'ion
L	Position du détecteur
t_{vol}	Temps de vol
V_{Fb}	Tension bande-plate
Q_{ox}	Charge fixe dans l'oxyde
Q_m	Charge mobile à l'interface SiC/SiO ₂
Q_{it}	Charge d'interface SiC/SiO ₂
C_{ox}	Capacité d'oxyde
Ψ_B	potentiel du bulk
ϵ_{SiC}	permittivité du SiC
N_{dop}	Concentration de dopage
L_{eff}	Longueur efficace du canal entre la source et le drain
W	Largeur du canal
α_{lim}	Angle limite sous lequel deux objets sont séparables
μ	Mobilité des électrons
ϵ	Permittivité diélectrique
λ	Longueur d'onde
ω_L	Fréquence de la lumière
$\psi_n(x, z)$	Onde plane
θ_n	Angle relatif à l'orientation du vecteur \vec{k}_n par rapport à l'axe de propagation

Symboles

$\phi(x)$	Coefficient de transmission du motif
ϕ_{MS}	Travail Metal-Semiconducteur

Introduction générale

La micro-électronique est de nos jours en développement accru dû à l'élargissement du champ d'application des circuits Intégrés (CI) et des transistors. Actuellement, les transistors occupent la quasi-totalité des biens matériels utilisés dans les systèmes embarqués. Ils sont utilisés dans divers secteurs tels que le spatial, l'aéronautique, les télécommunications, ou encore le domaine de l'industrie automobile. Selon l'application visée, le transistor doit assumer correctement ses fonctionnalités dans des conditions spécifiques, suivant un profil de mission déterminé, pendant plusieurs années. La panne du transistor peut avoir des conséquences plus ou moins importantes en fonction de l'application. Par exemple, le secteur spatial exige une grande fiabilité et maîtrise des risques d'utilisation, vu que le coût et les conséquences des pannes dans ce domaine sont très graves.

Afin d'atteindre un haut niveau de qualité des composants, et assurer les performances des CI et des composants électroniques, plusieurs laboratoires d'analyse de défaillance ont été créés au sein des entreprises depuis les années 1960 [1]. En effet, ces laboratoires mènent des études visant à juger la qualité de fabrication des composants électroniques à travers des essais approfondis durant lesquels les dispositifs en question sont placés dans des conditions expérimentales très proches des conditions réelles de fonctionnement. Ces tests permettent de juger la qualité de conception et répondre au cahier de charge, que cela soit au niveau des performances électriques ou au niveau de la résistance aux conditions d'utilisation environnementales. Si une anomalie est détectée au cours de ces tests, une analyse de défaillance va être menée afin de comprendre l'origine de la défaillance, déterminer les mécanismes de défaillances, et mettre en place des actions correctives.

Une analyse de la défaillance doit faire un diagnostic et une analyse physique du défaut, pour distinguer tout d'abord entre la défaillance qui est due à un mauvais usage du composant (fausse manœuvre d'un opérateur, environnement électrique mal adapté) et entre un dysfonctionnement intrinsèque du dispositif. S'il s'agit d'un défaut intrinsèque au composant, alors il faut déterminer si le problème est présent dans tout le lot de fabrication ou s'il est uniquement présent sur un seul individu. L'analyse de défaillance

permet de clarifier la cause de la défaillance et de prendre par la suite des actions correctives durant la conception ou lors du procédé de fabrication, afin d'éliminer le défaut à la source et d'éviter la réapparition ou la reproduction de ce dernier. Outre ce travail d'investigation, l'analyse de défaillance comporte une étape primordiale de localisation de défaut. Il existe plusieurs techniques de localisation de défauts telles que celles basées sur la stimulation par faisceau d'électrons ou optique ou encore l'émission de lumière. Ces techniques ont beaucoup évolué au cours des années avec l'évolution des architectures des circuits (VLSI et ULSI) et des composants électroniques. La miniaturisation des circuits, la multiplication des niveaux d'interconnexion, l'augmentation de la densité d'intégration et l'évolution des techniques d'encapsulation sont des paramètres limitant l'application des techniques de localisation conventionnelles qui ont dû évoluer afin de suivre le progrès technologique dans la micro-électronique.

Une des techniques de localisation de défauts qui a pu surmonter le défi de la complexification des composants de nouvelle génération, est la technique de microscopie à émission de photons. Nous utiliserons cette technique pour la localisation et l'identification de défauts des technologies de composants de puissance dédiés à des applications automobile et aéronautique. Cette technique est basée sur la localisation de la lumière émise par le circuit lors de sa configuration défaillante ou en fonctionnement normal. Dans le but d'identifier la nature de cette émission et remonter au mécanisme de défaillance, cette technique a évolué pour donner naissance à une autre émergente appelée microscopie à émission de photons spectrale. Cette dernière vise à relever la signature spectrale de la défaillance et la corréler avec le mécanisme de défaillance qui lui correspond. En effet chaque mécanisme de défaillance est caractérisé par sa propre enveloppe spectrale. La microscopie à émission de photons spectrale existe avec différents spectromètres depuis un certain temps. Elle a souvent été utilisée avec succès sur les composants à base de silicium. Elle a prouvé son efficacité dans l'analyse de défaillance des composants Si et GaAs, ce qui nous a poussé à étendre son champ d'applications et de s'en servir pour étudier d'autres technologies de composants. Il s'agit des composants de puissance à base de matériaux à large bande interdite.

En effet l'industrie de l'électronique de puissance est dominée depuis les années 1950 et jusqu'à aujourd'hui, par le silicium. Ce matériau présente ainsi une maturité technologique liée à la fabrication et au coût de production qui rend tout autre matériau semi-conducteur moins compétitif que lui. Cependant le silicium présente des limitations vis-à-vis des applications de puissance exigeant la haute tension et la haute tenue en température. C'est pour pallier ces problèmes que les recherches se sont tournées récemment vers les semi-conducteurs à large bande interdite appelés " grand gap " : nitrure de

gallium (GaN) et carbure de silicium (SiC). Comme on peut voir sur la figure 1 les matériaux grand gap possèdent plusieurs propriétés qui permettent de les mettre en avant pour les applications hyper-fréquences de puissance [2].

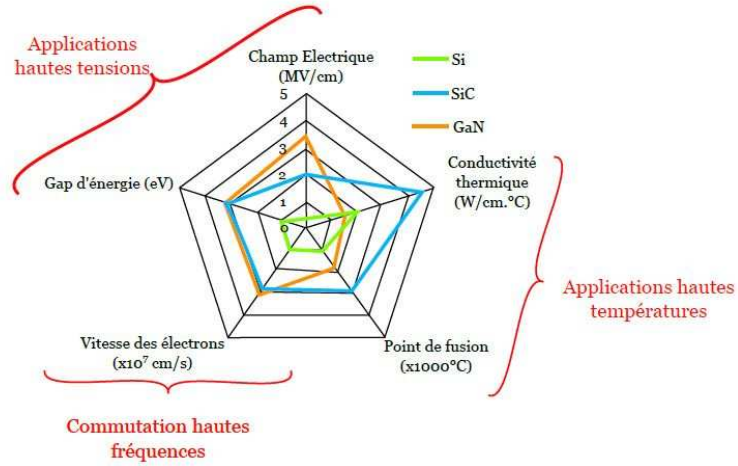


FIGURE 1: Comparaison des propriétés des semi-conducteurs [3]

De plus, les matériaux à grand gap ont montré une plus grande résistance aux radiations [4], [5], en particulier vis-à-vis des particules α qui représentent un problème dans les transistors MOS sur silicium [2]. Le tableau 3 montre les caractéristiques physiques des semi-conducteurs et établissent une comparaison entre eux. Les propriétés intrinsèques du GaN et du SiC sont nettement supérieures à celles du silicium à des températures plus élevées (Tableau 3) [6] [3].

	Si	GaAs	4H-SiC	GaN
Bande interdite (eV)	1,12	1,42	3,26	3,43
Mobilité des électrons ($cm^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$) à 300K	1350	6000	800	1500
V_{sat} : Vitesse de saturation des électrons ($10^7 cm \cdot s^{-1}$)	1,0	2,0	2,0	2,7
E_{crit} : Champ électrique critique ($MV \cdot cm^{-1}$)	0,3	0,4	2,0	3,0
Conductivité thermique ($W \cdot cm^{-1} \cdot K^{-1}$)	1,5	0,5	4,9	1,7
Constante diélectrique statique	11,7	12,9	9,7	8,5
Johnson's FOM $\propto (E_{crit} \times V_{sat})^2$	0,9	6,4	160	660

TABLEAU 3: caractéristiques physiques des principaux matériaux semi-conducteur

Ainsi les industriels des domaines aéronautique et automobile se sont orientés vers les technologies SiC et GaN pour renforcer les performances de leurs convertisseurs de puissance en haute tension et fort rendement.

C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail de recherche qui a été entrepris dans le groupe de physique des matériaux (GPM) dans le cadre du projet FUI FIRST-MFP (Fiabilité et Renforcement des Systèmes Technologiques Mécatroniques de Forte Puissance), labellisé Mov'eo, ASTech Paris Région et Normandie AeroEspace. Ce projet regroupe

plusieurs industriels et laboratoires de recherche, et vise à étudier la fiabilité de différentes technologies de composants mécatroniques de puissance dédiés à des applications automobile et aéronautique.

Cette thèse a été entreprise pour répondre aux besoins des partenaires industriels de ce projet afin de pérenniser les technologies SiC et GaN. Le but de cette thèse est d'étudier la fiabilité et la robustesse de ces deux filières de composants grâce à la microscopie à émission de photons résolue en longueur d'onde. La mise en œuvre de cette technique sera appliquée à des MOSFETs en SiC et des HEMTs en AlGa_N/Ga_N dans le cadre du programme FIRST-MFP. Cette étude a été menée selon une méthodologie rigoureuse de travail imposant la réalisation d'un enchaînement d'étapes précises au cours de l'analyse de défaillance. Le développement et l'implémentation de cette méthodologie sont présentés dans ce mémoire. En particulier, le but a été de pouvoir améliorer la technique de l'utilisation d'émissions de lumière pour étudier les différentes technologies de composants de puissance identifiées par le projet FIRST-MFP comme étant des composants critiques. L'étude est donc menée en trois grandes étapes : le diagnostic électrique et les essais de vieillissement, la localisation de défauts et l'identification du mécanisme de défaillance avec la microscopie à émission de photons spectrale et l'analyse micro-structurale.

La synthèse des travaux présentée dans ce manuscrit de thèse est divisée en quatre chapitres. Le premier chapitre aborde le domaine de l'analyse de défaillances des composants électroniques et plus particulièrement les différentes techniques existantes de localisation des défauts. La technique de microscopie à émission de photons sera particulièrement détaillée. Elle est identifiée comme étant une technique prometteuse pour la caractérisation du mécanisme de défaillance. Le chapitre expose en finalité, la problématique de la reconnaissance de l'identité du défaut dans les composants électroniques à l'aide des techniques non destructives.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons plus en détails la technique de microscopie à émission de photons sans et avec l'approche spectrale. Une bibliographie complète est exposée pour mieux comprendre la théorie de l'émission de lumière et les systèmes existants pour extraire l'information spectrale. Cette étude nous permettra par la suite d'évaluer l'importance de développer un système spectral de microscopie à émission de photons qui permet une extraction rapide et précise de la signature spectrale du défaut. Le système développé est présenté avec la méthode de calibration. Il est utilisé pour étudier la fiabilité des transistors MOSFETs SiC dans le chapitre III, et les transistors HEMT AlGa_N/Ga_N dans le chapitre IV.

Le troisième chapitre valide le système spectral de microscopie à émission développé, en étudiant des transistors MOSFETs en carbure de silicium. Il présente en premier lieu cette technologie de composant et l'intérêt d'étudier leur fiabilité. Ensuite, ce chapitre

sensibilise le lecteur sur l'origine de l'émission de lumière dans le carbure de silicium. Enfin la méthodologie de l'analyse de défaillance développée, est implémentée dans deux cas d'étude. La première consiste à étudier la robustesse de ces composants vis-à-vis des décharges électrostatiques, et la deuxième porte sur la caractérisation de l'impact du stress HTRB sur ces composants.

Le quatrième chapitre présente une étude d'analyse de défaillance des transistors HEMT AlGaN/GaN. Il décrit en premier lieu cette technologie de composant. Puis il explique le processus d'émission de lumière dans le GaN, et présente un état de l'art sur les applications de la technique de microscopie à émission de photons (PEM : Photon Emission Microscopy) sur ces composants. En deuxième lieu, le chapitre présente les résultats de l'étude des HEMTs AlGaN/GaN avec la PEM classique et spectrale.

Chapitre 1

Analyse de défaillance des composants électroniques : la problématique liée à la localisation et l'identification de la nature de défaut

1.1 Analyse de défaillance

Une étude d'analyse de défaillance est menée généralement selon différentes étapes, figure [1.1](#).

- La première étape consiste à regrouper le maximum possible d'informations sur le composant : la fiche technique, l'historique de la pièce, ou encore l'historique des analyses sur des composants similaires.
- La deuxième étape porte sur la caractérisation électrique du composant à l'état neuf et après les tests de vieillissement. L'intérêt de cette étape est d'identifier les différents modes de défaillance, afin d'émettre les hypothèses probables sur le ou les mécanismes de défaillance.
- L'étape de caractérisation électrique est suivie par trois méthodes d'analyse différentes :
 1. Les méthodes non destructives (comme la radiographie X, la microscopie optique ou la microscopie acoustique (SAM)). Ces méthodes consistent à faire une inspection externe et/ou interne dans le but de déceler les défauts d'assemblage, tout

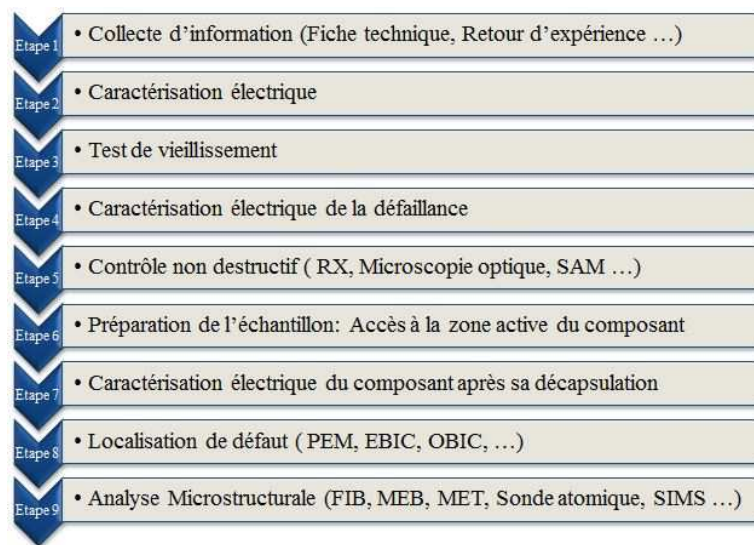


FIGURE 1.1: Méthodologie d'une analyse de défaillance

en conservant l'intégrité du composant. Elles permettent cependant rarement de conclure sur l'analyse [7].

2. Les méthodes semi-destructives (comme la microscopie à émission de photon, OBIRCH, cristaux liquides, thermographie..). Ces méthodes nécessitent une étape préliminaire de préparation d'échantillon et d'ouverture du boîtier qui conserve le défaut et assure la fonctionnalité du composant. Cette dernière est confirmée par une troisième campagne de caractérisations électriques. Grâce à ces techniques semi-destructives, on parvient à localiser les défaillances internes.
3. Les méthodes destructives comme la préparation au FIB (Focused Ion Beam) suivie de l'observation au microscope électronique : MEB (microscopie électronique à balayage) ou MET (microscopie électronique en transmission). Les méthodes destructives sont les méthodes qui donnent les informations les plus avancées sur la nature des défaillances, mais leur inconvénient majeur est un coût très élevé. C'est pour cette raison qu'on opte souvent pour commencer par des techniques alternatives non destructives ou semi-destructives (comme l'analyse spectrale en photoémission) qui permettent à la fois la localisation et l'identification du défaut.

L'analyse de défaillance, au niveau des composants électroniques, s'appuie essentiellement sur des techniques puissantes de localisation de défauts. Mais vu que l'architecture des circuits est en évolution constante, les techniques de localisation doivent donc évoluer en même temps que celle des composants. C'est l'objectif de cette étude qui porte sur le développement d'un nouveau système d'analyse spectral en photoémission.

1.2 Techniques de localisation de défauts

Une des étapes primordiales dans l'analyse de défaillance est la localisation des défauts. Plusieurs techniques de localisation des défauts dans les circuits intégrés (CI) et les composants existent depuis longtemps. Ces techniques ont évolué au cours des années à cause de l'augmentation de la complexité des composants électroniques (miniaturisation, la croissance du nombre de couches de métallisation, l'augmentation de la densité d'intégration, l'évolution des techniques d'encapsulation...). Par la suite, nous présentons les techniques de localisation des défauts les plus couramment utilisées. Nous nous focaliserons plus en détail sur la technique de microscopie à émission de photons qui sera approfondie dans le chapitre suivant.

1.2.1 Cristaux liquides

La technique des cristaux liquides est parmi les techniques les plus anciennes de localisation de défauts [8]. Elle permet la localisation des défauts qui se traduisent par une augmentation de température comme dans les court-circuits [9]. En effet, cette technique repose sur l'utilisation de la propriété nématique de certains cristaux. Ce type de cristaux liquides changent d'orientation cristalline sous l'effet de la température pour passer d'un état d'ordre directionnel (la phase anisotrope : état solide) à un état de désordre (phase isotrope : état liquide) à partir d'un seuil en température nommé température de transition $T_{transition}$ [2]. Cette technique consiste à recouvrir la face frontale de la puce électronique d'une fine couche de cristaux liquides et d'éclairer la surface par une lumière polarisée. Cette lumière doit avoir une orientation qui permet que la température à l'endroit défaillant soit légèrement supérieure à la température $T_{transition}$. La capture d'image du point chaud correspondant au défaut, se fait à travers un système de détection composé d'un microscope optique, un polariseur et un analyseur croisé [10].

En effet, pour une température T inférieure à $T_{transition}$, lorsque la lumière polarisée arrive sur les cristaux liquides, elle se réfléchit sur la surface et suit la même direction que le polariseur croisé car le cristal garde son orientation initiale. Par conséquence, le composant reste lumineux sans observation du point chaud. Par contre lorsque la température T est supérieure à $T_{transition}$, l'orientation cristalline du cristal se modifie. En conséquence, la lumière réfléchie sur la surface ne peut pas traverser l'analyseur, ce qui se traduit par un point sombre correspondant au défaut (1.2). Cette technique est de moins en moins utilisée, car elle présente plusieurs inconvénients qui se résument premièrement dans sa résolution spatiale allant de $2\mu\text{m}$ à $5\mu\text{m}$ et qui n'est plus suffisante vu la miniaturisation des CI [10]. Deuxièmement, la majorité des cristaux liquides sont classés parmi les substances cancérigènes. Et troisièmement, cette technique ne permet

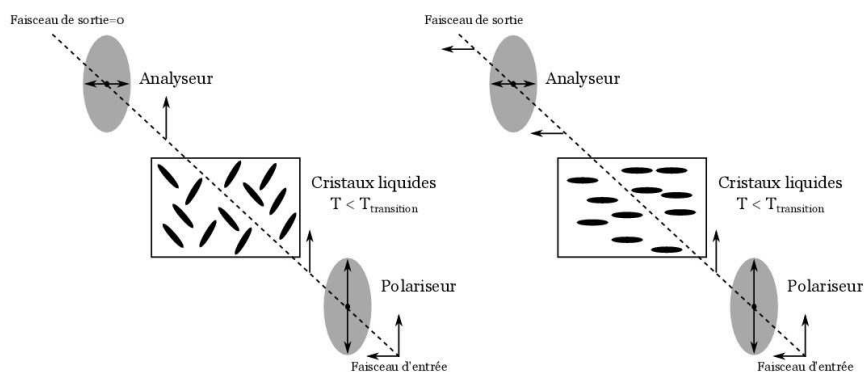


FIGURE 1.2: (a) : Influence des cristaux liquides sur le faisceau de lumière incident pour $T < T_{transition}$. (b) : Influence des cristaux liquides sur le faisceau de lumière incident pour $T > T_{transition}$ [2]

de détecter qu'une température par type de cristaux liquides utilisé, et donc sa mise en œuvre prend un temps important [2].

1.2.2 Microscopie infrarouge

La microscopie infrarouge ou la thermographie infrarouge est une technique non destructive qui permet de cartographier la variation de température et l'émission de chaleur d'un composant électronique en fonctionnement [11]. Cette technique consiste à mesurer à travers un détecteur infrarouge (ayant une sensibilité entre 0,4 à 30 μ m), les rayonnements infrarouges émis par le composant alimenté électriquement. Ces émissions construisent une cartographie thermique du composant sous test qui décrit toutes les variations spatiales et temporelles de la température [7]. Les défauts (par exemple de type résistifs) se manifestent par une augmentation ponctuelle de la température. Cette technique permet d'obtenir pour une résolution spatiale de l'ordre de 5 μ m, une résolution en température inférieure à 25mK [12] [2]. Par conséquent l'inconvénient majeur de cette technique se résume en sa résolution spatiale qui est très grande par rapport à la taille des composants actuels, ainsi que la faiblesse de sa sensibilité à l'émissivité.

1.2.3 Techniques basées sur le faisceau d'électrons

L'évolution de la technique de microscopie électronique à balayage (MEB) depuis sa première conception en 1929 [13] a élargi ses domaines d'application. Actuellement cette technique est fortement utilisée pour la caractérisation des matériaux semi-conducteurs et la localisation des défauts. En effet le besoin de localiser les défauts dans les circuits intégrés, a poussé les chercheurs à développer plusieurs techniques de localisation basées

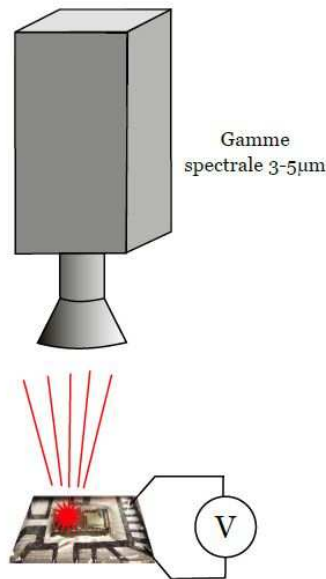


FIGURE 1.3: Principe de la thermographie IR

sur le faisceau d'électrons et la MEB tels que CIVA (Charge Induced Voltage Alteration), EBIC (Electron Beam Induced Current), EBAC (Electron Beam Absorbed Current). Le grand avantage de ces techniques est qu'elles sont sans contact et non destructives. En fait, elles se basent toutes sur l'utilisation d'un microscope électronique à balayage pour appliquer sur l'échantillon un faisceau d'électrons avec un diamètre de spot de 50 à 100 nm. Le bombardement d'un semi-conducteur par un faisceau d'électrons donne naissance soit à des dispersions élastiques, soit inélastiques [14]. La dispersion élastique des électrons par les atomes engendre des électrons rétrodiffusés, où les électrons changent de direction sans que leur énergie change. Dans ce cas, les électrons primaires subissent un nombre élevé de collisions avant d'être arrêtés ou de ressortir du matériau en atteignant la surface [15]. Dans les dispersions inélastiques, les électrons sont éjectés de leurs orbites, avec une perte d'énergie et un faible transfert de vitesse. La dispersion inélastique donne naissance à différents processus utiles tels que (figure 1.4) :

- Électrons secondaires : Ces électrons donnent des informations spécifiques (topographiques, chimiques et électriques) sur la zone d'interaction avec la matière.
- Rayons X : Ce sont des rayonnements libérés lorsque les atomes instables par l'excitation des électrons incidents, tendent à revenir à leur état fondamental. Le traitement de ces rayons X, fournit des informations très importantes, concernant la composition intérieure du matériau et la contamination de la surface.
- Électrons Auger : L'énergie libérée par une atome excité peut éjecter un deuxième électron d'un autre niveau avant d'être directement émise sous forme de rayonnement X [16].

- Électrons absorbés : Ce sont des électrons absorbés par la matière. Ils perdent progressivement leur énergie jusqu'à leur arrêt définitif.
- Électrons transmis : Les électrons primaires peuvent traverser l'échantillon, si celui-ci est suffisamment mince.
- Cathodoluminescence : Le bombardement électronique, provoque pour certains matériaux l'émission des photons qui peuvent avoir une longueur d'onde qui s'étend de l'ultra violet à l'infra rouge. L'émission de ces photons peut être liée soit à la présence des défauts dans la matière ou bien à des transitions bande à bande [17, 18].

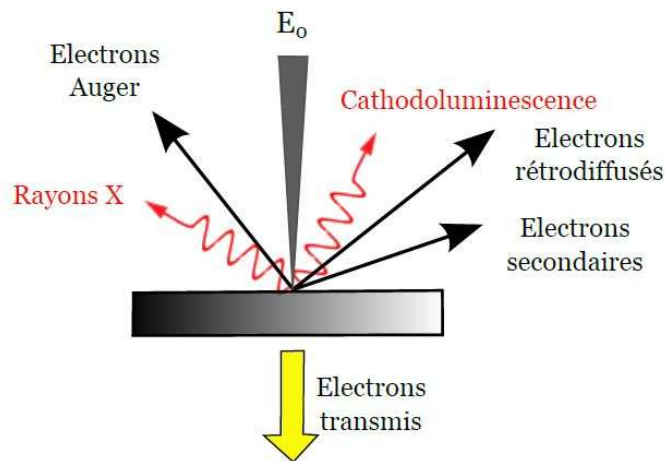


FIGURE 1.4: Les effets produits suite au bombardement par faisceau d'électrons

La formation d'une image MEB se base sur le phénomène de la génération des électrons secondaires. En effet, lorsqu'un faisceau d'électrons balaye la surface d'un circuit intégré, des électrons secondaires sont générés par l'interaction des électrons primaires avec les atomes cibles (typiquement du métal dans les lignes inter-connectées). Ces électrons secondaires peuvent être collectés et analysés par différents détecteurs permettant ainsi la reconstruction d'une image de surface de l'échantillon (figure 1.5).

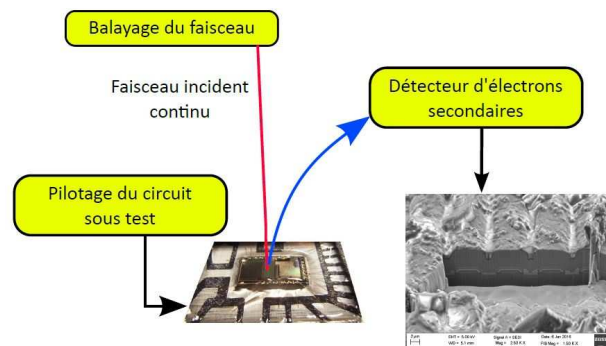


FIGURE 1.5: Formation de l'image en électrons secondaires.

1.2.3.1 CIVA : Charge Induced Voltage Alteration

La technique (CIVA) est une des plus anciennes techniques de microscopie électronique à balayage permettant de localiser rapidement des circuit-ouverts [19]. Cette technique utilise une source de courant constant pour alimenter le circuit intégré sous test et produit une image en surveillant les fluctuations de cette tension lorsque le faisceau d'électrons est balayé à travers la surface du DUT [20] (figure 1.6) Les variations de contraste dans l'image CIVA sont générées uniquement à partir de la partie électriquement ouverte d'un conducteur. En raison de cette précision élevée, CIVA permet à partir d'une seule image, l'identification de la localisation d'interconnexions ouvertes sur un circuit intégré [21].

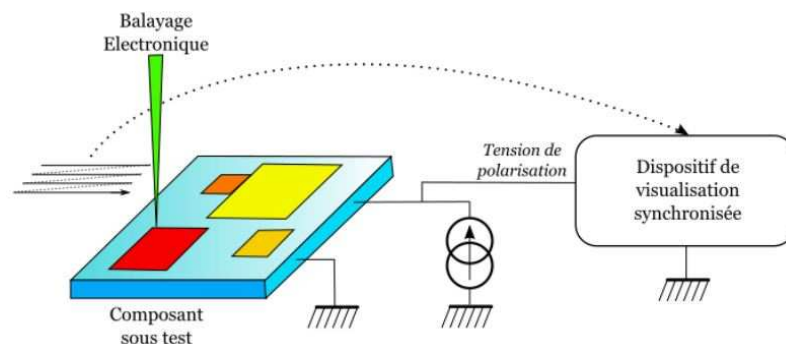


FIGURE 1.6: Principe général du CIVA

La technique CIVA exige la pénétration du faisceau électronique principal dans les conducteurs du CI, comme le montre la figure 1.7. Si un conducteur est électriquement ouvert, la charge injectée dans le conducteur par le faisceau électronique primaire peut réduire la tension du conducteur et affecter fortement les demandes de tension du CI fournies par une source de courant constant.

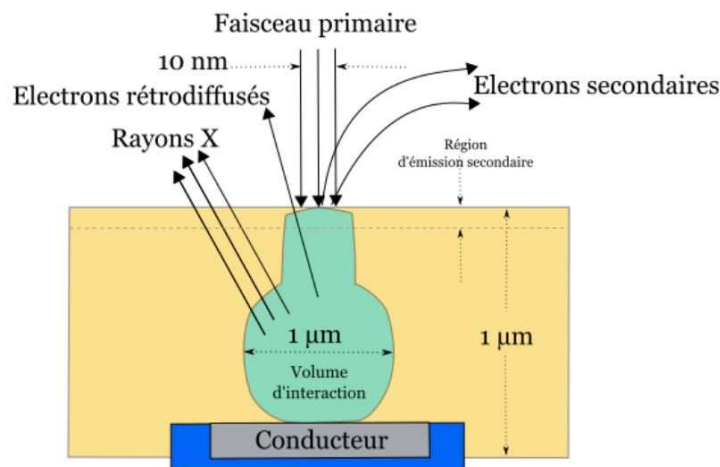


FIGURE 1.7: Produit d'interaction d'un faisceau d'électrons primaire de 10 keV avec le SiO_2

1.2.3.2 EBIC : Electron Beam Induced Current

Electron Beam Induced Current (EBIC) est une technique d'analyse des composants à semi-conducteur qui caractérise leur comportement électrique en mesurant un signal de courant induit lorsque l'échantillon est exposé à un faisceau d'électrons. Les paires d'électrons-trous créées par le faisceau électronique du MEB diffusent aléatoirement à l'intérieur du matériau. En l'absence d'un champ électrique localisé, elles finissent par se recombiner ou s'annihiler l'une l'autre. Par contre, lorsqu'un champ électrique règne dans la zone de génération, les paires se séparent et se distribuent selon l'orientation du champ. En reliant l'échantillon à un amplificateur de courant, un courant va être collecté et appelé courant induit par le faisceau d'électrons (figure 1.8) [22],[23]. La mesure de l'EBIC est effectuée principalement à l'intérieur des microscopes électroniques à balayage (MEB) équipés d'un étage électrique. L'image EBIC est une image en niveaux de gris où le noir représente le courant minimal alors que le blanc représente le courant maximum (figure 1.9-b). La superposition de l'image EBIC avec l'image MEB (figure 1.9-a) permet de localiser les défauts (figure 1.9-c).

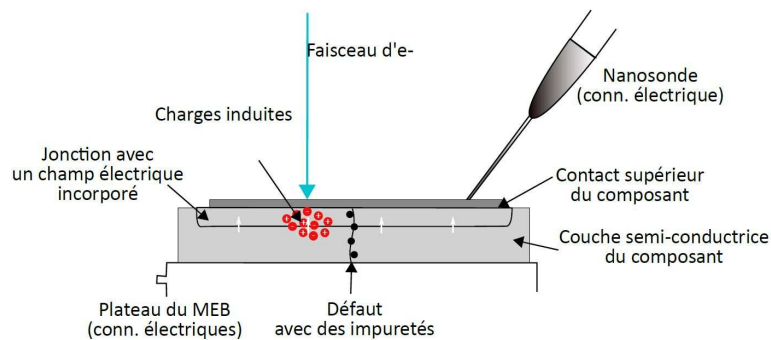


FIGURE 1.8: Principe de la mesure EBIC

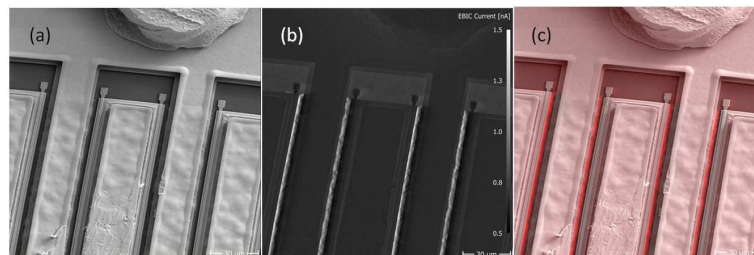


FIGURE 1.9: Mesure EBIC réalisée chez PointElectronic (Halle) sur un de nos échantillons HEMT AlGaIn/GaN : (a) Image MEB, (b) Image EBIC, (c) MEB/EBIC Image

En effet, la technique EBIC peut être utilisée pour la localisation des jonctions, ainsi que les défauts électriquement actifs [24] tels que les précipités et les joints de grains [25], [26], [27],[28],[29]. L'EBIC a été largement utilisée pour révéler et compter les dislocations dans le GaN et d'autres semi-conducteurs (figure 1.10) [30], [31], [32]. Cette

méthode permet aussi de déterminer les caractéristiques fondamentales du semi conducteur (mesure de l'activité de recombinaison non radiative et les propriétés des porteurs de charges minoritaires ainsi que la longueur de diffusion [33], [34], [35], [36]).

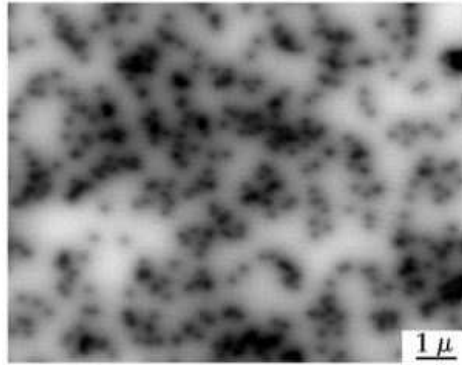


FIGURE 1.10: Image EBIC typique d'une couche GaN obtenue pour $E_b = 35eV$, $I_b = 3.10^{-10} A$ [30]

Pour la technique EBIC, on peut utiliser deux types extrêmes d'excitations par faisceau électronique [22] (figure 1.11) :

- Une excitation parallèle où les électrons arrivent parallèlement à la jonction (figure 1.11 -a).
- Une configuration perpendiculaire où ils la traversent perpendiculairement (figure 1.11 -b).

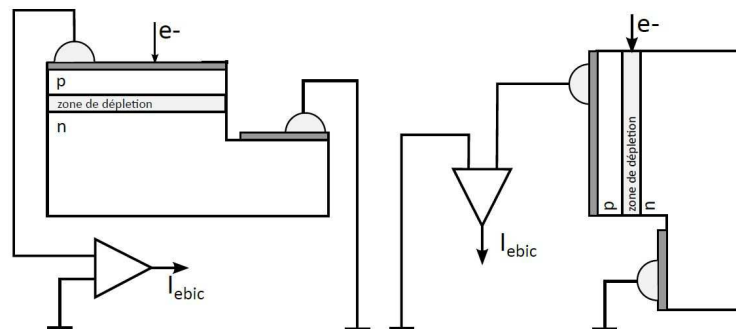


FIGURE 1.11: Schéma illustrant les différentes géométries utilisées dans la technique EBIC : (a) parallèle et (b) perpendiculaire à la jonction pn [31]

1.2.3.3 EBAC : Electron Beam Absorbed Current

La technique EBAC est une des techniques de localisation de défauts les plus puissantes dans l'analyse des défaillances de circuits intégrés contemporains [27]. En effet, cette technique est capable de localiser un défaut de taille submicronique dans une zone d'inspection d'un MEB de plusieurs dizaines de micromètres carrés [37], [38]. Grâce à sa

résolution, cette technique a remplacé les techniques optiques conventionnelles (le TIVA ou OBIRCH qu'on détaillera par la suite) pour la localisation des sites défaillants à haute résistance et des circuits ouvert d'interconnexion [39]. Cette technique peut être utilisée aussi pour analyser la défaillance d'oxyde et les fuites de grille après les tests de fiabilité [40], [41]. Le système EBAC est constitué d'un MEB équipé de nano-sondes. Le principe général de l'EBAC est illustré sur la figure 1.12. Lorsque le faisceau d'électrons primaires pénètre dans la surface de l'échantillon, il provoque un courant dispersé et un courant absorbé. Un amplificateur EBAC possédant un gain élevé est connecté à un système de nano-sonde. La nano-sonde entre en contact avec une structure conductrice (ligne métallique ou via) à la surface de l'échantillon. Les électrons sont absorbés par des lignes métalliques à la surface qui sont reliées à la structure conductrice. L'image EBAC est présentée en amplifiant ces électrons absorbés et peut être superposée avec l'image MEB pour localiser le site de défaillance.

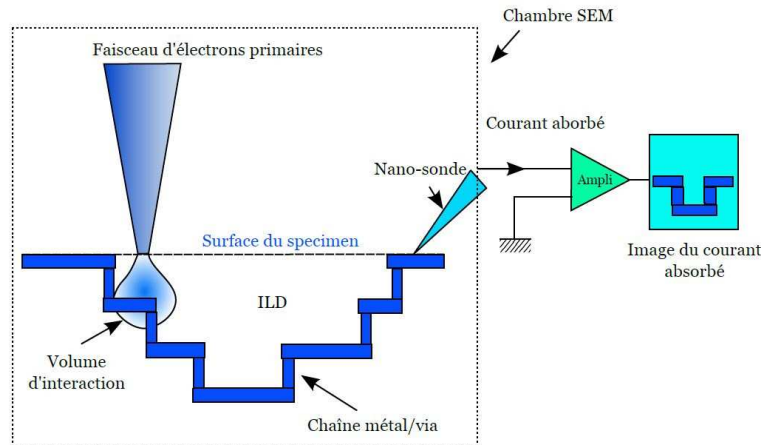


FIGURE 1.12: Principe de la technique EBAC

Ainsi le faisceau d'électrons est une source de courant d'injection et le flux de courant dans la structure métal / via se mesure par la sonde. Si la chaîne métal / via est endommagée ou ouverte, la position de défaillance peut être localisée par le changement de contraste de l'image EBAC qui se superpose à l'image MEB de la structure du composant sous test. Cependant pour une forte résistance (Cas d'une connexion partielle), une seule sonde ne peut pas localiser ce type de défaut. Par conséquent, il faut deux sondes dans la technique EBAC pour localiser le site de défaillance. La technique utilisant deux sondes s'appelle RCI (Resistive Contrast Imaging) [42], [43]. Elle utilise deux sondes, une connectée à l'amplificateur de courant et une sonde connectée à la masse, pour induire la différence de potentiel causée par une défaillance de haute résistance (figure 1.13).

Lors de l'analyse EBAC, l'énergie d'injection du faisceau d'électron doit pénétrer suffisamment dans l'échantillon pour interagir avec les lignes métalliques et être imagée en EBAC. La profondeur de pénétration des électrons peut être calculée par une simulation

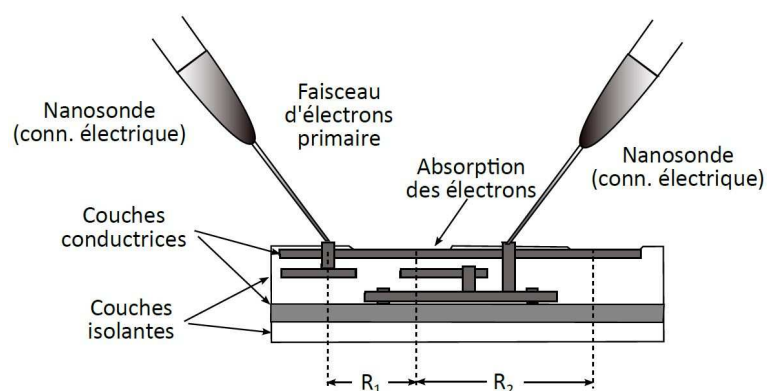


FIGURE 1.13: Principe de la technique RCI

Monte Carlo [44]. Elle dépend principalement de la tension d'accélération du MEB et de la nature du matériau de l'échantillon. La technique EBAC est similaire à l'EBIC car les deux techniques se basent sur l'utilisation d'un faisceau d'électrons, sauf que l'EBAC est utilisée sur les lignes métalliques et les vias enterrés, alors que l'EBIC est utilisée sur les semi-conducteurs et les jonctions pn. De plus l'EBAC se base sur la mesure du courant absorbé, alors que l'EBIC se base sur la mesure du courant induit. En général le signal EBIC est plus localisé et plus puissant que le signal EBAC en montrant le chemin des courants de fuite.

Les techniques de localisation de défauts CIVA, EBIC et EBAC se basent toutes les trois sur la stimulation par faisceau d'électrons. Par contre, chaque technique possède son propre principe de fonctionnement et configuration électrique. Le tableau 1.1 compare les trois techniques et montre les différences qui existent entre elles.

	CIVA	EBIC	EBAC
Zone excitée	Jonction PN	Ligne métallique	Surface du composant
Configuration électrique	- Circuit électrique fermé - Appliquer $I = \text{const}$ - Mesure de ΔV	- Circuit électrique fermé - Sans alimentation - Mesure du courant induit	- Circuit ouvert - Sans alimentation - Mesure du courant absorbé
Principe	Effet de la charge injectée dans le conducteur par le faisceau d'e-	Génération du courant induit par le faisceau d'e-	Génération du courant absorbé par le faisceau d'e-

TABLEAU 1.1: Comparaison des techniques de localisation de défaut basées sur un faisceau d'électrons

1.2.4 Techniques basées sur un faisceau optique

Dans le domaine de la fiabilité de la micro-électronique, diverses techniques d'analyse de défaillance basées sur un faisceau optique laser sont utilisées. Le faisceau laser est utilisé pour perturber le fonctionnement du composant, afin de récupérer directement aux bornes de ce dernier une information relative à cette perturbation [15]. Le mécanisme d'interaction d'un faisceau laser avec le dispositif semi-conducteur dépend de la nature et de la structure du semi-conducteur (la structure cristalline, bandgap) ainsi que la propriété du faisceau laser (longueur d'onde, polarisation, régime temporel, puissance laser et taille du faisceau laser)[45]. Généralement, lorsque le faisceau laser illumine un dispositif semi-conducteur, une partie des photons incidents est absorbée, une autre partie est réfléchiée et le reste est transmis à travers l'échantillon [45] (figure 1.14).

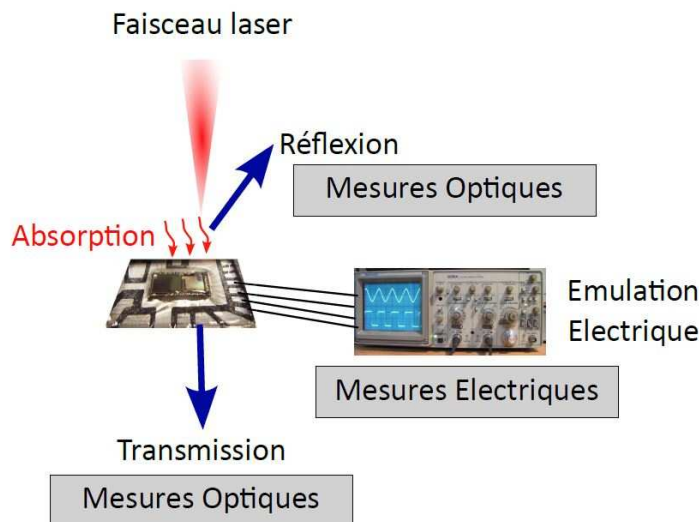


FIGURE 1.14: Représentation de l'interaction du faisceau laser avec un CI. Les perturbations induites dans le CI peuvent être détectées par mesures optiques ou par mesures électriques.

Dans le premier cas, les photons incidents sont absorbés et peuvent générer d'autres photons, phonons ou paires électron / trou. Les photons générés sont responsables de l'effet de photoluminescence dans un semi-conducteur qui est utilisé dans des techniques telle que la photoluminescence (PL) pour déterminer les niveaux d'énergie d'impuretés dans un dispositif semi-conducteur [46]. La longueur d'onde laser est optimisée en fonction du type d'excitation exploité par la technique, qui est soit la génération de paires électrons-trous, soit l'échauffement thermique [15]. L'absorption de photons dans un dispositif utilisant un faisceau laser avec une énergie inférieure à la bande interdite du semi-conducteur provoque un effet photo-thermique. Cet effet est utilisé dans diverses techniques, y compris SEI (Seebeck Effect Imaging), OBIRCH (Optical Beam Induced

Resistance Change) et TIVA (Thermally Induced Voltage Altération) [47], pour localiser les défauts dans les circuits intégrés. La génération de paires électron / trou dans un semi-conducteur sous stimulation optique avec une énergie supérieure à la bande interdite des semi-conducteurs est appelée effet photoélectrique. Cet effet est largement employé dans l'analyse de défaillance micro-électronique dans des techniques telles que OBIC et LIVA (Light Induced Voltage Alteration)[47] pour caractériser des dispositifs micro-électroniques. La figure 1.15, présente un récapitulatif de techniques photo-thermiques et photoélectriques, tout en précisant la configuration électrique de chaque technique. C'est la configuration électrique qui permet de différencier les techniques photoélectriques entre elles et les techniques photothermiques entre-elles. Par exemple, pour les deux techniques OBIC et OBIRCH, le composant est polarisé avec une tension constante, mais les cartographies obtenues à l'aide de ces techniques présentent des variations du courant induites par le phénomène photoélectrique (OBIC) ou photo-thermique (OBIRCH).

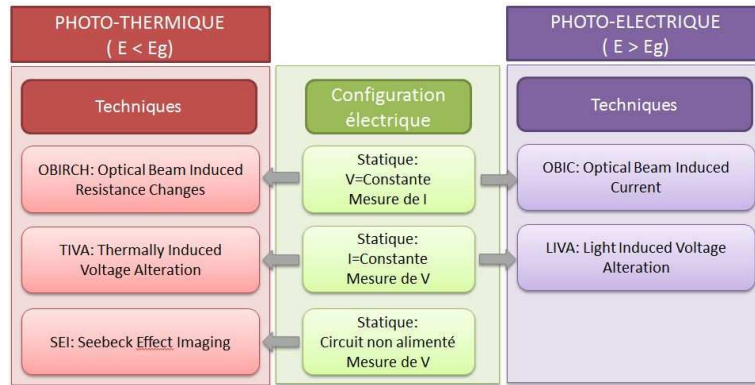


FIGURE 1.15: Classement non exhaustif des techniques de stimulation par faisceau laser

Les techniques basées sur un faisceau optique sont bien adaptées à la localisation de défauts, étant donné que l'effet de la stimulation par le faisceau laser dépend fortement de l'état électrique de la zone analysée [15]. En effet, les techniques de stimulation par faisceau laser peuvent être classées selon la configuration électrique dans laquelle le défaut se présente : Statique ou Dynamique. Si le défaut est présent tout le temps du point de vue électrique (par exemple un court circuit entre deux broches) et le signal analysé est un signal DC, alors on parle de la configuration électrique statique. Par contre si la défaillance n'est observable que sur le signal AC, lorsque la configuration électrique du CI est dynamique, alors on doit utiliser des techniques dynamiques pour la localisation du défaut [48] [49](comme LADA (Laser Assisted Device Alteration) [50],[51], SDL (Soft Defect Localization) [52], [53], RIL (Resistive Interconnection Localization)[54], [55], TLSIM (Thermal Laser Signal Injection Microscopy)[56], DVM (Delay Variation Mapping)[57], PVM (Phase Variation Mapping)[58]). Dans ce qui suit, on mettra plus l'accent sur les techniques statiques.

1.2.4.1 OBIC : Optical Beam Induced Current

Le premier système OBIC (Optical Beam Induced Current) a été développé en 1977 par le NBC (National Bureau of Standard) [59]. Dès les années 80, cette technique a été largement utilisée comme l'une des méthodes de caractérisation avancée dans l'industrie de la micro-électronique. La technique OBIC peut être utilisée pour des mesures quantitatives et qualitatives [46]. Quantitativement, l'OBIC est largement utilisée en micro-électronique pour détecter et localiser divers types de défauts, y compris les points faibles dans un transistor MOS, les décharges électrostatiques (ESD) ou les surtensions électriques (EOS), les courants de fuite ainsi que les courts-circuits dans les circuits intégrés [60] [61]. La technique OBIC utilise un laser pour créer des photo-courants localement afin de cartographier les défauts de jonctions, la sensibilité au latch-up ou aux basculements logiques des circuits intégrés [62], [63]. Lorsque le composant est soumis à une tension constante alors qu'un faisceau optique (laser) ayant une énergie supérieure au gap balaye sa surface, l'absorption des photons dans le semi-conducteur forme des paires d'électron-trou dans le substrat. Ces paires se recombinent généralement de façon aléatoire dans le matériau. Cependant, si les couples électron-trou se produisent dans une région de charge d'espace (appauvrissement), les porteurs de charge seront séparés par le potentiel de jonction avant la recombinaison, engendrant un courant induit d'où l'appellation OBIC. En insérant un amplificateur de courant en série avec la broche d'alimentation comme le montre la figure 1.16, les photo-courants induits par la pompe laser peuvent être amplifiés et affichés. Ces variations de courant sont ainsi cartographiées et superposées sur l'image réfléchie obtenue en microscopie à balayage laser (figure 1.16). Par conséquent, les zones défectueuses sont localisées avec précision. Qualitativement, cette technique est utilisée pour extraire des informations sur les propriétés des semi-conducteurs [64]. La longueur de diffusion des porteurs minoritaires, la durée de vie des porteurs minoritaires et la vitesse de recombinaison [65], [66],[46].

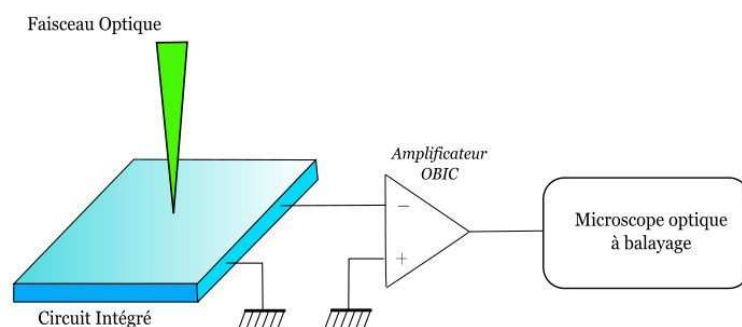


FIGURE 1.16: Configuration d'amplification de l'OBIC

L'OBIC est en principe une analogie de la technique EBIC. La méthode OBIC permet la génération d'excès des porteurs dans des zones profondes des jonctions, ce qui n'est

pas le cas dans la méthode EBIC où les porteurs de charge sont générés à proximité de la surface (dans une profondeur qui ne dépasse pas les $2 \mu\text{m}$) [24]. L'OBIC possède certains avantages par rapport à l'EBIC qui se traduisent par le fait qu'elle n'est pas affectée par le problème de charge et qu'elle ne nécessite pas d'être installée dans un système sous vide (si l'on est à basse tension et à température ambiante). Donc elle est moins coûteuse que la configuration EBIC. L'avantage néanmoins de l'EBIC est qu'elle présente un faisceau d'électrons très étroit, ce qui permet une meilleure résolution de la distribution du champ électrique à la surface de l'échantillon [24]. A cause de cette ressemblance, les premiers travaux publiés sur l'OBIC dans les années 80 utilisaient les modèles développés pour la technique EBIC jusqu'à ce que le modèle mathématique de l'OBIC ait été formulé [67], [68].

1.2.4.2 LIVA : Light Induced Voltage Alteration

La technique LIVA (Light Induced Voltage Alteration) se base sur la stimulation du composant dans son état "on", par un faisceau laser ayant une énergie supérieure à la bande interdite. La mesure se fait aux bornes du composant, sur les variations de la tension (induite par la stimulation laser) lorsque le composant est polarisé avec une source de courant constant [69],[70]. Dans cette configuration, le composant agit comme son propre amplificateur, ce qui rend cette technique plus sensible pour la localisation de défauts [47]. La présence d'un défaut peut soit générer directement une recombinaison des porteurs, ou bien induire une variation de la consommation du dispositif dans la région défectueuse en amplifiant l'effet du courant induit. La variation du signal LIVA présente une signature de la défaillance du composant électronique.

1.2.4.3 OBIRCH : Optical Beam Induced Resistance Change

Une des techniques non destructives de localisation de défauts est l'OBIRCH (Optical Beam Induced Resistance Change). Cette technique est décrite la première fois en 1993 [71] par Nikawa du groupe NEC au Japon. Elle consiste à enregistrer la variation de la résistance engendrée par la stimulation au faisceau laser. Elle vise donc à détecter la variation de consommation aux bornes du circuit intégré, lorsque ce dernier est alimenté dans son état défaillant [72]. En effet, lorsque le composant est stimulé par un laser et alimenté avec une tension continue V , une variation de courant ΔI proportionnelle à la variation de résistance ΔR est créée, telle que : $\Delta I = -\Delta R \cdot V / R^2$ Où R est la résistance du composant sous test [2].

Si le laser incident chauffe un endroit où il y a un défaut, alors ce dernier va induire une variation de la résistance du métal. Par conséquent, la différence de variations de

la résistance entre un élément métallique sans défaut et un élément métallique ayant un défaut, sera répercutée sur la valeur du courant récupéré à travers un amplificateur de courant [15]. figure(1.17).

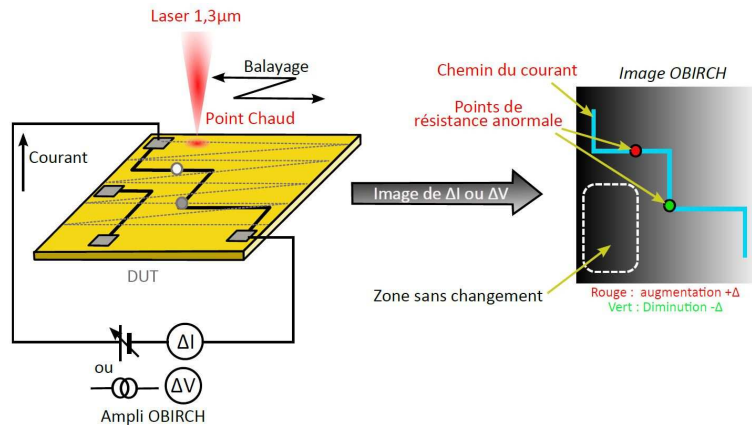


FIGURE 1.17: Principe de l'OBIRCH [73]

Pour les transistors MOSFETs de puissance que nous avons fait vieillir dans le cadre du projet FIRST, l'analyse que nous avons réalisée en OBIRCH s'avère être liée fortement au mode de polarisation du transistor, et de l'orientation du composant à analyser, (figures 1.18 et 1.19). Pour polariser le composant, nous appliquons un fort champ Vds en mode diode ($V_{gs}=0$) figure (1.18) ou bien nous nous plaçons en mode transistor à faible courant ($V=V_{ds}=V_{gs}$) figure (1.19). Les analyses OBIRCH peuvent se faire par la face avant du composant, figure (1.18) ou par la face arrière, figure (1.19). Et selon le sens de l'analyse, le faisceau laser chauffe la métallisation directement ou passe à travers le substrat. Lorsque l'analyse est par la face arrière, il faut faire attention à la nature du substrat et la longueur d'onde du laser. Lorsque l'énergie apportée par le laser est supérieure ou égale à l'énergie du gap du substrat, il peut y avoir apparition du phénomène de photogénération comme dans le cas de la figure (1.19).

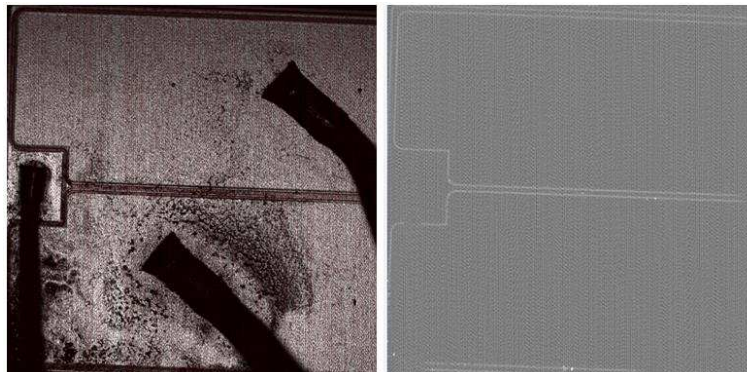


FIGURE 1.18: Analyse OBIRCH réalisée au GPM par la face avant en Mode diode drain-source d'un MOSFET type aéronautique vieilli (Thales) en ESD

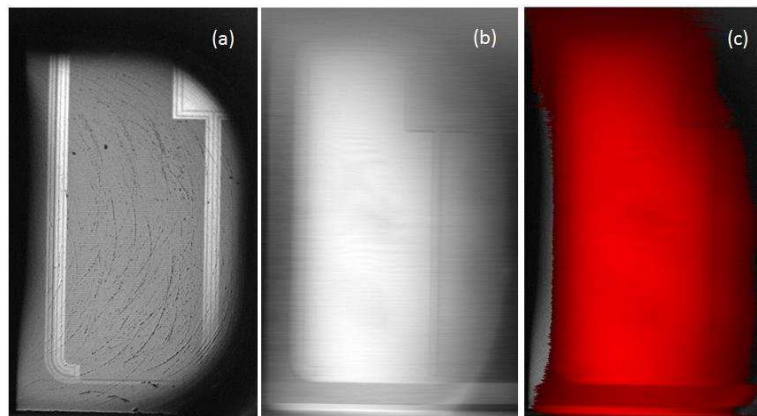


FIGURE 1.19: Analyse OBIRCH par la face arrière d'un MOSFET SiC neuf en mode transistor. (a) Image du Pattern, (b) Image OBIRCH, (c) Superposition de l'image (a) et (b)

1.2.4.4 TIVA : Thermally Induced Voltage Alteration

La technique TIVA (Thermally Induced Voltage Alteration) est une technique de stimulation laser proposée dans les années 1998 et 1999 par COLE et BARTON [74],[75] pour la détection des défauts de court-circuit ou les défauts dans les pistes métalliques et les vias. Cette technique consiste à alimenter le circuit avec un courant constant et à détecter les variations de tension induites par le laser [76] (1.20). Elle ressemble à l'OBIRCH dans son principe, mais les deux techniques diffèrent au niveau de la méthode d'alimentation et de détection des signaux [77].

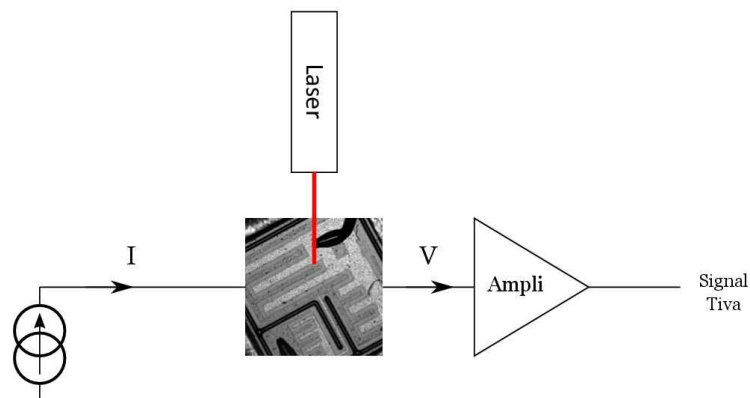


FIGURE 1.20: Principe de la technique TIVA [77]

1.2.4.5 SEI : Seebeck Effect Imaging

En 1821, le physicien allemand Thomas Johann Seebeck a découvert [78] un phénomène thermoélectrique qui a été nommé de son nom "effet Seebeck". Ce phénomène se traduit par la perturbation du fonctionnement électrique du composant sous test suite à l'échauffement local d'une jonction entre deux matériaux différents [10], [79]. La technique SEI (Seebeck Effect Imaging) consiste à mesurer la variation de potentiel induite par les gradients de température dans des matériaux métalliques en circuit ouvert, ou dans des thermocouples [74], [15] (figure 1.21) .

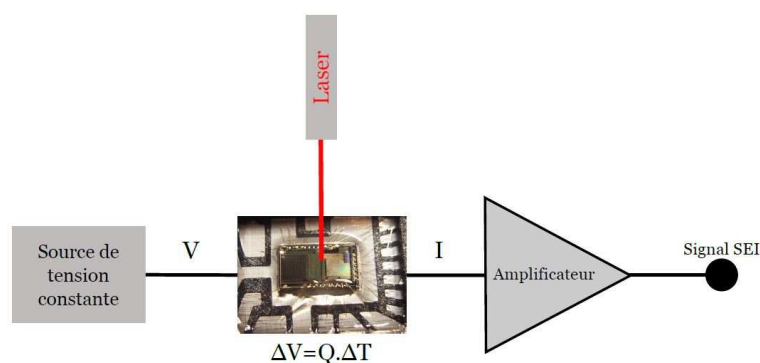


FIGURE 1.21: Principe de la technique SEI

En effet, un gradient de température apparaît suite à la stimulation d'une jonction métal-métal ou métal-polysilicium par un faisceau laser [10]. Ceci engendre une force électromotrice (Tension Seebeck) suite à l'augmentation de l'énergie cinétique des porteurs du côté chauffé et la diffusion de ces derniers vers le côté plus froid de la jonction (Eq. 1.1) [10].

$$\Delta V = Q_{1-2} \cdot \Delta T \quad (1.1)$$

Telle que ΔV est la force électromotrice (tension Seebeck), Q_{1-2} est le pouvoir thermoélectrique relatif qui peut prendre des valeurs positives ou négatives en fonction des matériaux interfacés et ΔT est le gradient de température induit par le faisceau laser au niveau de la jonction métal-métal ou métal-polysilicium. Ainsi une défaillance dans le composant se traduira par une variation de la force électromotrice, ce qui permettra de localiser des défauts dans des structures multicouches métalliques [10] [77] (figure 1.22).

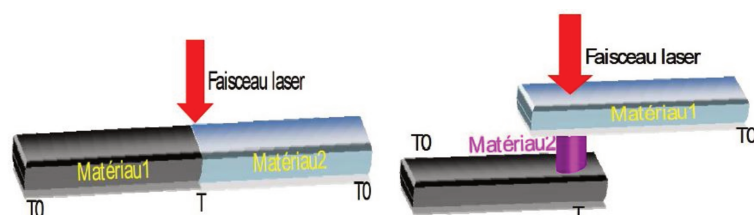


FIGURE 1.22: Jonction latérale (gauche), jonction verticale (droite) non polarisée et soumise à une stimulation thermique laser

1.2.5 Techniques basées sur l'émission de lumière

1.2.5.1 Luminescence et principe d'émission de lumière

Le mot "luminescence", inventé par le physicien allemand Wiedemann en 1888 [80] ("Luminescenz"), vient du latin lumen qui signifie lumière. Même si le phénomène est connu depuis l'antiquité et à travers différentes civilisations, son interprétation est restée une énigme jusqu'au milieu du XIXe siècle, où John Herschel, Edmond Becquerel et George Gabriel Stokes ont tenté d'expliquer scientifiquement l'origine de ce phénomène.

On appelle luminescence tout processus au cours duquel est engendrée une émission d'un rayonnement électromagnétique (lumière) d'origine non thermique, et résultant de la relaxation d'états excités [81]. Autrement dit, c'est une émission de photons produite par le retour à l'état fondamental des électrons pendant leur désexcitation, telle que le mode d'excitation des électrons ne provient pas d'un réchauffement du corps émettant de la lumière. Selon ce mode d'excitation, on distingue différents types de luminescences (tableau 1.2) [82].

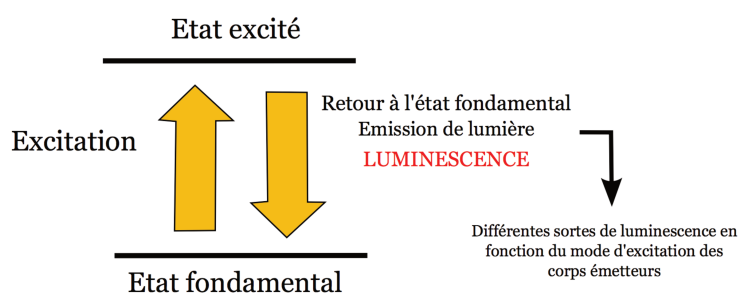


FIGURE 1.23: Principe de la luminescence

Parmi les techniques de localisation des défauts les plus utilisées dans l'analyse de défaillance, il y a les techniques basées sur l'émission de lumière dues à une excitation électrique, ou électroluminescence (EL). Les techniques basées sur l'émission de lumière sont très efficaces dans la localisation des défauts dans les jonctions PN et les MOSFETs, comme le claquage d'oxyde de grille, le latch-up, le défaut de conception [10]. Parmi les

Types de luminescence	Mode d'excitation	Exemples
Electroluminescence	excitation électrique (champ électrique)	diodes électroluminescentes (DEL)
Photoluminescence (fluorescence, phosphorescence)	excitation par absorption de photons (Lumière ou UV)	tubes luminescents, les colorants fluorescents, les azurants optiques
Chimiluminescence	excitation à la suite d'une réaction chimique	bâtons lumineux
Bioluminescence	réaction enzymatique	lucioles
Radioluminescence	excitation à la suite d'une irradiation par RX ou rayonnement α, β, γ	écrans de radiographie X
Thermoluminescence	élévation de Température	datation archéologique d'objets
Cathodoluminescence	excitation par collision électronique (e-accélérés)	tube cathodiques
Triboluminescence	excitation à la suite de la rupture de liaisons chimiques dans un solide (frottement, Rupture, déformation)	sucre broyé ou écrasé
Sonoluminescence	excitation par absorption de phonons (Ultrasons)	crevettes claquantes

TABLEAU 1.2: Les types de luminescence

techniques basées sur l'émission de lumière, nous ne nous focaliserons que sur trois techniques bien connues dans ce domaine : une technique statique PEM (Photon Emission Microscopy) [83], et deux techniques dynamiques : PICA (Picosecond Imaging Circuit Analysis) [84], [85] et TRE (Time Resolved Emission) [86] [87].

1.2.5.2 Microscopie à émission de photons

La microscopie à émission de photons (PEM) appelée aussi photoémission (PE) ou électroluminescence (EL), est une technique de localisation des défauts qui permet la détection de photons de très faible énergie, émis par les dispositifs semi-conducteurs (comme les transistors ou les jonctions PN) [46].

La microscopie à émission de photons est utilisée depuis la fin des années 80. Son histoire commence en 1887, quand Hertz a observé qu'une étincelle entre deux électrodes arrive plus facilement si l'électrode négative est illuminée par un rayonnement Ultra-Violet (UV)[88]. Quelques années plus tard, J.J. Thompson a démontré que le phénomène est dû à l'émission d'électrons par l'électrode, sous irradiation UV. Mais c'est Einstein en 1905, qui a donné la bonne interprétation du phénomène (Il a eu le Prix Nobel en 1921 particulièrement pour ses travaux sur la PE). Ce dernier a trouvé que la lumière est composée de quanta discrets d'énergie (E_L) proportionnelle à la fréquence (ω_L de la

lumière : $E_L = \hbar\omega_L$. Cette énergie moins une énergie de liaison I , s'échappe du solide et se capture par l'électron photoémis, qui s'échappe ainsi avec un maximum d'énergie E_e . $E_L = \hbar\omega_L - I$ [89].

Le phénomène d'électroluminescence du dioxyde de silicium (SiO_2) et de silicium (Si) a été observé pour la première fois en 1956 [90] et 1976 [91] [92]. A l'époque, les propriétés du Silicium n'était pas complètement connues. Par conséquent, cette technique a été difficilement exploitée par les industries. En effet, les industriels pensaient que le silicium ne pouvait pas émettre de la lumière, vu le gap indirect du Si qui privilégie plus les phénomènes par phonons [15]. Cependant, depuis les années 90, cette technique a prouvé son efficacité pour la localisation et l'identification de défauts, grâce à sa haute résolution spatiale et sa sensibilité. Et sur le principe, la PE est utilisée aujourd'hui de la même manière qu'il y a presque cent ans.

La PEM consiste à observer les photons émis par les zones actives du CI qui est alimenté électriquement. La collecte des photons se fait selon la sensibilité spectrale du détecteur qui peut couvrir une gamme de longueurs d'onde allant du visible (400 à 770 nm) au proche infrarouge (770 à 1500 nm), ou encore des détecteurs IR ou UV. En effet, toute l'émission capturée par le détecteur, pendant un temps donné, est intégrée et représentée sur une seule image statique, indépendamment de la nature des signaux électriques appliqués sur le composant (DC ou AC). C'est pour cette raison que la PEM est considérée comme étant une technique statique qui ne permet pas l'extraction des informations temporelles et instantanées [10].

1.2.5.3 Microscopie à émission de lumière dynamique (PICA)

Avec l'intégration à très grande échelle (VLSI) des circuits-intégrés, et la complexité des architectures actuelles de ces derniers, on voit l'apparition de nouveaux modes de défaillance et types de défauts dit "Soft" (ang. Soft Defect). Ces défauts ayant une nature variable (en fonction de la température, de la fréquence, de la tension), ils ne peuvent être traités avec les techniques de localisation statique conventionnelles. Ce qui a incité les chercheurs à développer de nouvelles techniques dynamiques de localisation des défauts. Parmi ses techniques, il y a la technique d'émission de lumière dynamique (PICA " Picosecond Imaging Circuit Analysis ") [93],[94].

PICA est une technique qui permet l'acquisition de la lumière émise tout en conservant les informations temporelles et spatiales. Plus précisément, le capteur PICA délivre le temps et la position de chaque photon émis par la zone de circuit ciblée [84]. Le premier système PICA a été inventé et construit en 1996 par Kash et Tsang de IBM's TJ Watson Research Center [95]. Leur système utilisait un détecteur qui enregistre les coordonnées

spatiales et temporelles des photons émis sur une large zone d'investigation. Ce système a contribué à une meilleure compréhension des mécanismes physiques intervenant dans l'émission de lumière.

Cette technique a été initialement utilisée pour l'information temporelle qu'elle fournit et qui permet l'identification de tout problème de fonctionnalité lors des inspections en face arrière des transistor MOS [96]. En effet, cette technique a été prévue au début pour l'investigation des circuits à transistors MOS en commutation [84]. Un transistor MOS transite momentanément par un régime d'émission de photons lorsqu'il passe de l'état bloqué à l'état passant, ou vice versa [2]. L'émission de lumière du MOS lorsque sa grille commute est liée à sa saturation et au flux de courant dans la grille [97] qui est généré suite à la désexcitation des porteurs chauds. Ces derniers sont créés grâce à un champ électrique élevé présent pendant la commutation (figure 1.24). La visualisation dans le temps de cette émission de lumière permet de suivre la propagation spatiale et temporelle du signal électrique [87] et d'extraire les coordonnées x,y, et t du défaut. La résolution temporelle est de l'ordre de quelques picosecondes. Vu que le courant induit par le changement d'état est très faible alors la collecte d'information doit se faire avec un photo-détecteur très sensible.

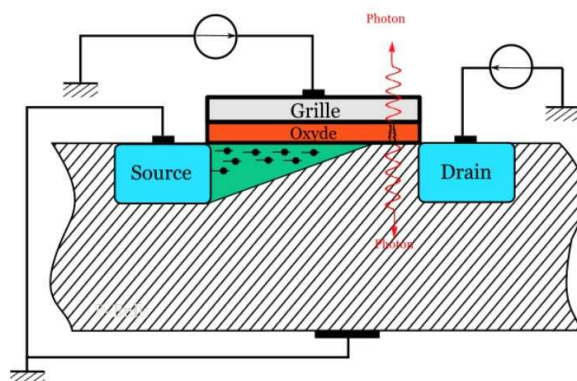


FIGURE 1.24: L'émission de lumière d'un transistor MOS latéral

Cette technique peut être utilisée aussi sur les transistors HEMTs AlGa_N/Ga_N pour une localisation spatiale et temporelle des émissions liées aux pièges. Ceci permet par la suite de remonter à leur localisation dans le volume, puis d'identifier leur origine technologique à travers leur constante de temps. Selon le type de pièges, les constantes de temps sont longues ou courtes. Elles sont comprises en général entre 300 ns et plusieurs dizaines de secondes [98] [99] [2].

Avec la technique PICA, la fenêtre d'observation peut couvrir la surface entière d'une puce électronique et le résultat de la cartographie d'émission est représenté sous forme d'un film. Il est également possible de présenter les résultats sous une autre forme appelée TRE (ang. Time Resolved Emission) [100]. Il s'agit de la courbe d'émission des photons

captés, en fonction du temps (figure 1.25) [10]. Dans cette représentation, l'émission de photons est capturée par un détecteur monopoint sur une zone réduite, et non pas sur l'intégrité de la surface de l'échantillon dans le champ de vision. Parfois cette représentation est perçue comme une technique pouvant être utilisée indépendamment de la technique PICA [10].

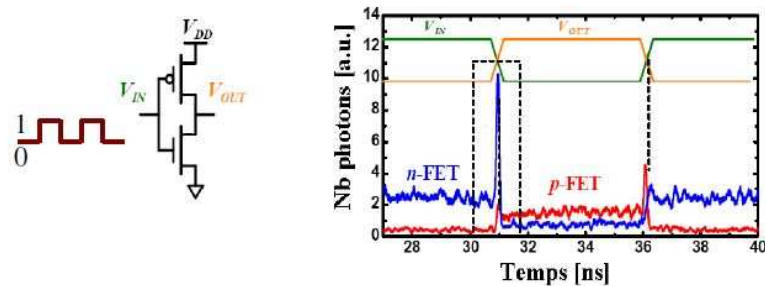


FIGURE 1.25: Détection résolue en temps des émissions de photons à l'aide d'une technique TRE. Deux courbes représentent les photons émis par un n-FET et par un p-FET de l'inverseur quand un signal 0/1 a été envoyé en boucle sur V_{in} [101] [10]

1.2.6 Choix de la technique de localisation

Il existe plusieurs techniques de localisation de défauts. Ces techniques sont complémentaires puisque chacune possède ses avantages mais aussi ses limitations. Le tableau 1.3 récapitule les champs d'applications des différentes techniques, ainsi que leur limitations. D'où l'intérêt de combiner parfois plusieurs techniques. Le choix de la technique à appliquer se fait principalement suite à la caractérisation électrique du défaut (étape du test électrique dans la procédure d'analyse de défaillance). Elle dépend du type de boîtier, du nombre de couches de métal et du type de circuit (analogique ou numérique) ainsi que du mode de la défaillance.

Afin de s'assurer du lieu où le défaut physique génère la défaillance, nous utilisons parfois deux techniques de localisation de défauts avant de passer à l'analyse micro-structurale. Par exemple, sur la figure 1.26 nous avons localisé un défaut ponctuel sur un composant que nous avons stressé en ESD avec les deux techniques : OBIRCH et PEM.

1.3 Conclusion

Une des étapes les plus importantes dans l'analyse de défaillance est donc la localisation des défauts. Le diagramme ci-dessous (figure 1.27) recense l'ensemble des techniques de localisation de défauts les plus utilisées. On se focalisera dans le chapitre II, sur la technique de microscopie à émission de photons.

Technique	Type des défauts localisés	Limitations
CIVA	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Interconnexions ouvertes ▪ Défaut d'oxyde 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ La présence de couches épaisses de passivation nécessite une forte énergie du faisceau d'électrons pour atteindre le conducteur ce qui augmente le risque d'irradiation
EBIC	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dégradation de jonction ▪ Défauts actifs (Précipités, joints de grains) ▪ Dislocation 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Coûteuse car nécessite d'être sous vide ▪ Problème de charge ▪ Analyse des zones profondes ▪ Dégradation de l'oxyde de grille par effet d'irradiation
EBAC	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sites défaillants à haute résistance ▪ Circuits ouverts d'interconnexion ▪ Court-circuit ▪ Défauts d'oxyde et fuite de grille 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Exige deux sondes pour les défauts à forte résistance ▪ Dégradation par effet d'irradiation pour les fortes énergies du faisceau d'électron
OBIC	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ESD/EOS ▪ Courants de fuite ▪ Court-circuit ▪ Dégradation de jonction ▪ Sensibilité au latch-up ▪ Basculement logique 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Faible résolution due à la largeur de faisceau ▪ Préparation de l'échantillon: L'analyse OBIC en face arrière nécessite un polissage du substrat pour réduire la diffusion du faisceau lumineux infrarouge scanné.
OBIRCH	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Court-circuit 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sensibilité de détection des faibles tensions et courants
LIVA	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Circuit ouvert ▪ Dégradation de jonction ▪ Basculement logique de transistor 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ LIVA exige que les connexions électriques soient maintenues sur le composant, donc si le processus de préparation de l'échantillon et d'ouverture en face arrière endommage l'interconnexion, LIVA ne peut pas être appliquée
TIVA	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Court-Circuit ▪ Défaut des pistes métalliques et les vias 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sensibilité à l'émissivité et Niveau de bruit ▪ Elle se base sur une polarisation à courant constant, cependant le bon fonctionnement des composants exige en général une source de tension constante.
SEI	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Circuit ouvert 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fort contraste qui peut masquer les défauts
PEM	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Défaillance de la jonction PN ▪ Fuite d'oxyde ▪ Ionisation d'impact ▪ Filament de contact ▪ Latch-up 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Défaut qui n'émet pas de la lumière ▪ Présence des couches de métallisation et jonctions enterrées ▪ Préparation d'échantillon ▪ Sensibilité du détecteur

TABLEAU 1.3: Comparaison des techniques de localisation de défaut : Type de défauts localisés et limitations

La localisation de défaut devient un vrai défi, car l'accès à la zone active devient de plus en plus difficile avec l'augmentation de la complexité et la densité d'intégration des circuits actuels. La préparation d'échantillon s'avère ainsi être une étape délicate car elle doit s'adapter avec le type d'assemblage et le processus de fabrication employés pour l'élaboration des puces électroniques actuelles. L'analyse de défaillance consiste non seulement à localiser les défauts mais aussi à déterminer l'origine et les mécanismes de défaillance. En général, l'identification du mécanisme de défaillance se fait à travers une analyse physicochimique par des techniques destructives micro-structurales. Ces techniques sont très coûteuses, et elles détruisent l'échantillon sous test. L'intérêt de développer d'autres techniques semi-destructive permet à la fois la localisation de défaut et l'identification de sa nature physicochimique.

C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail de recherche, qui vise à développer une

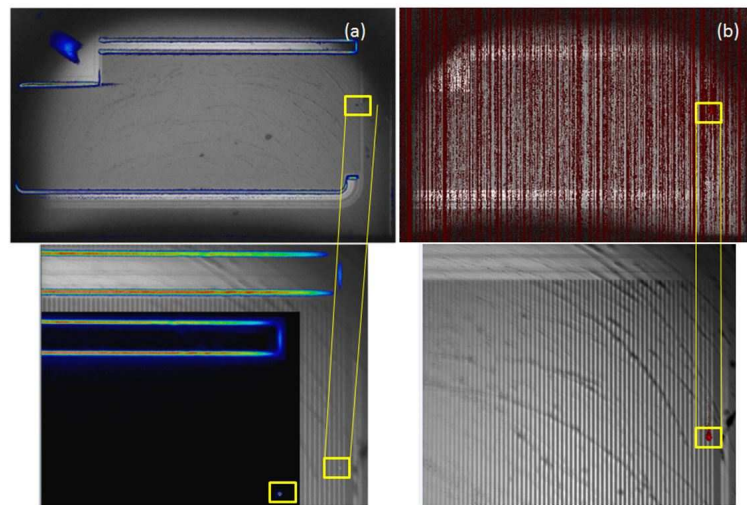


FIGURE 1.26: Localisation d'un défaut ponctuel d'un de nos composants MOSFET stressé en ESD. (a) par microscopie à émission de photon. (b) par OBIRCH

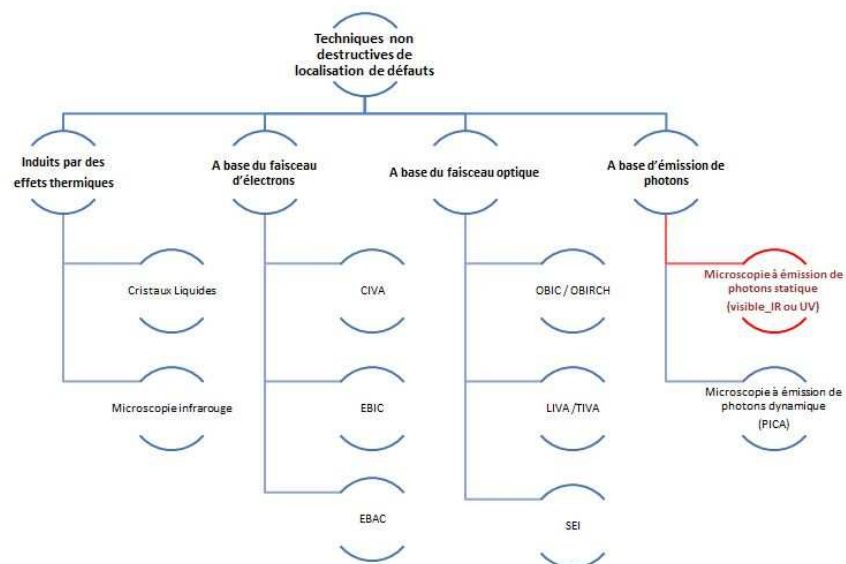


FIGURE 1.27: Techniques usuelles de localisation de défaut

méthodologie d'analyse de défaillance plus rigoureuse pour étudier deux technologies de composants à large bande interdite. Le développement de cette méthodologie s'exprime à travers l'exploitation de l'aspect spectral de la technique de microscopie à émission de photons. Cette technique a été introduite dans ce chapitre et sera plus détaillée dans le chapitre suivant.

En effet, la microscopie à émission de photons conventionnelle permet de localiser la position du défaut en se basant sur le phénomène d'électroluminescence. Mais puisque sa résolution spatiale est de seulement quelques micromètres, elle ne fournit pas vraiment d'informations sur le défaut lui-même [102]. C'est pour cette raison qu'on s'intéresse à

étendre les capacités de cette technique et à analyser au niveau spectral la lumière émise par le défaut. Cette information spectrale représente une signature du mécanisme de défaillance puisque les différents défauts (originaires de différents mécanismes physiques) émettent de la lumière avec des caractéristiques spectrales différentes. Au lieu d'utiliser des techniques destructives pour l'identification du mécanisme de défaillance, nous présentons dans ce qui suit une approche alternative basée sur l'extraction de la longueur d'onde à travers un système spectral de photoémission.

Chapitre 2

Introduction à la Microscopie à émission de photons conventionnelle et spectrale.

2.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté la problématique de localisation de défauts dans la micro-électronique. Nous avons évoqué brièvement la technique de microscopie à émission de photons (PEM) et l'intérêt porté à son développement pour non seulement localiser le défaut, mais aussi identifier sa nature. Ce chapitre détaille plus cette technique de PEM. Il met l'accent sur ses principes et ses limitations. Ensuite il aborde l'évolution de cette technique pour extraire la signature spectrale qui permet de remonter au mécanisme de défaillance. La technique de microscopie à émission de photons spectrale (SPEM) est introduite et un état de l'art des systèmes de SPEM est présenté. L'analyse spectrale de la photoémission est une méthode d'analyse de défaillance semi-destructive qui a pour but de localiser les défauts et identifier le mode de défaillance. Jusqu'à présent les dispositifs utilisés tels que les spectromètres, les filtres ou le prisme présentent des limitations. Dans ce chapitre, nous présentons un système spectral de photoémission permettant d'obtenir rapidement les spectres d'émission de photons, en faisant usage d'un réseau de diffraction placé dans le chemin optique d'un microscope à émission de photons. En utilisant les informations obtenues du système ainsi conçu, il est possible d'identifier une signature spectrale propre au défaut qui peut être corrélée au mécanisme de défaillance.

2.2 Microscopie à émission de photons conventionnelle

2.2.1 Principe de mesure

Le premier Microscope d'émission de Photons (PEM) a été développé au début des années 1980 [103]. Cette technique consiste à collecter grâce à un photodétecteur, des photons émis par le composant actif lors de son fonctionnement (figure 2.1). Le détecteur selon son type possède une sensibilité spectrale dans une plage de longueurs d'onde spécifique qui peut aller du visible (400-770 nm) au proche infrarouge (770-1500 nm) [46]. En effet, une fois que le circuit sous test est stimulé électriquement, la zone défectueuse s'active et émet de la lumière. Cette dernière sera capturée par le microscope qui la transmet au détecteur qui est refroidi afin de minimiser l'effet du bruit (figure 2.1). Dans le but de localiser la lumière émise par le défaut, le système à PEM doit non seulement être capable de détecter les photons émis, mais aussi d'imager la structure du DUT. C'est pour cette raison que cette technique est implantée généralement dans un microscope optique qui permet la visualisation de l'image du circuit, qui sera superposée à l'image d'émission pour la localisation de défaut (figure 2.2).

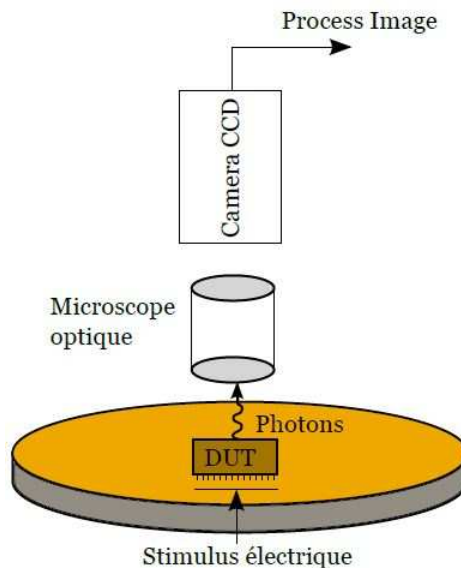


FIGURE 2.1: Système de base d'un microscope à émission de photons.

L'analyse en PEM se fait donc selon trois acquisitions distinctes [104] :

- **Image du Pattern** : c'est une image optique du circuit sous test, obtenue par illumination du circuit avec une source de lumière externe (photo de gauche à la Figure 2.2-a).
- **Image de bruit** : c'est une image obtenue lorsque le circuit et la source de lumière externe ne fonctionnent pas. Cette image mesure les émissions parasites.

- **Image d'émission** : c'est le résultat de l'acquisition de la lumière émise par le circuit polarisé électriquement dans les conditions voulues (photo du milieu à la Figure 2.2-b). Ensuite, l'image de bruit est soustraite de l'image d'émission. Le résultat obtenu est superposé après à l'image du pattern, ce qui permet la localisation de la région défailante du circuit (photo de droite à la Figure 2.2-c).

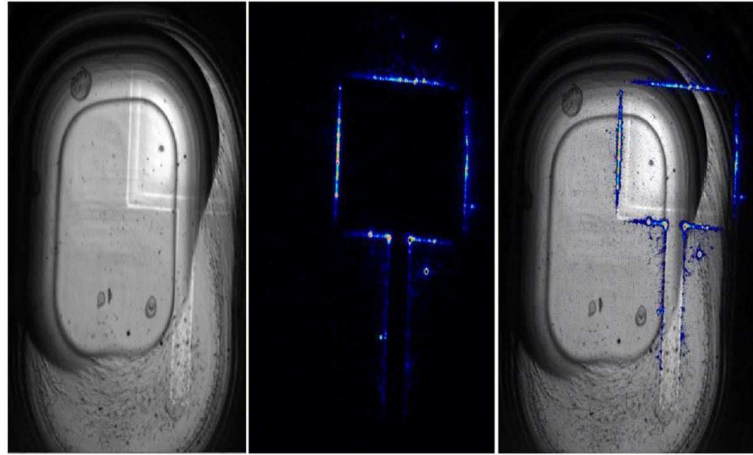


FIGURE 2.2: (a) image du pattern d'un MOSFET SiC ouvert en face arrière. (b) Image d'émission. (c) Superposition des deux images (a) et (b) [104].

2.2.2 Physique de l'émission de lumière

L'émission d'un photon dans un semi-conducteur est due à une relaxation d'un électron hautement énergétique. Plusieurs types de transitions optiques impliquant des porteurs à l'état ou non d'équilibre thermique peuvent produire des émissions dans le visible ou dans le proche infrarouge (figure 2.3) [15]. Ces transitions optiques peuvent être classées en trois groupes [105] :

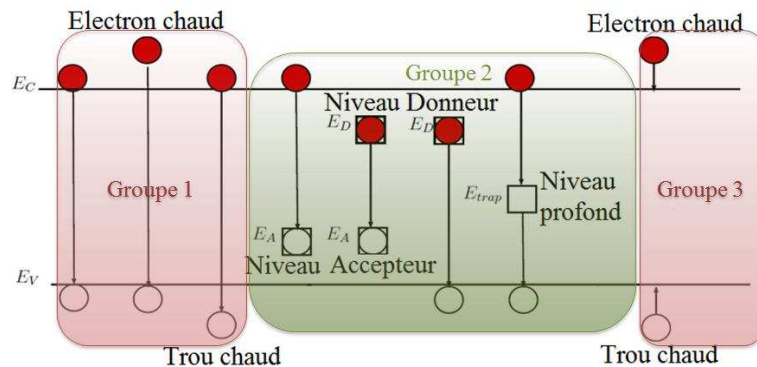


FIGURE 2.3: Les différentes transitions possibles de l'émission de lumière

Le premier groupe : est constitué des transitions bande-bande et interbandes.

– **Les transitions bande-bande :**

On appelle transition bande-bande tout processus de recombinaison d'un électron-trou qui se fait par transition d'un électron de la bande de conduction vers un état vide de la bande de valence (trou). Ces recombinaisons radiatives peuvent se produire pour les semi-conducteurs à gap direct (comme le GaAs et le GaN) ou indirect (comme le Si ou le SiC) (figure 2.4). Dans les deux cas, il y a conservation de l'énergie. La probabilité de recombinaison dans un semi-conducteur à gap direct est bien supérieure à celle correspondant à un semi-conducteur à gap indirect ou le phénomène est assisté par émission d'un phonon (figure 2.4) [106]. Dans les matériaux à bande interdite directe, l'énergie minimale émise dans une transition bande-bande est égale au gap E_g . Et l'intensité lumineuse émise suit la relation [2] :

$$I(E_{ph}) \propto E_{ph}^2 \sqrt{(E_{ph} - E_g)} e^{-\frac{E_{ph} - E_g}{KT}}$$

Où E_{ph} est l'énergie des photons émis, E_g est l'énergie de bande interdite du matériau, K est la constante de Boltzman, T est la température absolue. (Dans cette équation, nous ne prenons pas en compte les effets d'impuretés).

Par contre, pour un semi-conducteur à bande interdite indirecte, l'énergie minimale émise dans une transition bande-bande est égale à $E_g - E_{ph}$, i.e. proche de E_g .

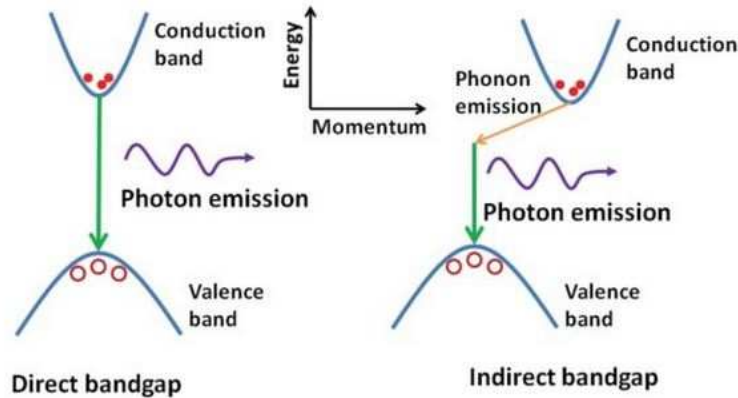


FIGURE 2.4: Illustration du phénomène de photoémission dans les semi-conducteurs à gap direct (gauche) et gap indirect (droite)

– **Les transitions interbandes :**

Elles comprennent les émissions avec une énergie proche de l'énergie de la bande interdite du semi-conducteur, ainsi que les émissions ayant une plus grande énergie de transition qui impliquent soit un électron chaud ou un trou chaud (figure 2.3).

Le deuxième groupe : est constitué de transitions impliquant des impuretés chimiques, des défauts physiques ou des pièges profonds qui comprennent les transitions : (figure 2.3)

- **Bande-Impureté** : Il s'agit d'une transition de la bande de conduction au niveau accepteur (eA^0), ou du niveau donneur à la bande de valence (D^0h). En effet, ce type de recombinaison s'effectue entre un électron libre de la bande de conduction et un accepteur neutre, ou entre un donneur neutre et un trou libre de la bande de valence. L'énergie des photons émis est approximativement [107] :

$$h\nu = Eg - E_D \text{ pour la transition } (D^0h) \text{ (} E_D \text{ est l'énergie d'ionisation du donneur).}$$

$$h\nu = Eg - E_A \text{ pour la transition } eA^0 \text{ (} E_A \text{ est l'énergie d'ionisation de l'accepteur).}$$

- **Donneur-Accepteur (D-A)** : Cette recombinaison se fait entre un électron d'un niveau donneur et un trou d'un niveau accepteur non ionisé. Suite à la recombinaison, les deux impuretés sont ionisées et se trouvent en interaction coulombienne. Lors d'une recombinaison donneur-accepteur (D-A), l'énergie du photon émis s'écrit donc sous la forme :

$$h\nu = Eg - E_D - E_A + \frac{q^2}{4\pi\epsilon_s\epsilon_0 R}$$

Où q est la charge élémentaire de l'électron, R est la distance entre le donneur et l'accepteur concernés, ϵ_s est la permittivité relative du semi-conducteur, ϵ_0 est la permittivité du vide [108].

- **Bande- Piège profond** : Ce sont des transitions de la bande de conduction au niveau du piège profond, ou du niveau de piège profond à la bande de valence. En effet, la présence des défauts dans les matériaux (comme les dislocations, lacunes, impuretés chimiques, défauts de surface) créent des niveaux d'énergie intermédiaires dans le gap du semi-conducteur. Les électrons excités dans les niveaux intermédiaires, peuvent alors perdre de l'énergie de manière non radiative et la transférer aux phonons du réseau cristallin [109].

Le troisième groupe : comprend des transitions intrabandes impliquant des électrons chauds et des trous chauds avec une énergie d'émission radiative bien en dessous de l'énergie de la bande interdite du semi-conducteur (figure 2.3).

Les émissions peuvent être classées en trois types [110] [92] :

- Les émissions qui sont dues à des défauts ou des défaillances dans le dispositif : (Les défauts de jonction, fuite d'oxyde ...).
- Les émissions qui sont dues au fonctionnement normal du DUT selon les conditions de test :(Grille flottante, Transistor saturé....)
- Les émissions qui ne sont pas détectables à cause de la présence de couches de métallisation ou des pouds qui masquent la zone active du composant.

Le tableau (2.1) récapitule les types de condition qui génèrent l'émission de lumière pour chaque catégorie :

Classification des émissions	Types des conditions
Défauts ou des défaillances dans le dispositif	<ol style="list-style-type: none"> 1. Les électrons chauds. 2. Les décharges électrostatiques (ESD) <ol style="list-style-type: none"> (a) Défaillance de la jonction PN (b) Fuite d'oxyde (c) Ionisation d'impact (d) Latch up (e) Filament du contact
Fonctionnement normal du DUT selon les conditions de test	<ol style="list-style-type: none"> 1. Grille flottante 2. Transistors saturés 3. Jonction PN polarisée en direct ou en inverse
Non détectables	<ol style="list-style-type: none"> 1. Des jonctions enterrées 2. Sites de fuite sous des couches de métal

TABLEAU 2.1: Les types d'émissions avec leurs conditions correspondantes

La PEM est une technique de localisation de défauts utilisée pour l'étude de différentes technologies de composant. Elle a été au début employée sur les composants Si, ensuite son champs d'application a été étendu vers les autres technologies comme les composants GaAs.

2.2.2.1 L'émission de lumière dans le Si

L'application de l'émission de lumière dans l'analyse de défaillance des composants à base de silicium date des années 90. Étant donné que le silicium est un semi-conducteur à gap indirect, les électrons majoritaires se positionnent en bas de la bande de conduction, et les trous majoritaires se concentrent en haut de la bande de valence. Donc le phénomène d'émission de photons par recombinaison radiative est assistée par une combinaison d'un ou plusieurs phonons d'énergie appropriée. La gamme spectrale de radiations est voisine de l'énergie de la bande interdite du silicium, soit à 1,12 eV. Le spectre d'émission correspondant est donc centré sur la longueur d'onde λ associée ($\lambda = 1,1(\mu m)$). La distribution spectrale d'intensité I suit un profil gaussien suivant la loi de l'équation ci-dessous [100] :

$$I = I_0 \exp \left[-\frac{|E - E_g|}{kT_e} \right]$$

Telle que E_g l'énergie du Gap, I_0 l'intensité à E_g , T_e la température des électrons, et E l'énergie des électrons.

Afin d'utiliser la technique PEM pour l'investigation des composants par la face arrière, il est important de connaître l'absorption du rayonnement optique par le silicium et son indice de réfraction. L'absorption dans le silicium dopé dépend de son niveau de dopage. Le silicium étant très absorbant en dessous de $1,1 \mu m$, il est nécessaire de fortement l'amincir afin de collecter un maximum de photons [100]. Donc l'observation en face arrière d'un composant à base de silicium est limitée par le coefficient d'absorption de ce dernier.

2.2.2.2 L'émission de lumière dans le GaAs

La microscopie à émission de lumière a fait ses preuves dans l'étude de la fiabilité des structures à base de GaAs. Elle fut utilisée pour identifier les différents mécanismes de défaillance reliés aux effets des porteurs chauds et des pièges, dans les structure à base de GaAs comme les transistors HFET AlGaAs/GaAs [111], HEMT AlGaAs/InGaAs [112] [113], ainsi que les HEMTs InAlAs/InGaAs [114].

Une des premières études réalisées en EL sur la technologie GaAs été celle de Gaddi [111]. Selon cette étude, le phénomène de l'électroluminescence dans les transistors HFET AlGaAs/GaAs est relié directement au mode de fonctionnement du composant.

- Dans le régime d'ionisation par impact, l'émission de lumière se situe le long de la grille côté source. Cette émission est due à deux mécanismes : le premier se traduit par la présence de pièges dans la couche AlGaAs qui engendrent la capture des trous. Et le deuxième mécanisme se base sur l'effet d'ionisation par impact qui crée dans la couche GaAs des recombinaisons bande à bande de paires électron-trou de faible énergie.
- Dans le régime de pincement du composant, l'émission de lumière est localisée le long de la grille côté drain. Elle est à l'origine des forte énergies attribuées aux phénomènes d'absorption dans les couches superficielles du composant, à savoir la couche GaAs "cap" et la couche barrière AlGaAs [2].

Malgré tous les atouts de la technique de microscopie à émission de photons, elle est inapplicable dans quelques situations. Nous discuterons dans ce qui suit les limitations de cette technique et les outils qui peuvent être utilisés pour améliorer son rendement.

2.2.3 Limitations et amélioration de la technique

2.2.3.1 Nature de défaut

Les défauts sont de natures différentes. Soit ils émettent de la lumière selon le processus déjà expliqué auparavant, soit ils n'émettent pas de lumière [110] [92]. Et ceci est l'une des limitations majeures de cette technique. Parmi les défauts qui n'émettent pas :

- Les courts-circuits ohmiques, et les courts-circuits entre les lignes métalliques.
- Filament de silicium entre les dispositifs

2.2.3.2 Détection de lumière

Comme évoqué auparavant, les photons émis par les défauts proviennent des recombinaisons radiatives des porteurs majoritaires ou minoritaires, ce qui se traduit par différents types de transitions des porteurs de charge. Ces transitions correspondent à différents types d'énergie, et par conséquent à différentes longueurs d'onde. Selon la nature du défaut et la technologie étudiée, ces émissions peuvent être monochromatiques ou polychromatiques se situant sur un intervalle spectral spécifique. En effet l'évolution des circuits électroniques a induit l'apparition des émissions issues des nouveaux composants dans l'IR ou l'UV (figure 2.5). Par exemple, la lumière émise dans les structures GaN actuelles peut se situer en UV, en visible ou en IR.

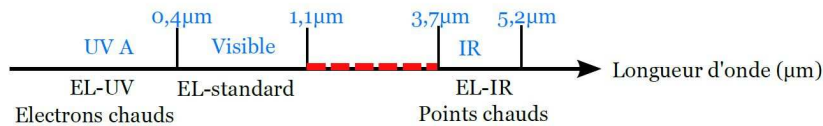


FIGURE 2.5: Localisation de défaut en terme de longueur d'onde

Par conséquent, la réponse spectrale du défaut peut poser un problème dans la détection si le détecteur implémenté dans le microscope n'est pas adapté et ne couvre pas l'intervalle spectral des émissions. Afin de suivre l'évolution des émissions, les détecteurs doivent donc être optimisés. Ainsi, plusieurs détecteurs sont développés pour couvrir les domaines UV et IR. La figure 2.6 récapitule l'enveloppe spectrale des détecteurs les plus connus. Il s'agit du détecteur CCDs en silicium, ou de tellure de cadmium de mercure (HgCdTe ou MCT) ou de l'arséniure de gallium d'indium (InGaAs). L'utilisation des détecteurs tellure de mercure-cadmium (HgCdTe ou MCT) et l'arséniure d'indium gallium (InGaAs) dans les microscopes à émission de photons a étendu la sensibilité spectrale plus loin dans le régime NIR [115].

Le choix du détecteur doit intégrer non seulement la réponse spectrale et le rendement quantique mais aussi le niveau de bruit. En effet, la détection du signal exige sa distinction

du bruit. Afin d'avoir un bon rapport signal sur bruit (SNR) nous devons opter pour un détecteur sensible dans la bande spectrale d'observation et peu bruyant, car durant le trajet de collection, il existe des pertes et des atténuations qui affectent l'émission de lumière et peuvent parfois causer une problématique dans la détection des photons. Ainsi pour détecter le maximum de photons à la sortie, il faut optimiser le bruit du détecteur et le rendement quantique total du détecteur [15].

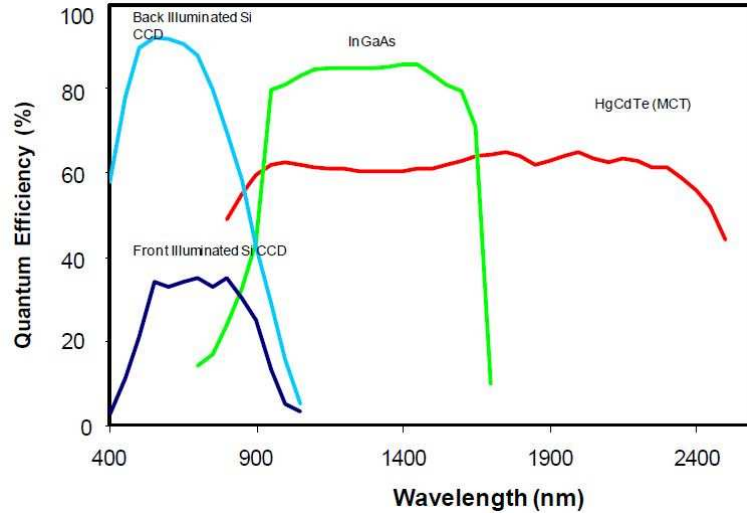


FIGURE 2.6: Réponse spectrale des détecteurs conventionnels dans la PEM [2].

Afin d'améliorer considérablement les performances du système, il est important d'améliorer l'ouverture numérique (O.N.). Cette dernière est définie selon l'équation ci dessous :

$$O.N = n_i \sin\left(\frac{\alpha_{lim}}{2}\right) \text{ tel que } \alpha_{lim} = \frac{1,22\lambda}{D}$$

Avec α_{lim} : angle limite sous lequel deux objets sont séparables

λ : longueur d'onde

D : diamètre de la fente circulaire du système optique

O.N. : ouverture numérique

n_i : indice du milieu

Une façon d'augmenter l'O.N. est d'utiliser les lentilles à immersion solide (SIL : Solid Immersion Lens). Les premiers types de lentille à immersion sont les lentilles hémisphériques introduites par G. S. Kino et al [116],[117]. Elles se composent d'une demi-sphère (en verre) qui reçoit les rayons lumineux en son centre, et qui les coïncident avec l'interface verre/air. Ces optiques sont fabriquées dans le même matériau que le substrat sur lequel elles viennent se poser (Silicium(Si)/Germanium(Ge)/Arséniure de Gallium (AsGa)), ce qui permet d'éviter les sauts d'indice déviant le trajet des photons vers l'extérieur du chemin optique. La résolution spatiale peut être également améliorée en

utilisant un "pinhole" de la taille de la longueur d'onde, permettant de réaliser une sélection des rayons [118].

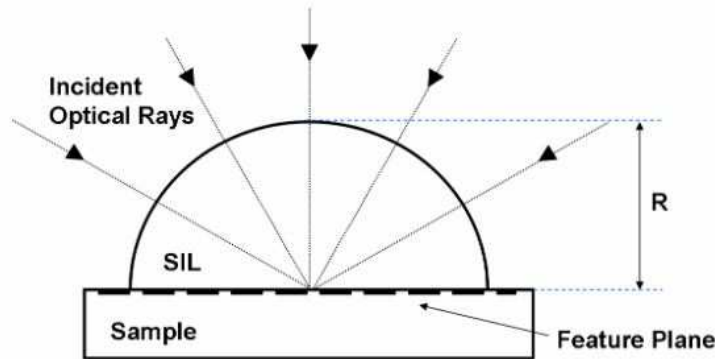


FIGURE 2.7: Schéma standard d'une lentille à immersion solide hémisphérique (h-SIL) [119]

2.2.3.3 Préparation d'échantillon

L'avantage et la limitation majeures de cette technique tiennent à ce qu'elle est de nature semi-destructive. En effet cette méthode est conditionnée par une étape de préparation d'échantillon préliminaire qui permet l'accès à la zone active du composant. Cette étape est très critique et cruciale pour le composant. Si cette étape pratique est bien réalisée, la technique de microscopie à émission de photons permet l'identification des zones de défauts sans endommager les dispositifs sains ou augmenter l'effet des défauts existants, ce qui représente un avantage important. En revanche si la préparation de l'échantillon est impossible, alors cette technique de PEM ne peut pas être appliquée. En effet l'étape de préparation d'échantillon doit s'assurer que l'ensemble des points suivants est vérifié [120] :

- ne générer aucun défaut pendant la préparation d'échantillon
- ne pas éliminer le défaut préexistant
- permettre l'utilisation de techniques d'observation, de localisation et de caractérisation après la préparation d'échantillon
- conserver la testabilité électrique pour permettre l'utilisation de la technique de localisation. Il existe plusieurs outils pour réaliser des préparations d'échantillon tels que la JetEtch(Attaque chimique avec des acides), ASAP (Attaque mécanique avec des fraises), Laser SESAM (Ablation laser). Le choix de l'outil dépend de la dimension et de l'architecture du composant sous test ainsi que des propriétés physiques, thermiques, électriques, chimiques des matériaux le constituant.

Pour des composants en boîtier, l'analyse en PEM nécessite un accès à la puce, et plus précisément à la zone active de cette puce. L'accès à la puce peut se faire soit en face

avant ou en face arrière. L'approche classique consiste à accéder à la puce tout d'abord par la face avant. Ceci peut se faire en 3 étapes (figure 2.8) :

- La première étape consiste à faire de l'imagerie en rayons X afin de connaître les dimensions de la puce.
- La deuxième étape consiste à dégager une partie du boîtier qui couvre la puce avec une ablation laser. L'ablation laser s'arrête avant d'atteindre la puce pour ne pas la détériorer.
- La troisième étape consiste à finaliser l'ouverture avec une attaque chimique. Le choix des acides dépend de la nature des bondings (connexions) et de la couche de passivation.

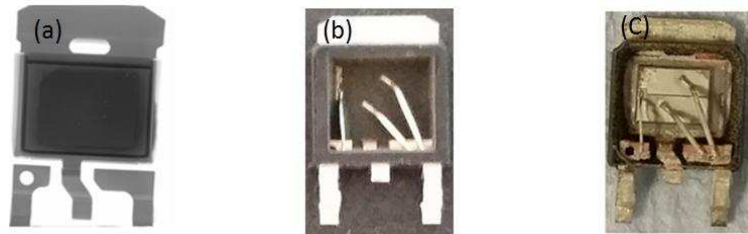


FIGURE 2.8: Ouverture en face avant d'un MOSFET Si de puissance (a) Image en Rayons X, (b) Après Ablation Laser, (c) Après Attaque chimique

Cependant l'accès à la puce par la face frontale du composant peut ne pas être suffisant ou même bloquant dans le cas de présence de couches de métallisation ou de ponts qui masquent la totalité ou une portion de la surface active. Ceci s'illustre par exemple dans le cas des deux MOSFETs Si présentés dans la figure 2.9.

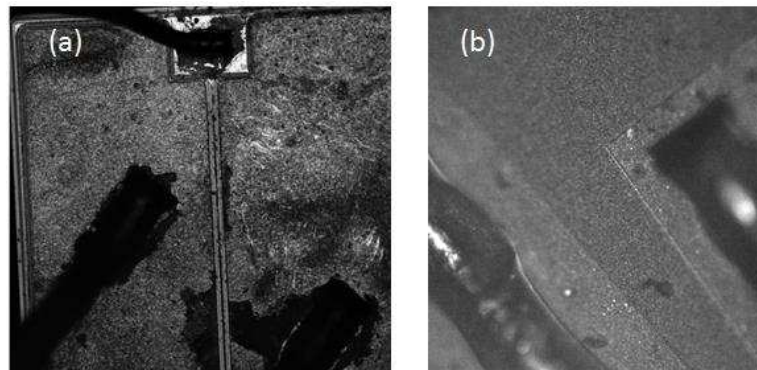


FIGURE 2.9: Vue optique de la face avant du (a) MOSFET(A), (b) MOSFET(B) (Présence d'une couche de métallisation sur la face avant de ces deux composants qui rend la PEM en face avant impossible)

En effet dans les circuits modernes, l'imagerie par la face avant du circuit est limitée par le grand nombre de niveaux de pistes métalliques. D'autre part dans certains cas, comme celui des puces reportées en flip-chip, la surface frontale du dispositif est complètement

inaccessible. Pour surmonter ce problème, il existe une approche alternative. Cette approche consiste à accéder à la puce par la face arrière à travers le substrat. Dans ce cas, la localisation de défauts est possible en face arrière car la couche métallique ne s'interpose plus entre le défaut et la caméra et seul le substrat intervient [121]. Pour que les rayons émis traversent le substrat et soient détectés par la caméra, le substrat doit être aminci à une épaisseur qui le rend transparent par rapport à la gamme de longueurs d'onde en question. L'amincissement du substrat s'avère parfois très difficile ou presque impossible. Pour des substrats en silicium, il est nécessaire de laisser une épaisseur inférieure à $180\mu\text{m}$ afin d'apercevoir des émissions en visible et proche infrarouge [122]. Par exemple, l'amincissement du substrat du MOSFET Si présenté dans la figure (2.10) s'avère impossible. En effet, vu la taille des cellules ($2\mu\text{m}$) qui est très petite (figure 2.10-a), le substrat doit être aminci à une épaisseur inférieure à $60\mu\text{m}$. Et en essayant d'atteindre de faibles épaisseurs ($< 60\mu\text{m}$) le risque de casse de la puce augmente beaucoup. (figure 2.10-(b,c)).

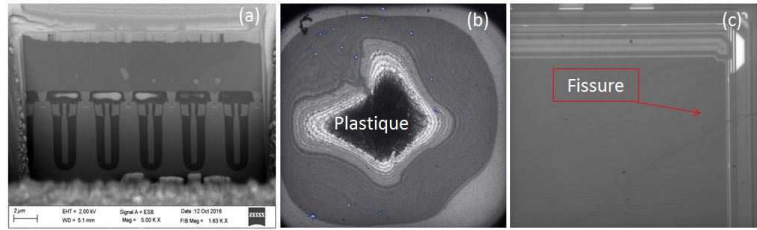


FIGURE 2.10: (a) Vue en FIB d'une cellule élémentaire d'un MOSFET Si de puissance neuf : ($2\mu\text{m}$ de largeur). (b-c) Ouverture face arrière : (b) Le MOSFET est cassé au milieu lors de l'amincissement du substrat. (c) Fissure de la puce du MOSFET lors de l'amincissement du substrat.

Avant de procéder à une ouverture en face arrière, il est nécessaire de réaliser une micro-section du composant sous test afin d'observer l'empilement des différentes couches du composant, les identifier et mesurer leur épaisseurs (figure 2.11). Suite à cette étape, l'ouverture en face arrière est réalisée par un polissage mécanique qui consiste à dégager toutes les couches au-dessous du substrat. Cette dernière doit être par la suite amincie et polie jusqu'à avoir une surface avec un poli miroir qui permet la visualisation de la structure par transparence (figure 2.12).

2.3 Microscopie à émission de photons spectrale

2.3.1 Notion de la signature spectrale

Dernièrement, les chercheurs dans le domaine de l'analyse de défaillance ont porté un grand intérêt au mode spectroscopique de la microscopie à émission de photons, où la

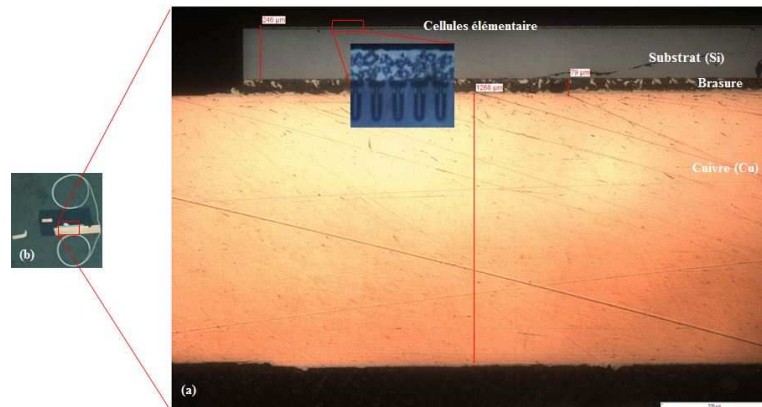


FIGURE 2.11: (a) Vue optique d'une micro-section (polissage) d'un MOSFET Si de puissance neuf enrobé dans une résine conductrice. (b) Composant enrobé



FIGURE 2.12: Les différentes étapes d'ouverture en face arrière d'un MOSFET de puissance

PEM n'est pas seulement utilisée en mode d'imagerie panchromatique pour localiser les sites de défaillance, mais aussi pour caractériser et identifier les défauts à travers la distribution en longueur d'onde des photons émis par les défauts. Ainsi les performances de la PEM sont étendues davantage pour déterminer à la fois la localisation du défaut et le mécanisme de défaillance sans être obligé d'utiliser d'autres techniques destructives.

Un système spectral à émission de photons permet l'extraction des informations liées à l'empreinte propre du défaut identifiant les mécanismes de défaillance [123]. Le principe de base repose sur la notion d'enveloppe spectrale propre à chaque phénomène émissif observé, puisque chaque mécanisme de défaillance possède sa propre caractéristique spectrale [15] (figure 2.13).

2.3.2 Systèmes d'analyse spectrale en émission de photons

2.3.2.1 Système à base de filtre passe bande

Jusqu'à présent, de nombreuses techniques ont été proposées pour l'analyse spectrale de l'intensité d'émission. L'approche la plus simple est l'utilisation de filtres passe-bande spectraux [124] [115] [126]. Cette technique consiste à faire passer la lumière émise par

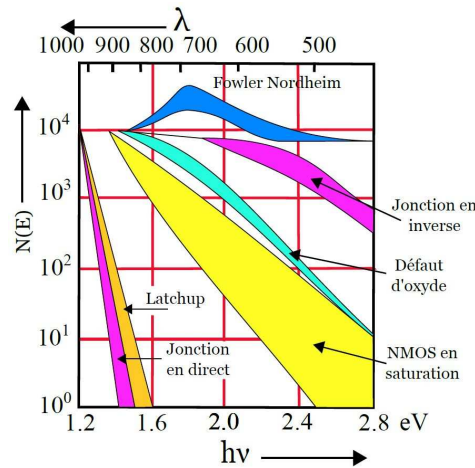


FIGURE 2.13: Enveloppe spectrale des différents mécanismes de défaillance des composants Si [124][125].

le composant sous test à travers des filtres passe-bande, ce qui permet de récupérer un spectre discret (figure 2.14). Cependant, ce système de filtres présente plusieurs inconvénients. En effet, ces filtres ont usuellement de faibles facteurs de transmission (50 %), ce qui nécessite une calibration adéquate et exige une grande intensité de lumière [102]. Pour couvrir tout l'intervalle de fréquences du détecteur, il faut utiliser séquentiellement plusieurs filtres spectraux, ce qui augmente le temps d'acquisition et peut endommager davantage le composant sous test.

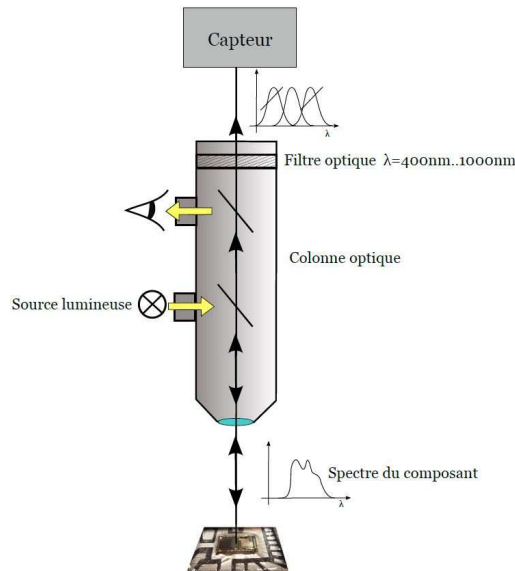


FIGURE 2.14: Schéma d'un microscope à émission de photons spectrale avec des filtres passe bande [124]

2.3.2.2 Système à base d'un miroir semi-ellipsoïdal

Une autre approche plus avancée pour obtenir un spectre continu est présentée par Liu et al [123][127]. Afin de collecter la lumière émise, un miroir semi-ellipsoïdal est placé entre le composant et la tourelle du microscope à émission de photons. La lumière collectée par ce miroir est transmise à travers une fibre optique à un spectromètre et un détecteur (figure 2.15). Cette méthode est très coûteuse, car afin d'assurer une détection continue de la longueur d'onde de la lumière émise, elle nécessite deux détecteurs séparés (un couplé au spectromètre et un autre pour le microscope à photoémission) en plus d'un miroir semi-ellipsoïdal spécial. S'il y a présence de plus d'un site émissif sur le composant sous test, l'interférence des spectres des différents sites émissifs est inévitable. Par conséquent, ces interférences peuvent fausser le spectre total de l'image.

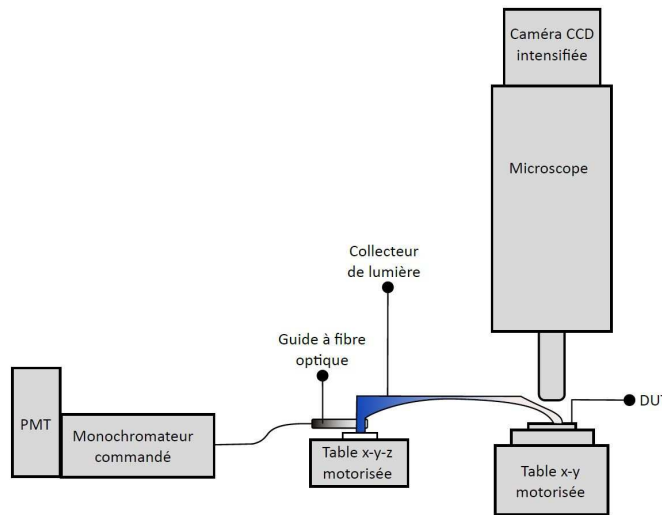


FIGURE 2.15: Microscope à émission de photons spectrale à base d'un miroir semi-ellipsoïdale comme collecteur [123]

2.3.2.3 Système à base d'un prisme

Une troisième approche consiste à utiliser un prisme comme spectromètre. De Kort utilise un prisme couplé avec une lentille pour diriger la lumière émise jusqu'à un deuxième détecteur à travers une lame séparatrice [128] [129] (figure 2.16).

Ce système est modifié ensuite par Rastras et Wolf qui placent directement le prisme et la lentille entre le microscope et son détecteur [102], [130] (figure 2.17).

Le système a été par la suite amélioré pour se passer de la lentille, et il a été utilisé dans plusieurs études de fiabilité appliquées sur différentes technologies de composants [131] [132] (figure 2.18). Cette technique fournit un spectre continu qui permet des analyses

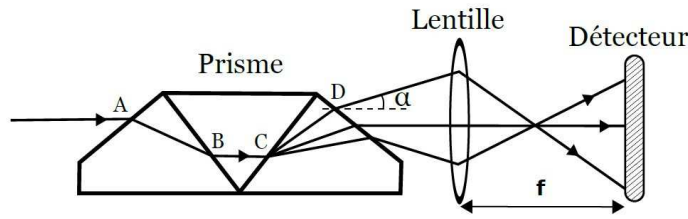


FIGURE 2.16: Schéma d'un microscope à émission de photons spectrale développé par Kort [128]

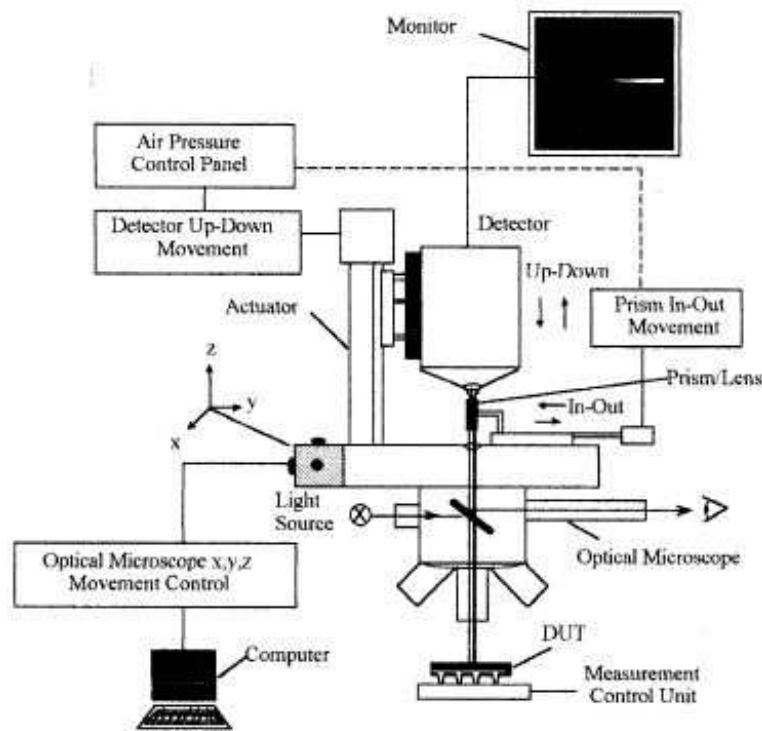


FIGURE 2.17: Schéma d'un microscope à émission de photons spectrale développé par Rastras [130]

plus fines des phénomènes émissifs. Cependant, à cause des dimensions du prisme, des limitations mécaniques entravent son implémentation dans la colonne optique.

2.3.3 Système d'analyse spectrale en émission de photons à base d'un réseau de diffraction

Une autre approche alternative existe. Elle se base sur l'utilisation d'un réseau de diffraction par transmission. Les premiers travaux utilisant ce système portaient sur l'étude des composants silicium. Dans le but d'identifier la signature spectrale des différents défauts des composants Si, ces travaux ont introduit le réseau de diffraction soit avec une

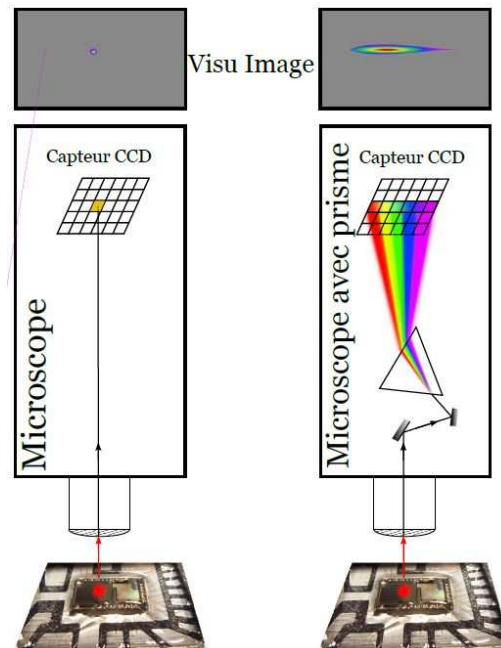


FIGURE 2.18: Analyse spectrale en photoémission avec un prisme [131]

caméra Si-CCD [133] ou une caméra MCT [134], ou encore une caméra InGaAS [135]. L'avantage du réseau de diffraction est sa petite taille qui le rend facile à positionner dans le chemin optique du faisceau lumineux. En effet par sa construction mince, et sa taille équivalente à celle d'un filtre passe-bande, son installation exige une faible hauteur, quelques millimètres disponibles dans le parcours du faisceau entre le microscope et le capteur. En outre avec ce système on obtient en plus du spectre sur l'ordre 1, la position du défaut sur l'ordre 0. Ce qui nous permet d'avoir une référence pour la calibration et mieux localiser le défaut. L'inconvénient principal de ce dispositif se présente dans le fait que seule une partie du détecteur est couverte par le spectre (premier ordre), ce qui entraînera une résolution spectrale inférieure à celle des systèmes décrits ci-dessus. Notre choix s'est porté sur ce dispositif pour étudier des technologies de composants à large bande interdite. Afin d'extraire le spectre des défauts de nos composants d'étude, nous utilisons comme spectromètre un réseau de diffraction par transmission blazé sur l'ordre 1, de pas $a=10 \mu\text{m}$. Nous présentons dans ce qui suit le principe de fonctionnement de ce dispositif, et nous décrivons le système spectral à émission de photons développé.

2.3.3.1 Théorie de la diffraction

Un réseau de diffraction est un dispositif optique à structure périodique. Il divise et diffracte la lumière en plusieurs faisceaux qui se propagent dans des directions différentes (figure 2.19).

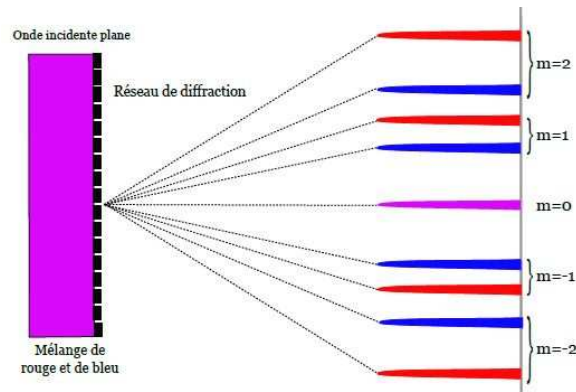


FIGURE 2.19: Principe général d'un réseau de diffraction

Le premier à avoir découvert ce principe était David Rittenhouse (un astronome américain) en 1785. Depuis Young a réalisé en 1801 quelques réseaux composés d'enroulement de fils très fins tendus entre deux vis. Mais le premier à avoir réellement saisi leur capacité et à avoir utilisé les réseaux de diffraction est le physicien allemand Joseph Von Fraunhofer en 1814 [136]. Il a réalisé des réseaux à base de fins rubans d'or déposés sur une plaque de verre. Avec ses premiers réseaux, il a pu décomposer le spectre du soleil et observer les raies d'absorption qui portent aujourd'hui son nom. Mais c'est à Rowland que l'on doit le principe de réalisation par gravage d'une lame de verre par une pointe en diamant (1882) qui a permis la première production en série de réseaux de diffraction [137]. Aujourd'hui, l'application des réseaux de diffraction est très large. Il y a ceux qui sont utilisés dans la physique fondamentale (la spectroscopie et l'analyse chimique), et d'autres qui sont utilisés dans le domaine de la production d'énergie, etc. On distingue en général deux types de réseaux de diffraction : ceux qui fonctionnent par transmission en exploitant le phénomène de la diffraction de la lumière (appelés réseaux par transmission), et ceux qui fonctionnent par réflexion en exploitant le phénomène de la réflexion (appelés réseaux par réflexion) (figure 2.20). On s'intéressera au réseau de diffraction par transmission, car nous utiliserons ce dispositif pour diffracter la lumière émise par le DUT et extraire la signature spectrale.

Le réseau de diffraction par transmission est une structure périodique qui a la forme d'un petit écran rigide percé d'un grand nombre N de fentes très fines, identiques, parallèles, et équidistantes, situées dans un même plan. La distance qui sépare deux points homologues de deux fentes consécutives est appelée la période spatiale ou le pas du réseau. Ce réseau est généralement constitué d'une surface réfléchissante sur laquelle ont été gravés plusieurs milliers de sillons étroits et parallèles. Lorsqu'il atteint une telle surface, un faisceau lumineux est dispersé, ou diffracté, dans toutes les directions à partir de chaque sillon.

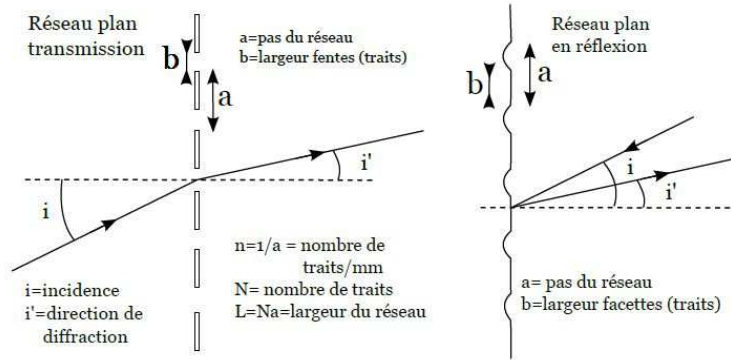


FIGURE 2.20: Type de réseau de diffraction : Droite : Réseau par réflexion, Gauche : Réseau par transmission

Les réseaux plans, qu'ils soient par transmission ou par réflexion, diffractent le maximum d'intensité dans l'ordre 0, là où il n'y a pas de dispersion. Les réseaux blazés, ou réseaux échelonnés, sont des réseaux non-plans mais qui permettent de diffracter un maximum de lumière dans un ordre non-nul que l'on peut fixer par construction (figure 2.21).

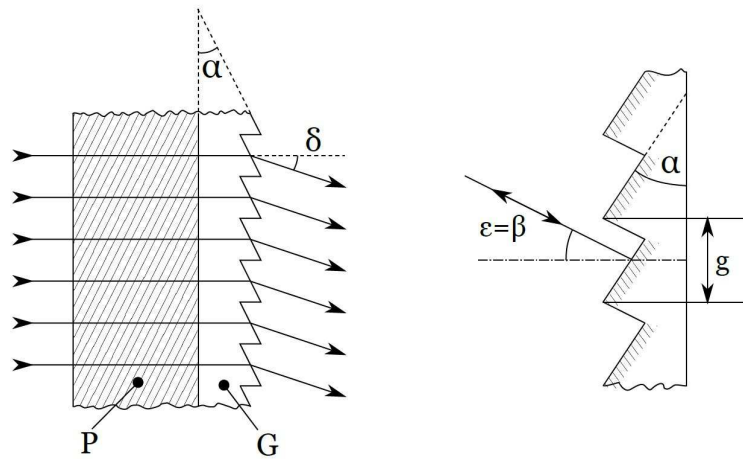


FIGURE 2.21: Réseau blazé : (a) : par Transmission, (b) : par Réflexion

Afin de comprendre le phénomène de diffraction de la lumière à travers le réseau de diffraction, on s'intéresse à la théorie de propagation d'un faisceau gaussien à travers un réseau de diffraction par transmission car le composant lorsqu'il est polarisé électriquement, émet une lumière qui, étendue, peut être approchée à un faisceau gaussien. On suppose que la lumière émise est assimilée à un faisceau gaussien (figure 2.22) caractérisé par sa composante en champ (2 dimensions) : soit une composante (2 dimensions) d'un champ électrique gaussien (eq. 2.1) :

$$E_y(x, z) = E_0 \cdot \frac{W_0}{W(z)} \cdot \exp\left[-\frac{x^2}{W(z)^2}\right] \cdot \exp\left[-\frac{jkx^2}{2R(x)}\right] \cdot \exp\left[-j(k \cdot z - \arctan(\frac{z}{z_0}))\right] \quad (2.1)$$

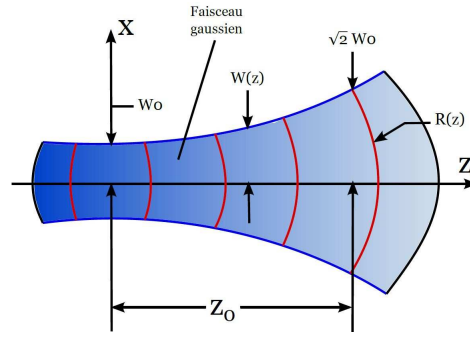


FIGURE 2.22: Représentation d'un faisceau gaussien en 2 dimensions se propageant suivant l'axe z

tel que :

- W_0 est le "Waist" du faisceau gaussien
- z_0 est la longueur de Rayleigh définie par :

$$z_0 = \frac{\pi \cdot W_0^2}{\lambda}$$

- $R(z)$ est le rayon de courbure du faisceau par rapport à l'axe optique défini par :

$$R(z) = z \cdot \left[1 + \left(\frac{z_0}{z} \right)^2 \right]$$

- $W(z)$ est la largeur du faisceau sur l'axe optique définie par :

$$W(z) = W_0 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_0} \right)^2}$$

- k est le nombre d'onde : $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

Après calcul, on peut écrire cette composante comme une somme d'ondes planes (équation 2.2), pour $N \geq 200$ [138] :

$$E_y(x, z) \approx \frac{E_0 \cdot k \cdot W_0}{2 \cdot \sqrt{\pi}} \cdot \sum_{n=1}^N \exp\left(-\frac{W_0^2 \cdot k^2 \cdot \sin(\theta_n)^2}{4}\right) \cdot \cos(\theta_n) \Delta\theta_n \cdot \exp[j \cdot k(\sin(\theta_n) \cdot x + \cos(\theta_n) \cdot z)] \quad (2.2)$$

Telle que : θ_n : angle relatif à l'orientation du vecteur \vec{k}_n par rapport à l'axe de propagation. D'où, si on note :

$$\psi_{0n} = \exp\left(-\frac{W_0^2 \cdot k^2 \cdot \sin(\theta_n)^2}{4}\right) \cdot \cos(\theta_n) \Delta\theta_n \text{ avec } \alpha_n = \sin(\theta_n) \text{ et } \gamma_n = \cos(\theta_n)$$

Alors l'équation 2.2 peut s'écrire sous forme :

$$E_y(x, z) \approx \frac{E_0 \cdot k \cdot W_0}{2 \cdot \sqrt{\Pi}} \cdot \sum_{n=1}^N \psi_{0n} \exp[jk(\alpha_n x + \gamma_n z)] \quad (2.3)$$

On note l'onde plane $\psi_n(x, z)$:

$$\psi_n(x, z) = \psi_{0n} \exp[jk(\alpha_n x + \gamma_n z)] \quad (2.4)$$

Donc :

$$E_y(x, z) \approx \frac{E_0 \cdot k \cdot W_0}{2 \cdot \sqrt{\Pi}} \cdot \sum_{n=1}^N \psi_n(x, z) \quad (2.5)$$

Les réseaux séparent une onde plane incidente en une multitude d'ondes secondaires se propageant dans des directions différentes. En fait un réseau de diffraction peut être considéré comme étant un masque régulier composé de la répétition périodique d'un motif, dans une ou deux directions [137]. Le réseau qui a été utilisé est un réseau par transmission périodique dans la direction x, invariant par translation dans la direction y, infini dans les deux directions x et y. Son coefficient de transmission s'écrit en général comme la périodicité de son motif (2.6).

$$t(x) = \sum_{l=-\infty}^{+\infty} \phi(x - la) \quad (2.6)$$

Où $\phi(x)$ est le coefficient de transmission du motif, N est le nombre de motifs, et "a" la période. L'onde plane (eq. 2.4) s'écrit à la sortie du réseau comme suit (eq. 2.7)

$$\psi_n(x, z) = \psi_{0n} \exp[jk(\alpha_n x + \gamma_n z)] \cdot t(x) = \psi_{0n} \exp[jk(\alpha_n x + \gamma_n z)] \cdot \sum_{l=-\infty}^{+\infty} \phi(x - la) \quad (2.7)$$

L'utilisation de la formule sommative de Poisson (eq. 2.8) va permettre de faire apparaître que $\psi_n(x, z)$ est une somme d'ondes planes se propageant dans des directions différentes [137]. En effet :

$$\sum_{l=-\infty}^{+\infty} \phi(x - la) = \frac{1}{a} \sum_{l=-\infty}^{+\infty} \tilde{\phi}\left(\frac{l}{a}\right) \exp(j2\pi \frac{lx}{a}) \quad (2.8)$$

D'où l'équation 2.7 peut s'écrire sous la forme :

$$\psi_n(x, z) = \frac{\psi_{0n}}{a} \sum_{l=-\infty}^{+\infty} \tilde{\phi}\left(\frac{l}{a}\right) \exp jk \left[\left(\alpha_n + \frac{l\lambda}{a} \right) x + \gamma z \right] \quad (2.9)$$

On introduit l'équation 2.9 dans l'équation 2.5 et on trouve à la sortie du réseau :

$$E_y(x, z) \approx \frac{E_0 \cdot K \cdot W_0}{2 \cdot \sqrt{\pi}} \cdot \sum_{n=1}^N \frac{\psi_{0n}}{a} \sum_{l=-\infty}^{+\infty} \tilde{\phi}\left(\frac{l}{a}\right) \exp jk \left[\left(\alpha_n + \frac{l\lambda}{a} \right) x + \gamma z \right] \quad (2.10)$$

Pour illustrer cette équation, nous avons procédé à une simulation du passage d'un faisceau gaussien polychromatique constitué de deux longueurs d'onde ($\lambda_1 = 1\mu m$ et $\lambda_2 = 2.5\mu m$) à travers un réseau de diffraction ayant un pas de $a = 10\mu m$ (figure 2.23) :

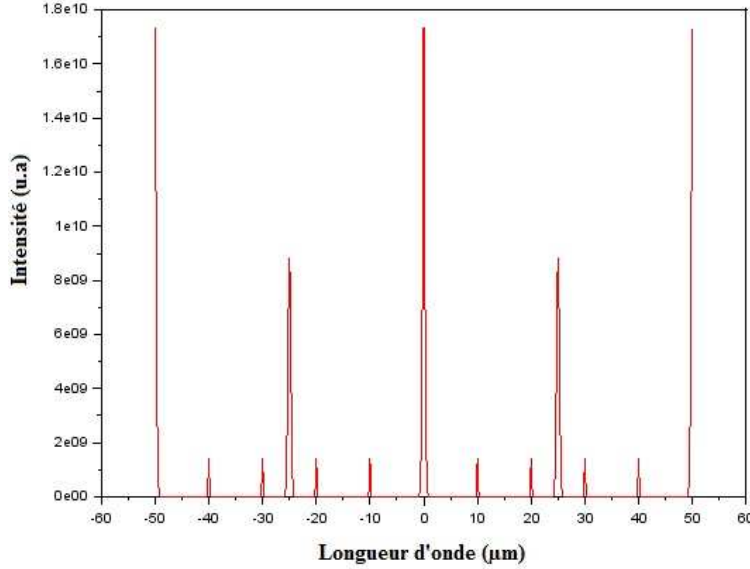


FIGURE 2.23: Profil d'intensité d'un faisceau gaussien polychromatique à la sortie d'un réseau de diffraction

Nous retrouvons sur l'ordre 0 le faisceau gaussien composé des deux longueurs d'onde $\lambda_1 = 1\mu m$ et $\lambda_2 = 2.5\mu m$. Étant donné que le pas du réseau est de $a = 10\mu m$ alors l'ordre 1 de la première composante se trouve à $10\mu m$, alors que l'ordre 1 de la deuxième composante se trouve à $25\mu m$. A $50\mu m$ l'ordre 5 de la première composante se chevauche avec l'ordre 2 de la deuxième composante. La superposition des deux composantes donne alors un faisceaux ressemblant à l'ordre 0 à ($50\mu m$).

2.3.3.2 Description et étalonnage du système

Dans notre configuration, nous utilisons le microscope à émission de photons Hamamatsu Phemos 1000 (Figure 2.24). Ce microscope comprend une chambre hermétique à la lumière possédant une source lumineuse, un microscope optique avec cinq objectifs (X0.8, X5, X20, X50, X100), une plate-forme maintenant le circuit sous test sur une table XYZ motorisée, et un détecteur assurant l'imagerie au format pixel typique (1024 x 1024). Comme détecteur, le PHEMOS 1000 est équipé par défaut d'une caméra CCD en silicium permettant l'acquisition d'une émission extrêmement faible provenant de l'appareil testé (DUT) dans la gamme de longueurs d'onde visible et infrarouge avec une plage spectrale de 350nm jusqu'à environ 1100nm. Afin de diminuer l'effet du bruit, cette caméra est refroidie à $-55^{\circ}C$ par un système peltier et eau [12]. Un détecteur InGaAs peut également être utilisé en option. Ce dernier procure une sensibilité plus grande et une réponse spectrale plus large dans la plage NIR de 900 à 1550nm (figure 2.6). De plus, le PHEMOS 1000 est équipé d'un laser de 1064nm dédié à l'analyse OBIRCH. Le PHEMOS 1000 utilisé est équipé d'un détecteur Si-CCD ayant les caractéristiques décrites dans le tableau 2.2.

Détecteur Si-CCD		
Caractérisation Physiques	Taille de l'image	1024 x 1024
	Taille Pixel	24 μm
	Température de refroidissement	$-55^{\circ}C$
	Mode de refroidissement	Peltier & Eau
Spécifications Optique	Réponse spectrale	350 - 1100 nm
	Efficacité quantique	Jusqu'à 80 %
	Résolution de l'image	(4.7 μm pour x5) & (1.2 μm pour x20)
	Résolution optique (pour $\lambda = 1100\mu m$)	(3.6 μm pour x5) & (1.2 μm pour x20)
Spécification électrique	Courant d'obscurité Moyen	0.5 electron/pix/S
	Bruit de lecture électronique	7 electrons r.m.s

TABLEAU 2.2: Spécifications de la caméra Si-CCD implémenté dans le PHEMOS1000

Afin d'extraire la signature spectrale, on insère le réseau de diffraction dans le chemin optique du microscope, entre la tourelle et le détecteur CCD (Figure 2.25).

Dans le but d'étalonner notre système, une diode électroluminescence multi-couleurs dont le spectre est présenté dans la figure 2.26 est utilisée afin d'illuminer par deux couleurs à la fois une source ponctuelle. L'image captée par le détecteur CCD (Figure 2.27) montre la diffraction de la source ponctuelle.

Un ordre est nettement plus lumineux que les autres, il s'agit de l'ordre +1 car notre réseau est blazé pour laisser plus de lumière visible passer sur ce premier ordre. C'est

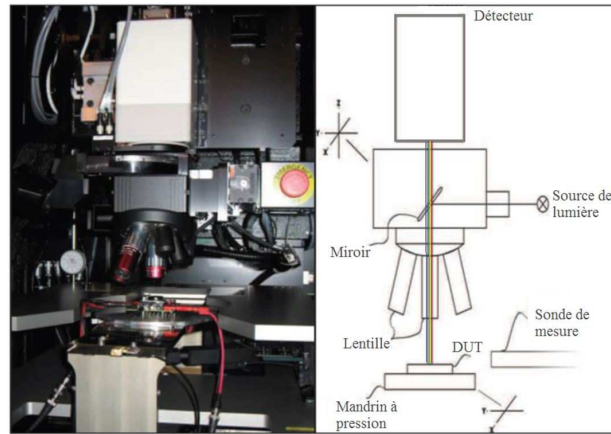


FIGURE 2.24: (a) Microscope à émission de photon PHEMOS 1000 à l'intérieur d'une chambre noire. (b) Schéma du microscope.

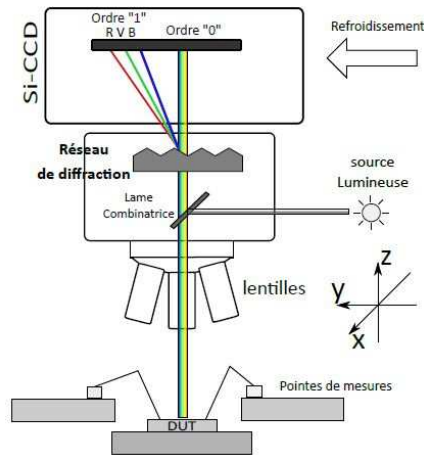


FIGURE 2.25: L'insertion du réseau de diffraction dans le chemin optique du microscope.

cet ordre que nous utiliserons pour étudier la signature spectrale des défauts. Nous nous intéressons aussi à l'ordre 'zéro' du spot, car il nous donne une référence géométrique d'étalonnage. A partir de la figure 2.27, nous trouvons le profil d'intensité qui représente le spectre d'intensité de la lumière émise en fonction des pixels (Figure 2.28). En comparant les deux figures 2.26 et 2.28, on extrait la relation entre la longueur d'onde et les pixels. Ceci nous permet de convertir le spectre brut lu de l'image capturée (Intensité en fonction des Pixels) en un vrai spectre (Intensité de l'électroluminescence en fonction de la longueur d'onde). On trouve avec une régression linéaire d'un coefficient de régression de 99% que :

$$\lambda = -5P + 2801 \quad (2.11)$$

Afin de corriger le spectre d'intensité du PE brut, un autre étalonnage est mis en place à travers la compensation de la réponse spectrale connue du détecteur Si-CCD du microscope. Pour tracer la droite de diffraction qui relie l'ordre 1, l'ordre 0 et l'ordre -1, un

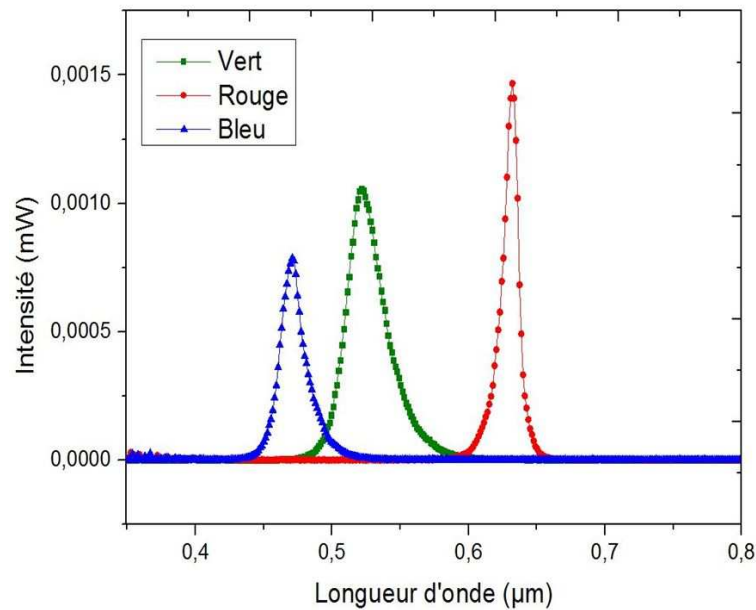


FIGURE 2.26: Spectre réel de la diode électroluminescente RVB extrait par un analyseur de spectre optique.

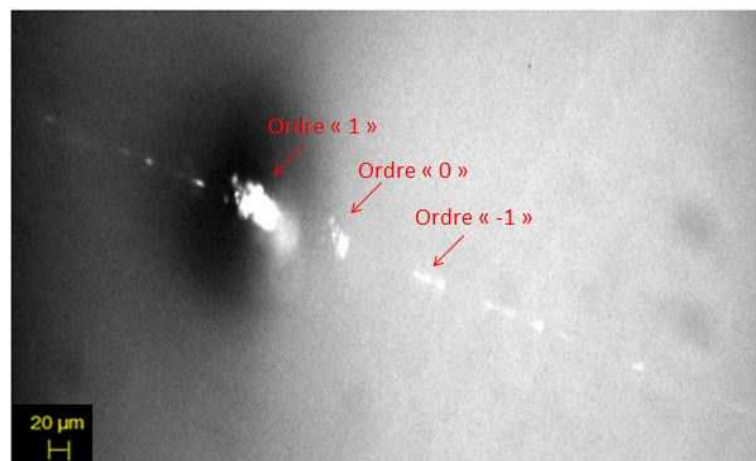


FIGURE 2.27: Diffraction de la source ponctuelle illuminée par une diode électroluminescente multi-couleur (Bleu & Rouge)

logiciel de traitement d'image a été développé sous Matlab. Ce logiciel permet l'automatisation et la répétabilité de l'extraction des spectres (figure 2.29).

En effet, ce logiciel possède une interface graphique qui permet :

- L'acquisition et l'affichage de l'image : récupération de l'image d'étude. Généralement, ce sont des images de type ".tiff" de 8 bits, 16 bits ou 32 bits selon la sortie du microscope PHEMOS).
- La sélection des régions d'intérêt. C'est-à-dire les régions où apparaissent les ordres de diffraction d'un site émissif, permettant ainsi de collecter les données de celle-ci de

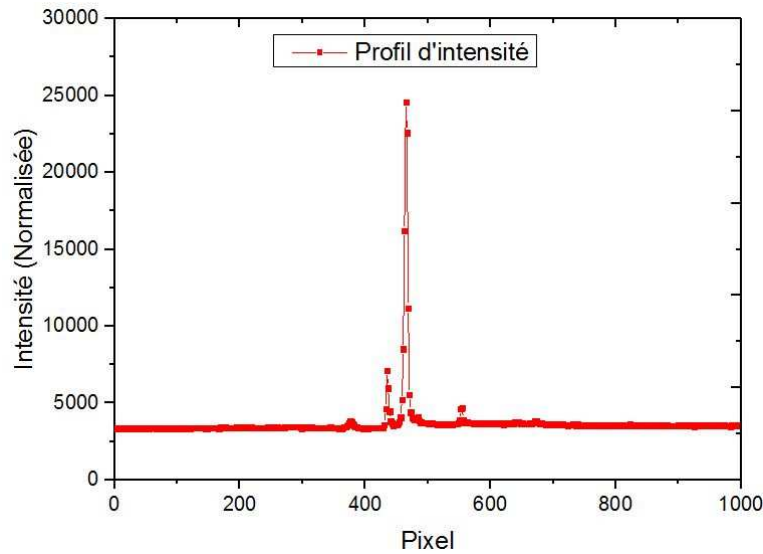


FIGURE 2.28: Profil d'intensité en fonction des positions image

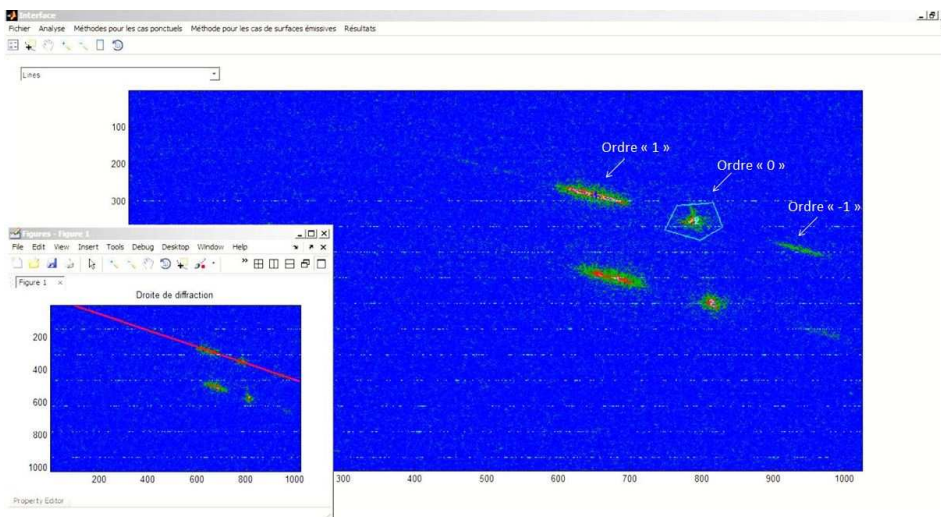


FIGURE 2.29: Tracé automatique de la droite avec affichage de ses caractéristiques

manière statistique pour pouvoir tracer la ligne.

- Le traçage de la ligne de diffraction : suivant le traitement souhaité par rapport aux données statistiques obtenues (méthode barycentrique ou par moyennage)
- Le traçage du profil d'intensité
- Le traçage du spectre : après traçage du profil d'intensité, de la relation d'étalonnage liant la longueur d'onde et les pixels, on tracera le spectre [Intensité = $f(\text{longueur d'onde})$].

A travers cet outil, le facteur "manipulateur dépendant" est réduit, et le processus d'extraction des spectres est effectué avec une forte précision. Le traitement du spectre extrait se fait à travers un autre programme développé sous Labview (figure 2.30). Ce dernier permet de fitter le spectre et d'extraire les gaussiennes le constituant en faisant appel

à l'algorithme de Levenberg Marquardt. Ceci permet d'identifier les composantes du spectre qui seront par la suite corrélées aux mécanismes de défaillance.

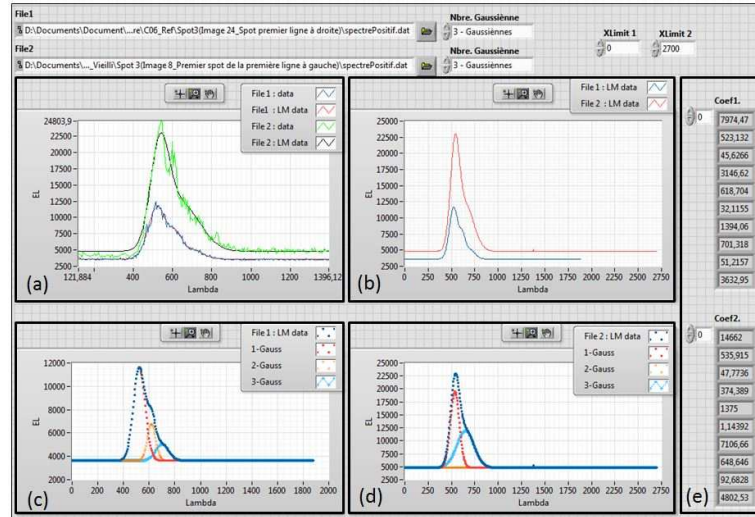


FIGURE 2.30: Traitement des spectres : (a) : Spectres d'un composant neuf (bleu) et d'un composant stressé en HTRB (vert), (b) : Spectres fittés (composant neuf (bleu) et composant stressé (rouge)), (c) extraction des gaussiennes du spectres Neuf, (d) extraction des gaussiennes du spectres, (e) paramètres des gaussiennes

2.4 Méthodologie d'étude

L'étude de la fiabilité des composants électroniques est menée à travers une méthodologie composée de différentes étapes illustrées par la figure 2.31. Il faut commencer par le vieillissement des composants avec des tests accélérés qui génèrent des dégradations ou bien une défaillance décelée avec les caractérisations électriques. Ensuite, il faut ouvrir l'échantillon et accéder à sa zone active pour localiser les défauts à travers la technique de PEM classique. La réponse spectrale du défaut est extraite ensuite à travers la PEM spectrale, pour identifier la nature du défaut. Cette dernière sera déterminée avec précision à travers les techniques micro-structurales.

L'analyse en PEM spectrale se résume en plusieurs étapes illustrées par la figure 2.32. Elle commence par diffracter le défaut localisé par la PEM et tracer automatiquement la droite de diffraction. A partir de cette dernière le profil d'intensité est extrait. Ensuite le profil d'intensité est converti en un spectre selon la relation d'étalonnage linéaire. Le spectre est par la suite corrigé selon la réponse du détecteur Si-CCD. Une fois le spectre corrigé, il est traité par l'algorithme de Levenberg Marquardt pour identifier les gaussiennes qui le constituent. Ceci permet de trouver la composition spectrale du défaut et corréler finalement cette dernière avec le mécanisme de défaillance.

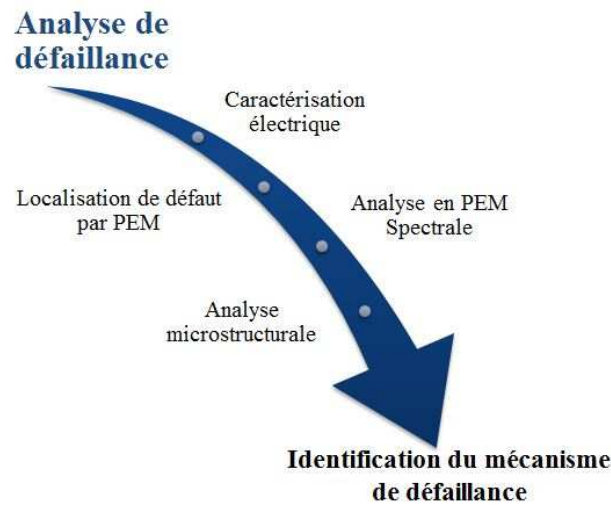


FIGURE 2.31: Méthodologie d'analyse de défaillance

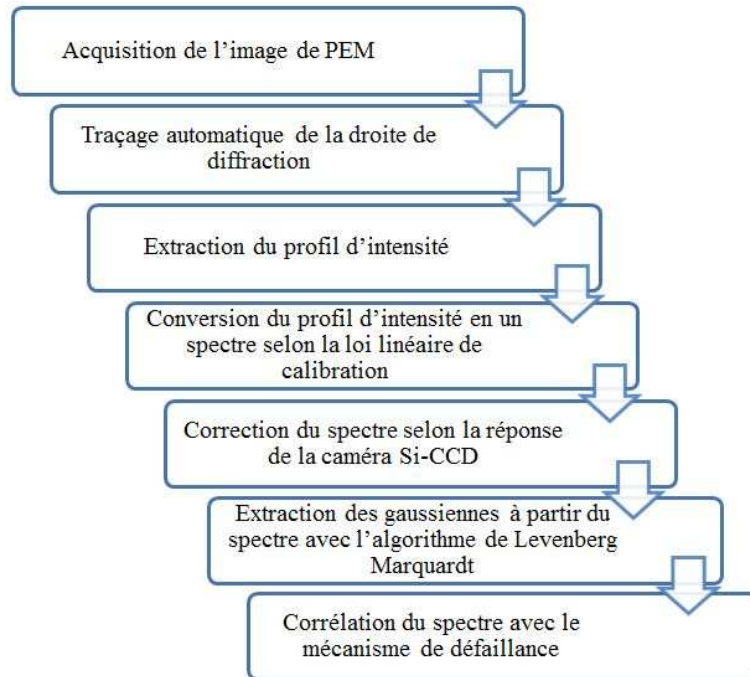


FIGURE 2.32: Étapes d'analyse spectrale en photoémission

2.5 Conclusion du chapitre

L'objectif final de l'analyse de défaillance, est de remonter à la cause de défaillance et/ou au mécanisme de dégradation. Afin de mener une analyse de défaillance, nous procédons suite à la caractérisation électrique à l'étape de localisation de défaut. Nous avons cité dans le premier chapitre les différentes techniques de localisation de défauts les plus utilisées. Parmi ces techniques, il y a la technique de microscopie à émission de photons (PEM). Dans ce chapitre, nous avons mis l'accent sur cette technique pour

comprendre mieux son principe (Électroluminescence), ses avantages (technique semi-destructive, haute résolution spatiale et sensibilité de détection ...) et ses limitations (Nature de défaut, caractéristique du détecteur, préparation d'échantillon). Nous nous sommes intéressés à la technique PEM dans son approche classique, mais aussi à son approche spectrale. En effet, nous avons développé dans ce chapitre l'évolution de cette technique vers la PEM spectrale pour extraire la signature spectrale qui servira à identifier le mécanisme de défaillance. La PEM a été améliorée grâce à un réseau blazé en transmission inséré dans le chemin optique du microscope entre la tourelle et le détecteur Si-CCD. Le système est étalonné en deux étapes. La première consiste à convertir le spectre brut extrait de l'image de PE, en un spectre reliant l'intensité d'électroluminescence à la longueur d'onde. Cette conversion se fait à travers une loi linéaire obtenue en illuminant une source ponctuelle par une diode électroluminescente multi-couleur dont le spectre est connu. Le deuxième étalonnage consiste à corriger le spectre par compensation de la réponse spectrale du détecteur. Le processus d'extraction des spectres est automatisé à travers la mise en place d'un logiciel de traitement d'image. L'analyse du spectre s'effectue à travers une interface développée dans le but d'identifier les composantes gaussiennes du spectre. Ce traitement s'effectue selon l'algorithme de Levenberg Marquardt.

La PEM est une technique qui a fait ses preuves dans l'analyse de défaillance des composants Si et GaAs, d'où l'intérêt de l'implémenter pour l'analyse de composants à large bande interdite comme le SiC et GaN. En effet, les exigences croissantes de densité de puissance aux hautes fréquences dans les systèmes embarqués et surtout dans les secteurs aéronautiques et automobiles, ont poussé les chercheurs et les industriels à s'intéresser aux matériaux à large bande interdite tels que le carbure de silicium SiC et le nitrure de gallium GaN. Nous nous intéressons dans le chapitre suivant à l'étude de fiabilité des MOSFETs SiC par le système spectral à émission de photons mis en place.

Chapitre 3

Application de la microscopie à émission de photons spectrale à l'analyse de défaillance des MOSFETs SiC de puissance

3.1 Introduction

Pour remédier aux limites des transistors à base de silicium (faible tenue en température et tension), les industriels se sont tournés récemment vers les nouvelles technologies de composants à large bande interdite ou "grand gap" comme le carbure de silicium (SiC). Cette technologie a fait son apparition sur le marché industriel depuis les années 2000. Grâce aux performances du carbure de silicium (meilleurs rendements, fréquences de découpage plus élevées, potentiel important de fonctionnement en haute température), les MOSFETs SiC ont pu entrer en compétition face aux composants Silicium. Cependant, vu le manque de retour d'expérience concernant la fiabilité de cette technologie de semi-conducteur, les parts de marché du SiC restent limitées dans l'industrie. C'est pour cette raison que plusieurs industriels et de nombreux fabricants de composants à semi-conducteur, cherchent à répondre à cette question en réalisant des tests de vieillissement et en analysant les mécanismes de dégradation des MOSFETs SiC. A ce titre, ce chapitre mène une étude axée sur l'analyse de défaillance des MOSFETs SiC de puissance à travers la méthodologie décrite dans le chapitre II.

La première partie de ce chapitre présente une description du composant d'étude (sa structure et son principe de fonctionnement), ainsi qu'un état de l'art sur les mécanismes

de défaillance des MOSFETs SiC. La deuxième partie sera consacrée à l'analyse en PE des transistors MOSFETs SiC et à l'étude de l'origine de l'émission de lumière dans ces structures. La troisième partie présente les premiers travaux d'application du système de PEM spectrale. Elle développe des études de cas où nous évaluons à travers des tests préliminaires de vieillissement et des analyses par la PEM spectrale, la robustesse des MOSFETs SiC vis-à-vis des décharges électrostatiques, ainsi que leurs performances à des hautes températures avec le stress HTRB.

3.2 Présentation du composant d'étude

Le développement des MOSFETs en 1960 fut une vraie révolution dans l'électronique de puissance. Ils sont très réputés pour leur temps de commutation très faible puisqu'ils sont des transistors unipolaires et ils ne possèdent pas de charges stockées à évacuer lors de l'ouverture [139]. Ces dispositifs sont considérés actuellement comme le cœur de chaque circuit numérique. Ils sont très employés vu leur caractère normalement bloqué (normally-off) qui facilite leur utilisation. Nous distinguons deux types de MOSFET selon la nature de porteur constituant le courant dans le canal : transistor NMOS où le canal n est constitué d'électrons et le PMOS où le canal p est constitué de trous [140]. Il existe plusieurs variantes de structures de MOSFET, les premières développées étaient de type latéral et furent rapidement remplacées par des structures verticales qui visent l'amélioration des performances du composant (tenue en tension, calibre en courant, état passant ou performances dynamiques) [141]. Différents types de structures verticales existent telles que les structures D-MOSFET, U-MOSFET, SC-MOSFET, CC-MOSFET, GD-MOSFET et SJ-MOSFET [142]. Nous focalisons notre étude uniquement sur des transistors D-MOSFET (double-diffused MOS) à canal n à enrichissement, correspondant à notre composant sous test (DUT Device Under Test). Cette structure a été identifiée par des investigations au MEB comme montré sur la figure 3.1.

La figure 3.1 présente une vue en coupe d'une cellule élémentaire du MOSFET étudié. Le composant est constitué de cellules élémentaires mises en parallèle pour obtenir de fortes densités de courant. Le composant peut être alimenté par une tension maximale de 1200V et un courant maximal de 19A. Comme on peut voir sur la figure 3.1, la structure élémentaire est constituée de trois électrodes : l'électrode de drain, l'électrode de source, et l'électrode de grille. Cette dernière est déposée sur un isolant (couche d'oxyde de grille en SiO_2 (figure 3.2)), recouvrant un substrat semi-conducteur comprenant deux régions. La région de drift N^- permettant la tenue en tension, et la région du canal située en surface de type P (en contact avec l'oxyde de grille) contrôlant l'état passant ou bloqué du composant [141]. En effet, le transistor ressemble à un interrupteur commandé selon

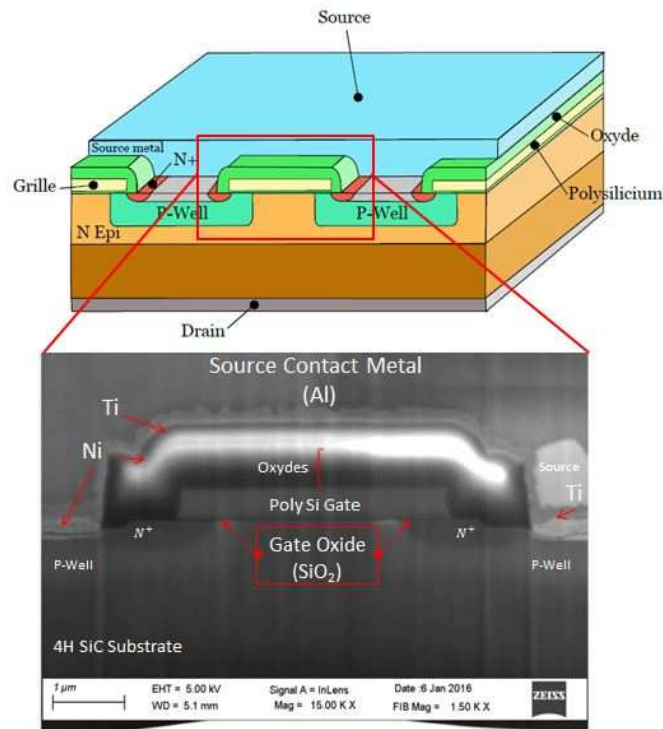


FIGURE 3.1: Vue de la structure d'une cellule élémentaire du D-MOSFET (Haut). Vue en microscope électronique à balayage de la structure du D-MOSFET SiC (Bas)

la polarisation de sa jonction grille-source. Pour le mettre en conduction et à l'état ON, il suffit d'appliquer une tension V_{gs} positive (supérieure à la tension de seuil V_{TH}). Sous l'effet du champ électrique appliqué à la grille, une zone de porteurs minoritaires (électrons) appelée canal, est créée à l'interface P/oxyde, dans le semi-conducteur. Par contre, lorsque la polarisation de la grille est nulle, le transistor est bloqué car la surface de type P joue le rôle d'un isolant en évitant toute circulation de courant entre drain et source.

L'analyse EDX du composant d'étude nous montre la composition du MOSFET d'étude. Il s'avère que l'oxyde de grille est en SiO_2 , que la métallisation de la source est en Al, alors que le substrat est en carbure de silicium (figure 3.2).

3.3 Mécanismes de défaillance des MOSFETs de puissance

Durant la dernière décennie la communauté scientifique a révélé plusieurs mécanismes de dégradation des MOSFETs, tels que la dégradation par porteurs chauds, le claquage d'oxyde de grille, les défauts d'interconnexion dus à l'électromigration, ou encore les problèmes liés à la température [143].

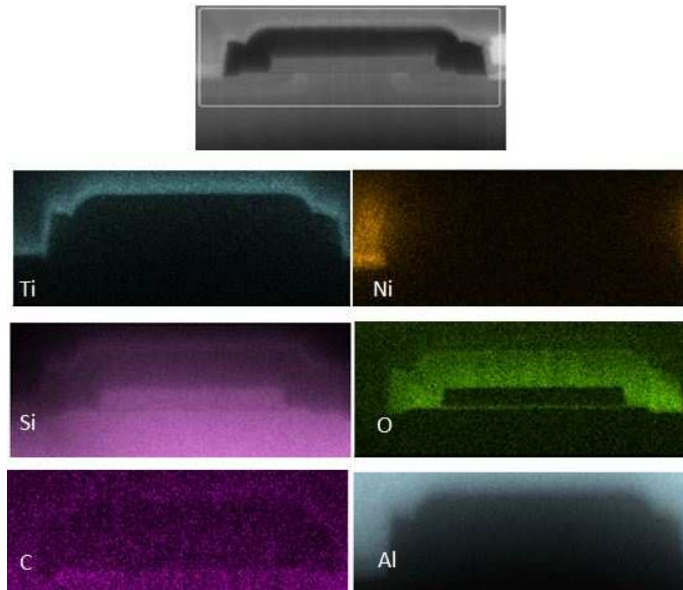


FIGURE 3.2: Analyse en EDX du composant d'étude

3.3.1 Effet des porteurs chauds (Hot Carrier lifetime)

On appelle communément porteurs chauds, tout porteur de charge ayant acquis une énergie cinétique importante, c'est-à-dire ayant été fortement accéléré sous l'effet d'un champ électrique intense [144]. Vu que les longueurs de canal se rétrécissent, le champ électrique dans le canal augmente avec le maintien de la tension d'alimentation à des valeurs constantes. Les porteurs de charge deviennent ainsi très "chaud" et entraînent la génération de paires électron-trou dans un cristal [145]. Pour les transistors MOSFETs, ce phénomène est indésirable et peut entraîner des défaillances de fonctionnement des circuits. En effet, ces électrons chauds peuvent être injectés dans la barrière d'oxyde provoquant ainsi un courant de grille par effet tunnel. Ils peuvent également provoquer le piégeage de charges dans l'oxyde ou entraîner une détérioration du dispositif par rupture des liaisons dans la zone d'interface semi-conducteur-oxyde [146]. Ceci est particulièrement dangereux, car avec le temps le composant se dégrade et éventuellement le circuit basé sur le dispositif perd sa fonctionnalité. Le champ électrique élevé provoque également l'ionisation par impact à proximité de l'extrémité de drain du canal. Afin d'éviter le phénomène d'électrons chauds, les MOSFETs sont conçus de telle sorte que le champ électrique ne soit excessif dans aucune région du dispositif.

Dans un transistor MOSFET à canal n, le mécanisme d'injection de porteurs (figure 3.3) est décrit par le modèle de l'électron chanceux ("lucky electron") [147]. Lorsque le composant est en mode de saturation, des électrons sont injectés dans la région dépeuplée de la jonction Drain-Substrat. Si le champ électrique est important dans cette région,

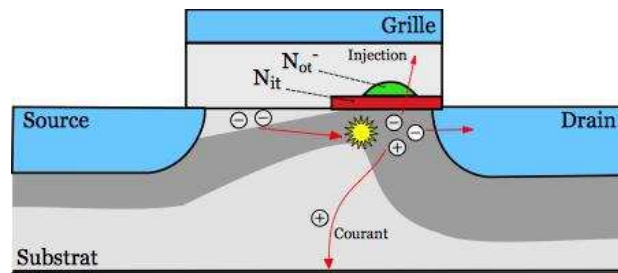


FIGURE 3.3: Génération et injection d'électrons chauds dans un transistor MOSFET à canal de type n [144].

quelques électrons acquièrent assez d'énergie pour causer l'ionisation par impact lors des chocs dans le réseau cristallin. Ceci cause la génération de paires d'électron-trou [148].

3.3.2 Electromigration

L'électromigration est un phénomène de mouvement d'atomes métalliques, engendré par la combinaison de l'effet de la haute température et du courant électrique [143][149]. Le flux d'électrons génère, par collisions élastiques, un déplacement des atomes (transfert de quantité de mouvement) dans le sens de la propagation électronique qui peut être non uniforme tout au long de la zone métallique [150]. Ceci peut entraîner de nombreux problèmes tels que l'apparition de lacunes, voids (affaiblissement du conducteur menant à un circuit ouvert) ou des amas métalliques (accumulation de matières pouvant conduire à un court-circuit) [151] (figure 3.4).

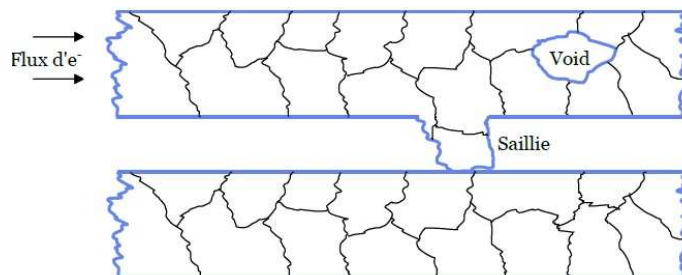


FIGURE 3.4: Les voids et les saillies entraînent la défaillance du circuit

3.3.3 Time-Dependent Dielectric Breakdown (TDDB)

Avec la miniaturisation des circuits intégrés, la couche d'oxyde de grille devient extrêmement mince. Ainsi, l'intensité du champ électrique devient de plus en plus importante dans cette couche. La rupture de la couche d'oxyde est provoquée soit par un défaut initial ou par sa dégradation avec le temps. En effet l'application continue d'un champ

électrique (même de faible intensité) pour une longue période, peut provoquer une rupture de la couche d'oxyde au cours du temps. Ce type de rupture est appelé un claquage diélectrique dépendant du temps (TDDB) [152]. Le TDDB peut être un mécanisme important de défaillance des MOSFETs en raison des champs électriques très élevés existant dans le diélectrique de grille de ses dispositifs [149]. Généralement après une période relativement longue de fonctionnement, le diélectrique se dégrade et subit éventuellement une défaillance qui se traduit par un emballement thermique catastrophique dû à un fort courant. Cette densité de courant localisée forme un filament conducteur dans le diélectrique qui court-circuite la grille avec le substrat dans le transistor MOSFET [figure 3.5]. Historiquement, il existe deux modèles TDDB qui ont été largement utilisés pour décrire le mécanisme TDDB. Un modèle se base sur le champ (modèle E) tandis que l'autre se base sur le courant ($1 / E$ - Modèle) [153].

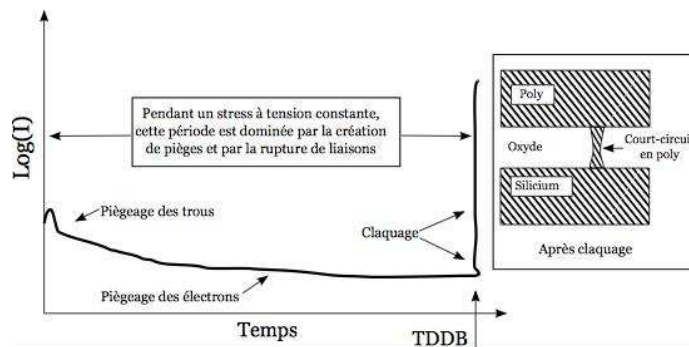


FIGURE 3.5: (a) La dégradation du diélectrique se produit à cause de la rupture des liaisons/ la création des pièges dans le diélectrique et sur l'interface Oxyde/Si. (b) Le piégeage des trous suivi d'un piégeage d'électrons se poursuit jusqu'au point de la rupture catastrophique, qui crée un court-circuit du poly-grille avec le substrat de silicium [153]

3.4 Origine de l'émission de lumière dans les MOSFETs en Carbure de silicium

Le phénomène d'émission de lumière dans les MOSFETs SiC est dû principalement à deux mécanismes différents ayant lieu au niveau de la jonction pn : la recombinaison de porteurs et les porteurs accélérés par champ [154] :

– Recombinaison par porteurs :

Quand la jonction PN est polarisée en direct, une recombinaison radiative des porteurs minoritaires est induite. En effet, les porteurs traversant la zone de charge d'espace se recombinent rapidement avec les porteurs de charge opposée [2] (figure 3.6). L'énergie des porteurs participant aux recombinaisons radiatives se traduit sur le spectre

d'émission. Ainsi l'analyse de ce phénomène sur les jonctions p-n permet l'analyse des composants bipolaires, tels que les diodes des jonctions base-émetteur des transistors bipolaires et des thyristors ainsi que les MOSFETs.

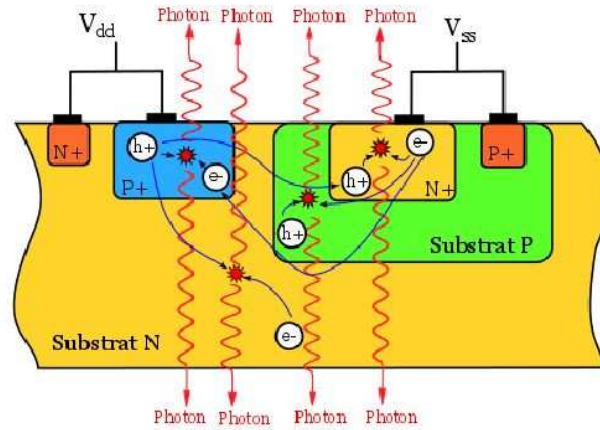


FIGURE 3.6: Émission de lumière d'une diode de protection en polarisation directe

- Les porteurs accélérés par champ électrique :

Lorsque la jonction PN est polarisée en inverse, l'émission de lumière est associée à la désexcitation radiative de porteurs fortement énergétiques. Ce phénomène intrabande est lié à l'excitation de porteurs par le champ électrique élevé qui règne dans la zone de charge d'espace [2]. En effet suite à la présence du champ électrique, les électrons acquièrent une énergie située dans une plage centrée au-dessus de la bande de conduction, tandis que les trous détiennent une énergie dans une gamme centrée en dessous de la bande de valence. Par conséquent, les photons émis lors de la désexcitation de ces porteurs possèdent une énergie se situant dans une bande d'énergie plus élevée que celle de la bande interdite. L'émission due à la désexcitation radiative de porteurs rapides, permet une investigation des fuites dans les jonctions p-n en inverse et des fuites dans les oxydes des transistors NMOS en saturation (figure 3.7) [15].

3.5 Caractérisation d'un véhicule de test de référence en photoémission classique et en photoémission spectrale

Le composant a une structure inter-digitée en (figure 3.8). L'ouverture face avant du composant avec une ablation laser suivie d'une attaque chimique, montre la présence de couches de métallisation qui rend difficile l'analyse en PE frontale (figure 3.9). D'où l'intérêt d'ouvrir le composant en face arrière. L'ouverture en face arrière se fait à travers un usinage mécanique qui commence par enlever les couches de cuivre et de brasure, et

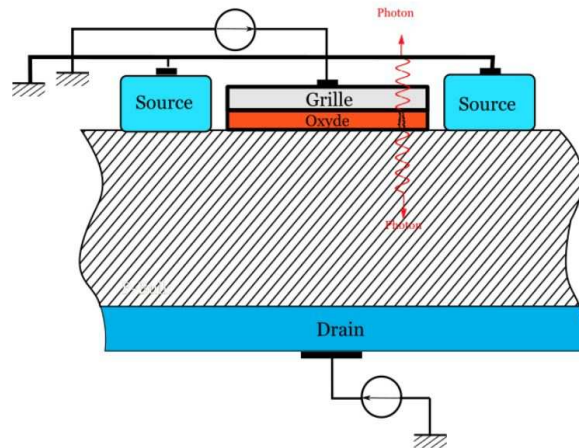


FIGURE 3.7: Émission de lumière suite à une fuite de courant dans l'oxyde

fini par une étape de polissage qui sert à obtenir une surface poli-miroir permettant de voir en transparence (figure 3.10).

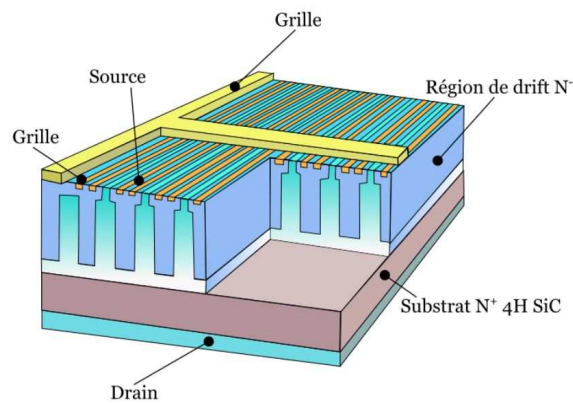


FIGURE 3.8: Schéma 3D de la structure du composant d'étude

Comme nous avons déjà vu, l'émission de lumière est due aux différentes transitions radiatives des porteurs de charges. Elle dépend ainsi du nombre des porteurs (électron et/ou trou) traversant le canal, et de la probabilité que chaque porteur émette un photon. Cette probabilité dépend fortement du champ électrique appliqué. Les paramètres agissant sur le champ électrique et intervenant donc dans l'émission de photons sont : les tensions d'alimentation et les dimensions géométriques du composant [15]. En effet, les tensions d'alimentation (grille-source (V_{gs}) et drain-source (V_{ds})) servent à la régulation à la fois du flux de courant circulant dans le canal ainsi que du champ électrique, alors que l'impact des dimensions géométriques s'exprime au travers de certains paramètres tels que la largeur de grille (W) et l'épaisseur de l'oxyde de grille (C_{ox}). On peut illustrer la contribution de tous ses paramètres à travers l'équation du courant d'un D-MOSFET en zone de saturation qui s'exprime sous la forme suivante (eq. 3.1) :

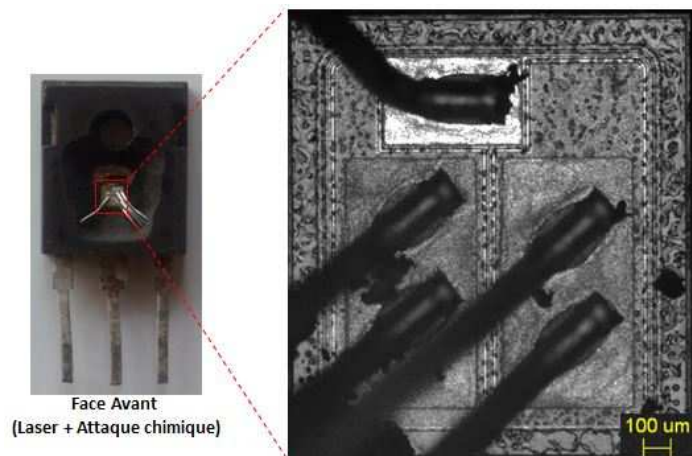


FIGURE 3.9: Ouverture Face avant du composant d'étude

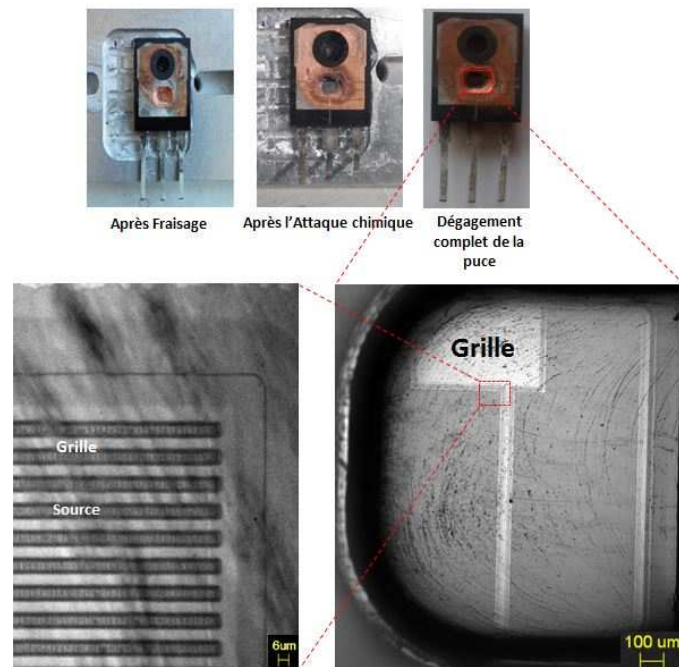


FIGURE 3.10: Étapes d'ouverture en Face arrière du composant d'étude

$$I_{ds} = \mu C_{ox} \left(\frac{W}{L_{eff}} \right) (V_{gs} - V_{th})^2 \quad (3.1)$$

Où V_{gs} est la tension appliquée entre la grille et la source, V_{th} représente la tension de seuil, μ est la mobilité des porteurs, W est la largeur du canal et L_{eff} représente la longueur efficace du canal entre la source et le drain.

De manière générale, l'émission de photons dans un transistor MOSFET dépend linéairement des dimensions géométriques et exponentiellement des tensions d'alimentation [15]. Afin de caractériser l'émission issue d'un transistor MOSFET neuf, une corrélation

entre l'intensité lumineuse et le comportement électrique est établie. Nous avons procédé à une étude du phénomène selon deux protocoles de mesure [155]. Le premier protocole consiste à mesurer l'intensité d'émission de photons (PE) en variant la tension V_{ds} pour une valeur de V_{gs} constante ($V_{gs} = 2.6$ V). Le deuxième protocole consiste à mesurer l'intensité de PE en variant la tension V_{gs} pour une valeur de V_{ds} constante ($V_{ds} = 8.6$ V)(figure 3.11). L'augmentation linéaire de l'intensité de PE selon la tension V_{gs} nous confirme que le phénomène d'EL est linéairement dépendant de la commande de grille.

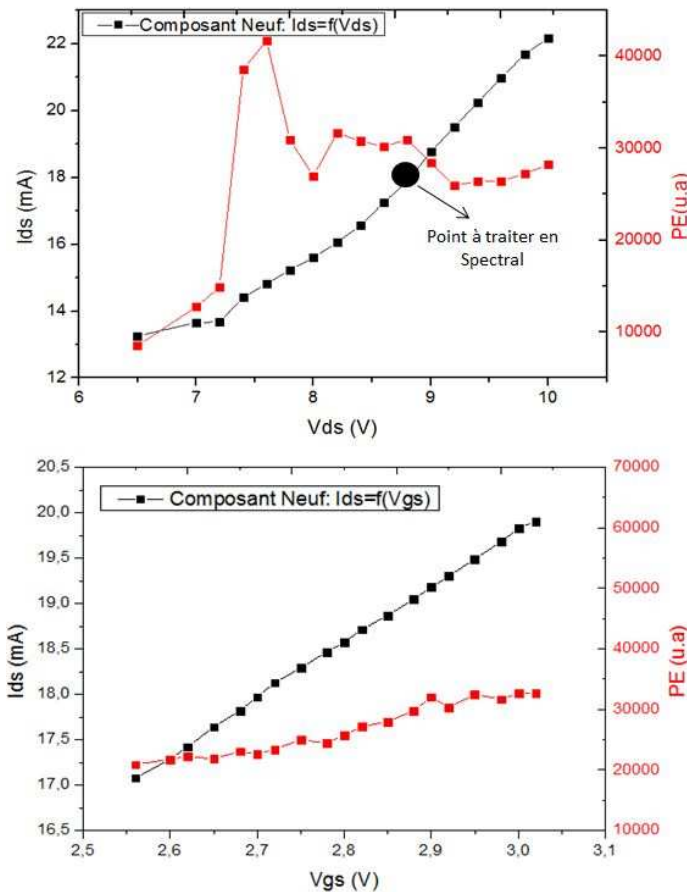


FIGURE 3.11: Composant Neuf : A gauche : Caractéristique de sortie $I_{ds} = f(V_{ds})$ pour $V_{gs}=2.6$ V vs PE, à droite : Caractéristique d'entrée $I_{ds} = f(V_{gs})$ pour $V_{ds}=8.6$ V vs PE

En faisant varier le mode de polarisation appliquée (tension et courant), nous constatons un changement des zones actives en PE. La figure 3.12 montre la signature en PE d'un composant neuf de référence en fonction de différentes polarisations. A partir de cette figure, nous remarquons qu'à faible champ, seulement le bord de la grille s'active (images 1 et 2). Cependant, en augmentant les tensions d'alimentation, nous commençons à voir progressivement les bouts des lignes des transistors (image 3) s'illuminer, ainsi que des zones ponctuelles (hot spot) en dessous de la grille (image 4). Pour les très fortes tensions, nous observons une illumination de toutes les lignes du transistors (image 5). L'origine de

cette électroluminescence provient certainement d'un guidage entre différents matériaux avec pour origine une émission de la jonction PN comme démontré un peu plus loin.

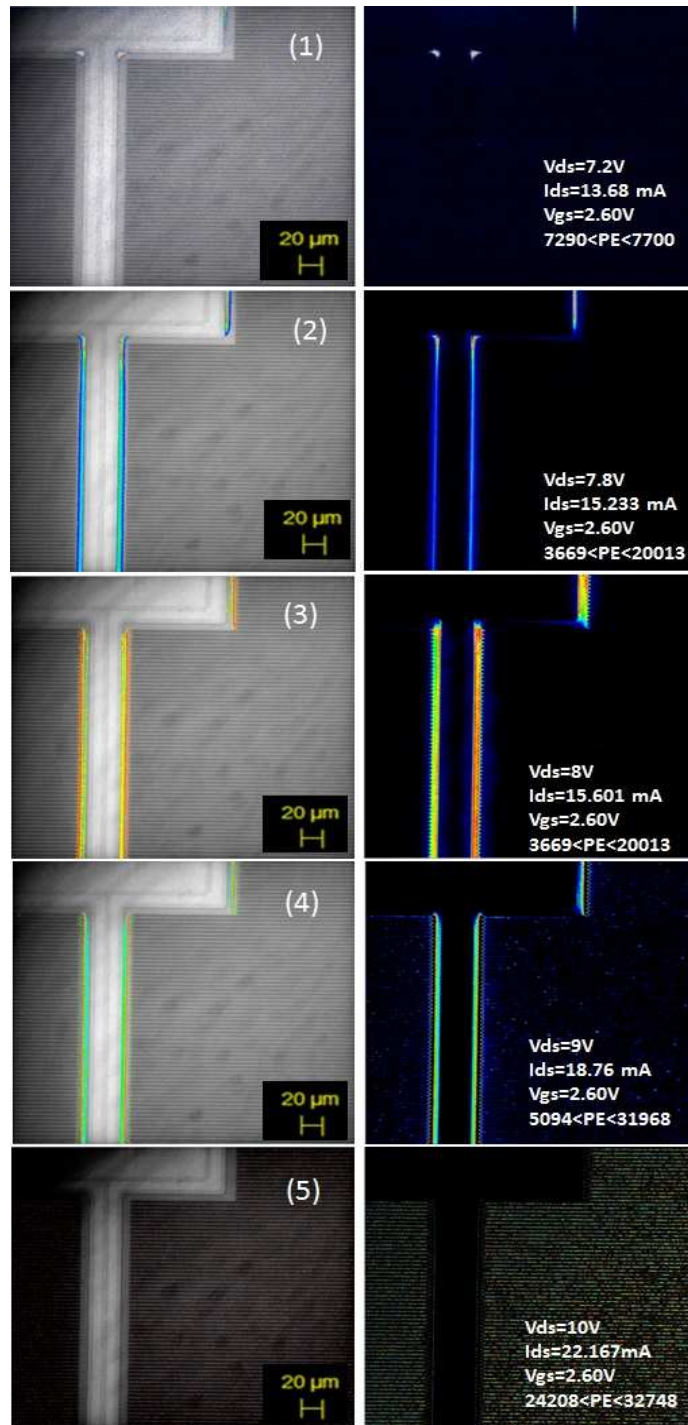


FIGURE 3.12: Signature en PE Vs Polarisation électrique

L'analyse en PEM spectrale d'un point ponctuel nous donne une enveloppe spectrale qui a la forme d'une goutte (image du haut de la figure 3.13). Cette forme correspond selon Parassin [135] à une luminescence d'une diode polarisée en direct. Ce qui suggère

que l'émission de lumière dans notre composant d'étude est due à la luminescence de la jonction PN du MOSFET.

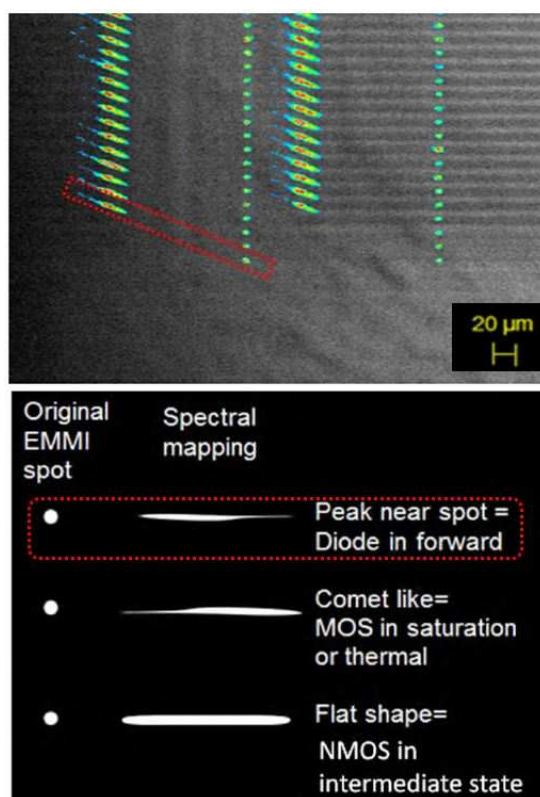


FIGURE 3.13: haut : Diffraction de la signature en EL du composant d'étude (Pour $V_{ds} = 16V$; $I_{ds} = 15.536mA$; $V_{gs} = 1.63V$). Bas : Forme de diffraction des différents mécanismes d'EL dans un MOSFET [135]

Pour vérifier cette hypothèse et remonter à l'origine de l'émission de lumière dans ce transistor, nous procédons à une coupe verticale de l'échantillon, (figure 3.14) sur laquelle nous effectuons une analyse en PE. L'analyse en émission de photons de cette coupe montre deux types de spots : des spots localisés sur les caissons (figure 3.15), et des spots au dessus de la grille ou à côté de la grille côté source (figure 3.16).

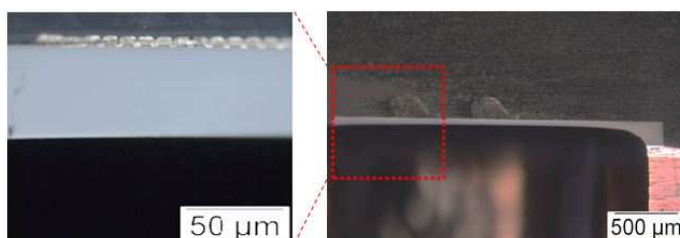


FIGURE 3.14: Image de la coupe du composant d'étude

Ceci montre que l'émission de lumière se fait au niveau de la jonction PN et se guide dans le diélectrique (figure 3.17). En fait, l'interface Source/diélectrique/Grille dans le composant se comporte comme un guide d'onde classique. En revanche le guidage dans

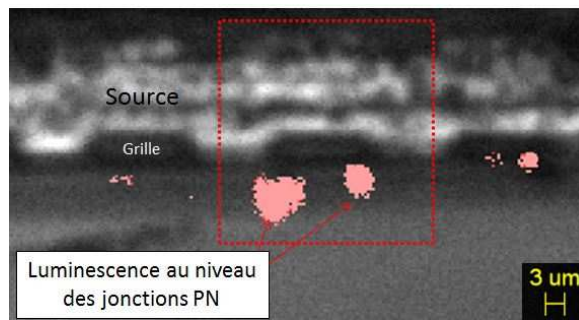


FIGURE 3.15: Origine de l'émission de lumière dans le composant d'étude

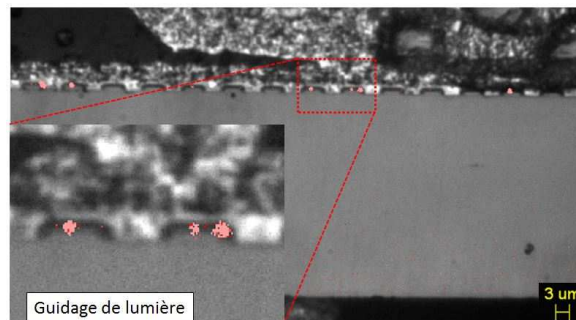


FIGURE 3.16: Visualisation de l'EL guidée sur la coupe du composant

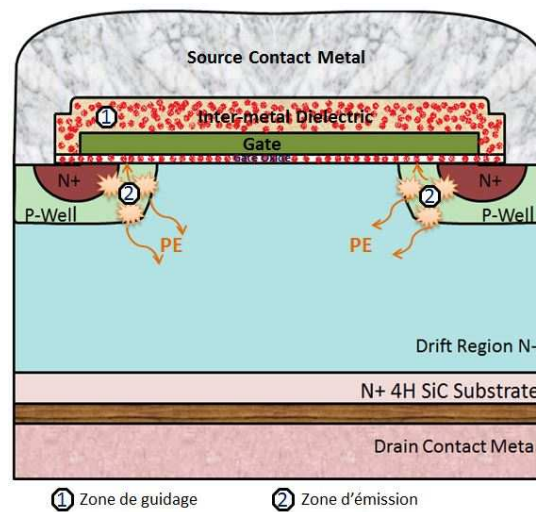


FIGURE 3.17: Génération et guidage de la lumière dans le MOSFET sous test

l'interface SiC/Oxyde de grille/Source est dû à une fuite par champ évanescent. En effet, l'oxyde de grille SiO_2 possède à la fois un indice de réfraction inférieur à l'indice de réfraction du SiC ($n(SiO_2) < n(SiC)$), et supérieur à l'indice de réfraction de la source qui est en aluminium ($n(SiO_2) > n(Al)$) pour les longueurs d'onde d'étude (450 nm - 690 nm) (voir figure 3.18 et équations 3.2, 3.3, 3.4, 3.5). Par conséquent, la lumière émise par la jonction PN se décompose en deux types de rayons : des rayons qui s'échappent à travers le substrat et se présentent comme des hot spots (figure 3.19 image 2), et des

rayons qui se guident à travers le diélectrique et par conséquent on les visualisent au bout des doigts du transistor (figure 3.19 image 1).

– Pour le SiO_2 :

$$n^2 - 1 = \frac{0,6961663\lambda^2}{\lambda^2 - 0,0684043^2} + \frac{0,4079426\lambda^2}{\lambda^2 - 0,1162414^2} + \frac{0,8974794\lambda^2}{\lambda^2 - 9,896161^2} [156] \quad (3.2)$$

– Pour le 4H-SiC :

– Pour les ondes ordinaires :

$$n^2 - 1 = \frac{5,5394\lambda^2}{\lambda^2 - 0,026945} [157] \quad (3.3)$$

– Pour les ondes extraordinaires :

$$n^2 - 1 = \frac{5,7292\lambda^2}{\lambda^2 - 0,0282923} [157] \quad (3.4)$$

– Pour l'Al : le coefficient d'absorption :

$$\alpha = 1,3198e^{+6} cm^{-1} [158] \quad (3.5)$$

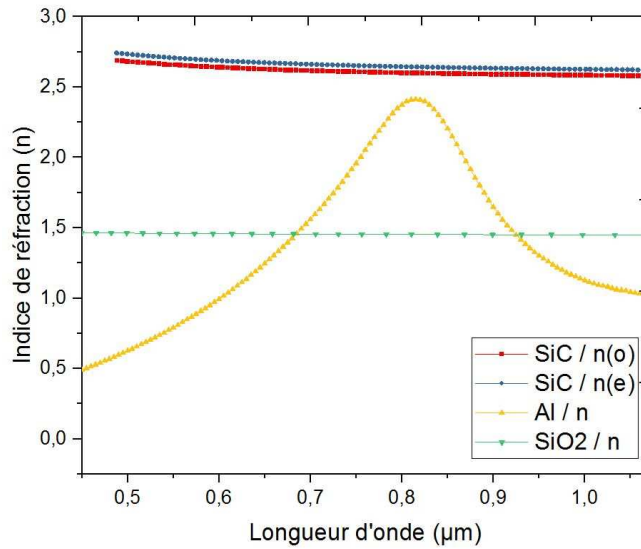


FIGURE 3.18: Indice de réfraction des matériaux constituant le MOSFET sous test [159] [157] [158]

Ceci explique la figure 3.12 où les zones de PE varient selon la polarisation électrique puisque cette dernière a un impact sur la quantité de photons émis. Donc nous constatons que l'analyse en PE de ce transistor à des hautes tensions d'alimentation (figure 3.19

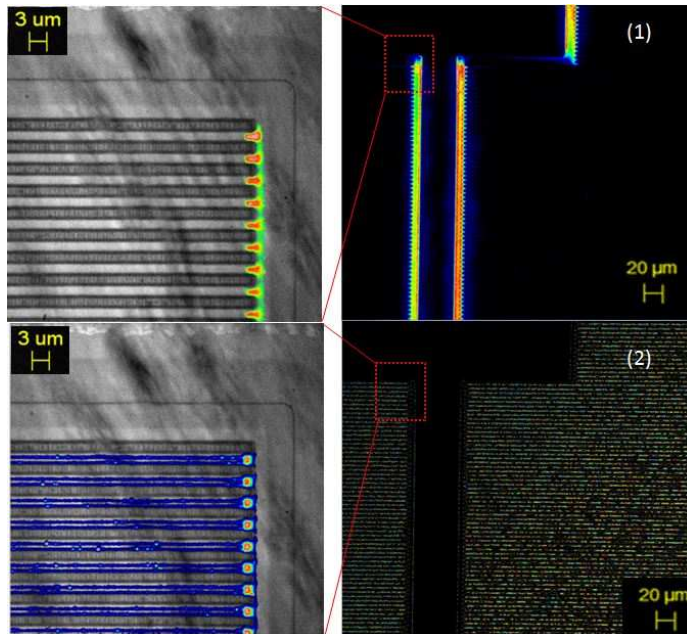


FIGURE 3.19: Électroluminescence et propagation de la lumière : (1) pour $V_{ds}=8V$; $I_{ds}=15,601$ mA; $V_{gs}=2,60V$. (2) pour $V_{ds}=10V$; $I_{ds}=22,167$ mA; $V_{gs}=2,60V$.

image 2), nous permet de caractériser l'état de la jonction PN tout au long des doigts du transistor.

3.6 Étude de la robustesse des MOSFETs SiC aux décharges électrostatiques

Les fabricants de composants de puissance ont mis au point plusieurs types de test accéléré au cours de cette décennie. Ces tests sont considérés comme une ligne de base pour la qualification du produit afin de vérifier sa fonctionnalité sur sa durée de vie totale [160]. Afin de normaliser ces tests, les industriels se réfèrent à des normes comme la JEDEC (JESD22-A108C, JESD22-A114C.01) [JED05], le MIL-HDBK (MIL-STD-750 E, MIL-STD-883-F) [MIL06], et l'AEC (AEC-Q100, AEC-Q101) [AEC05]. Il existe deux catégories de tests de vieillissement : il y a les tests à haute température et les tests environnementaux. Nous nous intéressons en premier lieu à étudier la robustesse des transistors MOSFETs à l'aide de tests environnementaux, à savoir les décharges électrostatiques (ESD). Les ESD résultent d'un transfert rapide et à forte intensité de charges entre deux objets ayant des potentiels électrostatiques différents [161]. En micro-électronique, le phénomène de décharge peut se produire à l'approche d'un objet chargé ou avec un contact d'un utilisateur lors de son intervention sur un composant. Pour comprendre au mieux ce phénomène de décharge, trois modèles ont été conçus afin de

représenter l'ESD selon la nature de l'interaction entre l'objet chargé et le dispositif semi-conducteur :

- Modèle HBM "Human Body Model" [162] : lors d'un contact avec un corps humain chargé.
- Modèle MM "Machine Model" [163] : lors d'un contact avec une machine métallique chargée.
- Modèle CDM "Charged Device Model" [164] : lors de la mise à la masse d'un circuit préalablement chargé.

Les ESD peuvent provoquer des perturbations transitoires non destructives, ou un changement des caractéristiques électriques, une dégradation ou une destruction du composant [165]. Dans les MOSFET, il existe trois mécanismes de défaillance induits par l'ESD : la défaillance de la jonction PN, la dégradation de l'oxyde de grille et la détérioration de la métallisation [166], [167], [168]. En effet, le mécanisme de défaillance est lié à la nature de la décharge appliquée. Les décharges de type énergétique (HBM, MM) impliquent des défaillances causées par les effets thermiques menant à la fusion du semi-conducteur ou des lignes de métallisation [169]. Alors que pour les décharges électrostatiques CDM, les défaillances sont principalement attribuées au claquage d'oxyde des transistors [169]. Afin de surmonter les menaces de l'ESD sur leurs circuits, les industriels procèdent à des tests qui permettent d'évaluer la robustesse de leur produit durant toutes les phases de son cycle de vie. Ainsi ils peuvent détecter et détourner les décharges qui risquent de survenir par des circuits de protection [170]. Selon la nature de la source produisant l'ESD, plusieurs méthodes de test ont été développées et normalisées [171]. Il existe des tests pour chaque modèle de décharge vu précédemment. Ces tests sont employés suivant des normes et spécifications de mesure précis (ou normes) [172]. Ces normes, répertoriées dans le tableau 3.1, indiquent les divers niveaux de tension et de courant qui définissent la décharge ESD fixée ainsi que la méthodologie à utiliser pour injecter les ESD dans le circuit [173].

Les appareils électroniques peuvent se charger de l'électricité statique accumulée par les personnes qui les touchent. Par conséquent, ils peuvent produire une décharge ESD aux autres appareils auxquels ils sont connectés. Pour simuler ce phénomène, la commission électrotechnique internationale (CEI, ou IEC en anglais "International Electrotechnical Commission") a établi un autre modèle du corps humain, IEC 61000-4-2 (autrefois IEC 1000-4-2) [174]. Cette norme définit la méthodologie de test pour injecter l'ESD dans le système ainsi que les divers niveaux de tension et de courant qui définissent l'événement ESD injecté [173]. Le tableau 3.2 récapitule les quatre niveaux de conformité définis par cette norme pour les deux types de décharges : en contact ou dans l'air.

	HBM	MM	CDM
ESDA(ANSI) (ESD Association)	STM5.1-2001	STM5.2-1999	STM5.3.1-1999 STM5.3.2-2004
JEDEC (EIA) (Electronics Industries Association)	JESD22-A114-E	JESD22-A115-A	JESD22-C101-C
IEC (International Electrotechnical Commission)	61340-3-1 60749-26 ed2	61340-3-2 60749- 27	
AEC (Automotive Electronics Council)	Q100-002 REV-D	Q100-003 REV-D	Q100-011
EIAJ (Electronics Industries Association of Japan)	ED-4701/304		ED-4701/305

TABLEAU 3.1: Récapitulatif des diverses normes ESD [173].

Niveau IEC 61000-4-2	Tension maximale Décharge en contact (kV)	Tension maximale Décharge dans l'air(kV)
1	2	2
2	4	4
3	6	8
4	8	15

TABLEAU 3.2: Niveau de conformité pour la norme IEC 61000-4-2 [173].

3.6.1 Description du test

Afin d'étudier la robustesse des MOSFETs SiC aux décharges électrostatiques, nous avons appliqué un stress ESD selon la norme IEC 61000-4-2 décrite précédemment. L'intérêt est porté au niveau 3 et 4 correspondant respectivement à une tension de 6 kV et de 8kV (tableau 3.2). Un pistolet ESD dont le schéma est représenté sur la figure 3.20 a été utilisé pour ces stress. Ce type de pistolet permet d'effectuer des décharges par contact. Le circuit de décharge utilisé correspond à une capacité de 150 pF et à une résistance de 330 Ω .

Quatre composants ont été stressés en appliquant une forte tension sur la grille à travers le pistolet ESD. Les contacts de drain et de source étant dans l'air, il n'y a pas de garantie à 0V lors du tir ESD. Il peut y avoir une remontée de potentiel importante qui élève l'ensemble du composant à plusieurs kilo volts. Cette condition reflète une condition opérationnelle de type HBM. Deux composants sont dégradés en appliquant un tir ESD à 6kV (Premier groupe : C46 et C48), tandis que les deux autres (Deuxième groupe : C4 et C7) sont stressés en appliquant un tir ESD à 8kV.

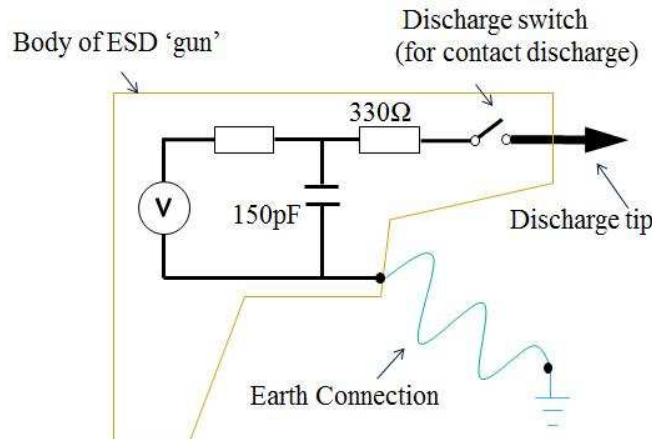


FIGURE 3.20: Circuit de base d'un pistolet ESD selon la norme " EN 61000-4-2 " (Décharge par Contact).

3.6.2 Caractérisation électrique

Afin d'évaluer l'impact de ce type de stress sur cette technologie de composants, nous nous intéressons à voir l'évolution des paramètres électriques de la puce avant et après stress. Six paramètres ont été suivis :

- **La caractéristique de sortie** : qui représente l'évolution du courant de drain source I_{ds} en fonction de la tension drain source V_{ds} . Elle est obtenue en appliquant une tension positive V_{ds} pour différentes valeurs de polarisation de grille V_{gs} . Cette courbe représente le fonctionnement d'un MOSFET en direct. Elle peut être divisée en trois régimes : le régime linéaire appelé aussi régime ohmique, le régime sous linéaire, et le régime de saturation.
- **La Caractéristique d'entrée** : qui représente la variation du courant de drain I_{ds} en fonction de la tension de commande de grille V_{gs} sous une polarisation drain source V_{ds} donnée. Pour nos mesures, nous nous plaçons à une tension $V_{ds}=6V$.
- **La tension de seuil V_{th}** : C'est la tension de grille qu'il faut fournir pour voir apparaître une circulation significative du courant entre drain et source. Elle donne une idée sur l'état de l'interface d'oxyde de grille. Il existe plusieurs méthodes d'extraction de V_{th} [175]. Pour des raisons de comparaison, notre choix s'est porté sur la méthode du constructeur qui consiste à mesurer V_{th} pour $V_{gs} = V_{ds} = V_{th}$ et $I_{ds}=1mA$.
- **La résistance à l'état passant $R_{ds(on)}$** : mesurée avec une tension $V_{ds}=10V$ et un courant $I_{ds}=1A$. Ce paramètre nous informe sur les dérives de la mobilité ou des dégradations ohmiques. Elle représente l'inverse de la pente du courant de drain à faible V_{ds} .
- **Le courant de fuite de drain I_{dss}** : Il consiste à mesurer le courant de drain lorsque le composant est à l'état bloqué. Il est mesuré pour $V_{gs}=0V$ et $V_{ds}=960V$.

		8kV		6kV	
		C04	C07	C46	C48
R_{ds (on)} (m Ω)	Neuf	407	408	237	237
	Après Stress ESD	374	373	231	220
V_{th} (V)	Neuf	3,152	3,18	2,0835	2.006
	Après Stress ESD	2,85	2,93	1,197	1,771
I_{dss} (nA)	Neuf	4,1	12	0,803	0,709
	Après Stress ESD	2	3300	21200	6,21

TABLEAU 3.3: Évolution des caractéristiques électriques des composants SiC suite au stress ESD

L'ensemble des composants a été caractérisé à l'état neuf et après stress. Le tableau 3.3 regroupe les résultats des caractéristiques électriques relevés. Suite au stress ESD, on observe une augmentation significative du courant de fuite de drain. Ceci confirme une dégradation des véhicules de test et traduit le fort impact de ce stress sur cette technologie de composants.

A partir des caractéristiques de sortie (figures 3.21 et 3.22), on observe une augmentation du courant de saturation $I_{d,sat}$. Cette évolution du courant de saturation va dans le sens inverse de la variation de la résistance à l'état passant qui décroît après le stress (tableau 3.3). Cette dérive de la résistance à l'état passant est liée à la dérive de la tension de seuil qui montre une décroissance suite au stress ESD comme illustré dans les deux figures 3.23 et 3.24. En effet, l'évolution de la tension de seuil est similaire à celle de la résistance à l'état passant pour tous les composants. Ceci traduit la relation théorique qui existe entre la tension de seuil et la résistance à l'état passant pour un V_{ds} et V_{gs} fixe tel que $V_{ds} \ll V_{gs} - V_{th}$ [176] :

$$R_{ds(on)} = f\left(\frac{1}{V_{gs} - V_{th}}\right) \quad (3.6)$$

Cette relation est déduite de la définition de $R_{ds(on)}$ et de I_{ds} . En effet, $R_{ds(on)}$ est égale à l'inverse de $\frac{\partial I_d}{\partial V_{ds}}$:

$$R_{ds(on)} = \frac{1}{\frac{\partial I_d}{\partial V_{ds}}} \quad (3.7)$$

Alors que le courant de drain I_d vaut pour un transistor MOSFET [3] :

$$I_d = \frac{W}{L} \mu C_{ox} (V_{gs} - V_{th} - \frac{1}{2} V_{ds}) \cdot V_{ds} \quad (3.8)$$

Avec μ la mobilité en $cm^2/V.s$, C_{ox} la capacité de l'oxyde de grille par unité de surface ($F.cm^2$), W et L sont la largeur et la longueur de la grille (cm), V_{ds} la tension drain-source, I_d le courant de drain et V_{gs} la tension grille-source. Donc la transconductance s'écrit comme suit :

$$\frac{1}{R_{ds(on)}} = \frac{\partial I_d}{\partial V_{ds}} = \frac{W}{L} \mu C_{ox} (V_{gs} - V_{th} - V_{ds}) \quad (3.9)$$

A partir de cette relation, on déduit que pour un V_{ds} et V_{gs} donné, la résistance à l'état passant est proportionnelle à la tension de seuil. Ce qui explique l'évolution similaire de ses paramètres sur nos caractéristiques électriques.

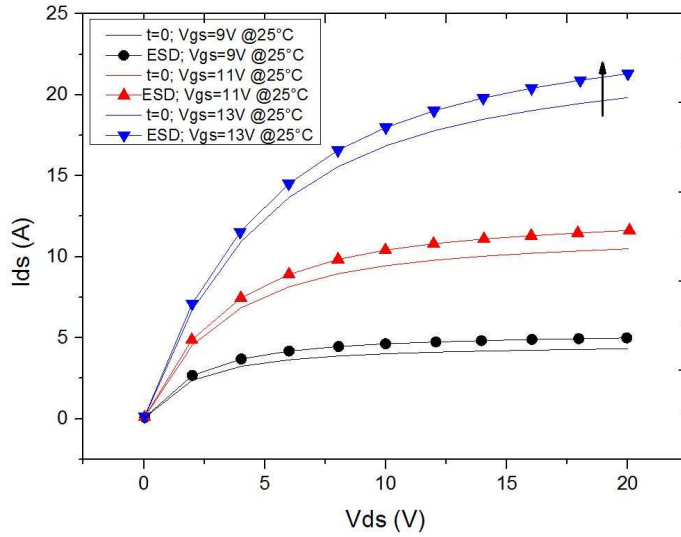


FIGURE 3.21: Évolution du réseau de sortie du transistor C07 suite au stress ESD

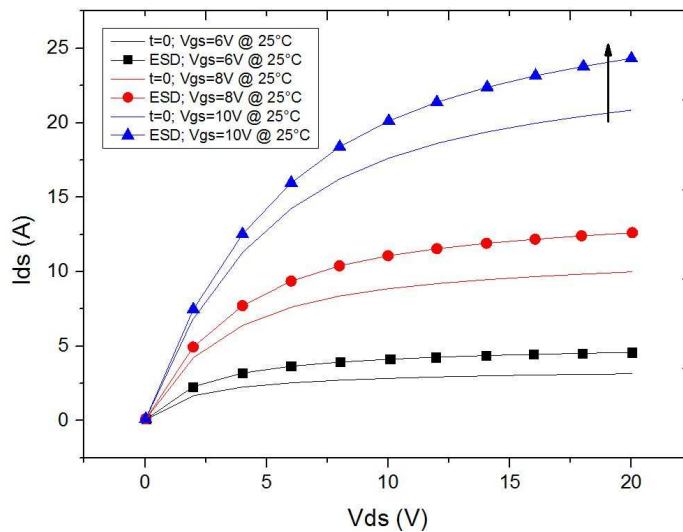


FIGURE 3.22: Évolution du réseau de sortie du transistor C46 suite au stress ESD

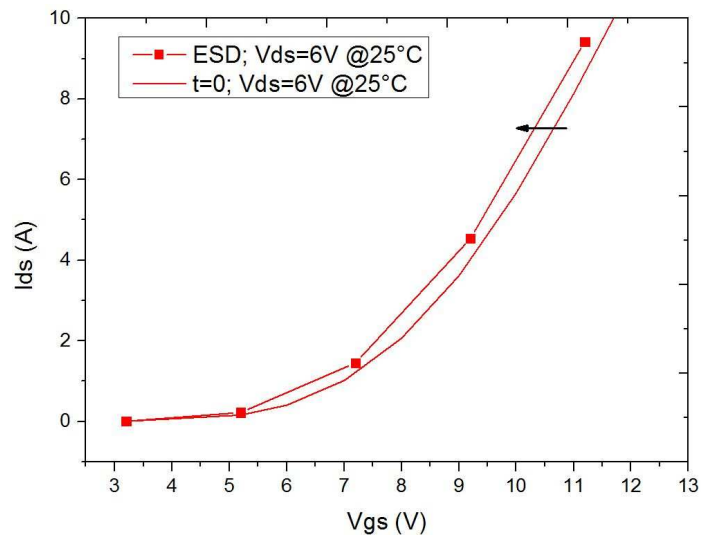


FIGURE 3.23: Évolution de la caractéristique d'entrée du transistor C07 suite au stress ESD

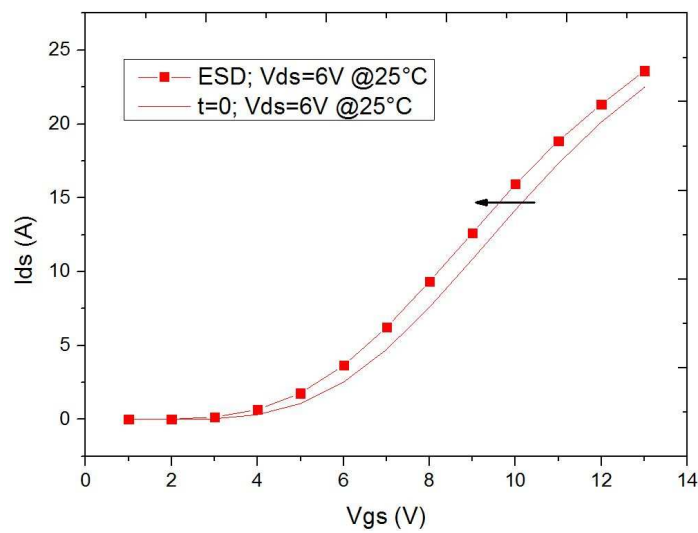


FIGURE 3.24: Évolution de la caractéristique d'entrée du transistor C07 suite au stress ESD

Pour remonter aux mécanismes de dégradation de ces composants, nous procédons à une étude en PEM conventionnelle et en PEM spectrale.

3.6.3 Analyses en microscopie à émission de photons

Une étude comparative en électroluminescence (EL) effectuée sur un composant vieilli et le composant neuf de référence [155], nous confirme une diminution de l'intensité de luminescence due à la dégradation du composant suite au stress ESD (figure 3.25).

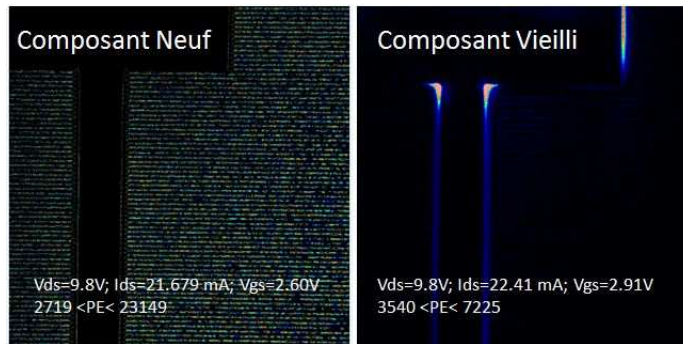


FIGURE 3.25: Comparaison de la signature en PE d'un composant stressé versus le composant de référence

Afin de voir l'influence du mode de fonctionnement du transistor sur la signature en électroluminescence et comparer les caractéristiques électriques avec l'intensité de l'émission de photons, les deux protocoles de mesure appliqués sur le composant de référence sont menés sur le composant vieilli, pour $V_{gs} = 2,91$ V (premier protocole) et $V_{ds} = 8,5$ V (deuxième protocole). D'après la figure 3.26 nous constatons une dérive similaire au composant de référence. En effet, nous notons que le dispositif stressé possède une variation linéaire de l'EL avec la tension grille-source. Cette variation traduit une dépendance linéaire du phénomène à la densité de courant.

3.6.4 Analyses en microscopie à émission de photons spectrale

Par la suite, nous nous sommes intéressés à l'évolution de la signature spectrale des composants après stress. Les composants ne pouvant pas être analysés par PEM avant vieillissement (nécessité d'ouvrir le boîtier), il est nécessaire d'obtenir un état initial avec un composant vierge de référence. Pour étudier le composant C07, nous avons traité les deux points marqués sur les figures 3.11, 3.26 en photoémission spectrale pour faire la comparaison des deux spectres à l'état "neuf" et à l'état "dégradé" (figure 3.27).

A partir de la figure 3.27, nous remarquons un décalage de spectre vers les longueurs d'onde croissantes, en plus d'une diminution de l'intensité de la photoémission entre les composants neuf et vieilli. Par contre, la comparaison en photoémission spectrale d'un composant neuf C06 et du composant vieilli C46 montre un spectre qui ne présente aucun décalage spectral comme illustré sur la figure 3.28.

Comme mentionné auparavant, un stress ESD peut induire sur un MOSFET trois mécanismes de défaillance différents : la défaillance de la jonction PN, la dégradation de l'oxyde de grille ou la détérioration de la métallisation [166], [167], [168]. Nous avons vu que l'émission de lumière dans ce MOSFET se fait sur la surface de la jonction p-n lorsque cette dernière est polarisée en direct. Suite au stress ESD, nous pensons que

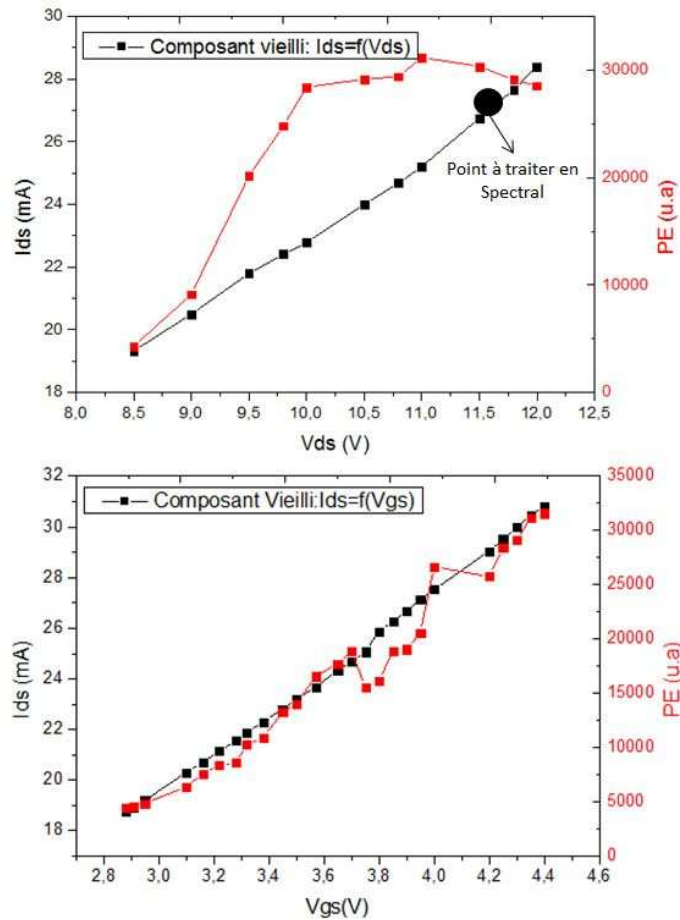


FIGURE 3.26: Composant Vieilli : A gauche : Caractéristique de sortie $I_{ds} = f(V_{ds})$ pour $V_{gs}=2,91V$ versus PE, à droite : Caractéristique d'entrée $I_{ds} = f(V_{gs})$ pour $V_{ds}=8,5V$ vs PE

pour le composant C07, il y a eu une dégradation de jonction PN qui a généré une augmentation de courant de fuite, et a causé un décalage spectral entre le composant neuf et vieilli. En revanche, cette fois le stress ESD appliqué sur le composant C46 a induit plutôt une dégradation de l'oxyde de grille. Pour appuyer ces hypothèses, nous nous sommes intéressés à évaluer l'état de la jonction PN de ces composants avec des techniques complémentaires.

3.6.5 Analyses physique

Il existe plusieurs techniques permettant de quantifier l'évolution de la concentration de dopant de la jonction PN. Cette information nous permettra d'évaluer l'état de la jonction PN afin de voir l'impact du stress ESD sur cette dernière. Parmi les techniques que l'on peut utiliser, il y a le Nano-SIMS (pour "Secondary Ion Mass Spectrometry"), la sonde atomique ou encore les mesures C-V.

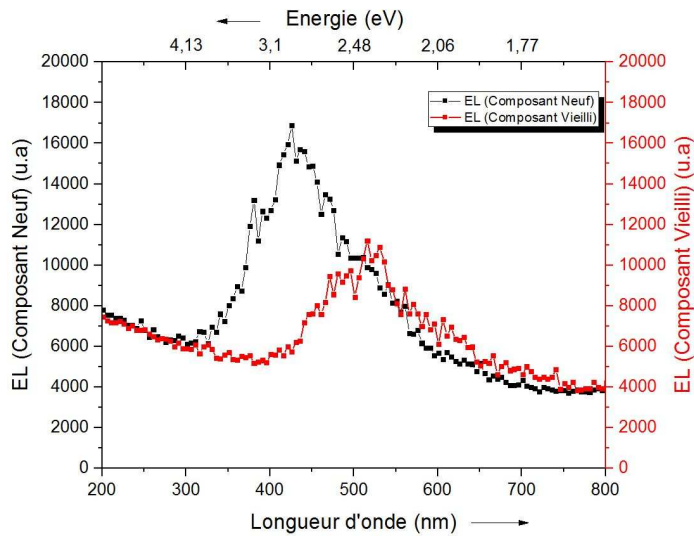


FIGURE 3.27: Comparaison du spectre du composant neuf et du composant vieilli en ESD à 8kV : C06 : Neuf : $V_{ds}=8,8V$; $I_{ds}=18,76$ mA ; $V_{gs}=2,67V$. C07 : Vieilli $V_{ds}=11,8$ V ; $V_{gs}=2,19$ V ; $I_{ds}=27,651$ mA [155]

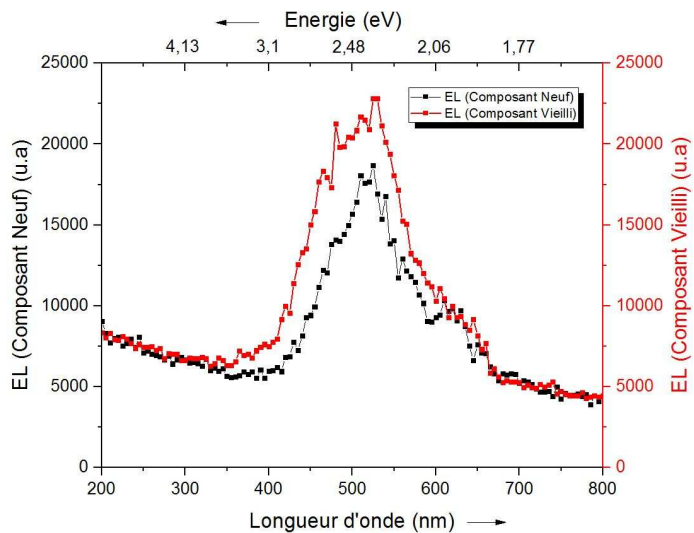


FIGURE 3.28: Comparaison entre le spectre du composant neuf (C06) et celui du composant vieilli en ESD à 6kV (C46)

3.6.5.1 Nano-SIMS

L'analyse par SIMS (pour "Secondary Ion Mass Spectrometry"), permet de quantifier la composition atomique d'un échantillon de matériau solide présentant une surface plane [2]. A travers cette technique, nous pouvons tracer des profils de concentrations d'élément en fonction de la profondeur de l'échantillon. Le principe de base de cette technique est illustré sur la figure 3.29. Il repose sur un balayage de la surface de l'échantillon par un faisceau d'ions primaires (Cs^+ ou O_2^+) ayant une énergie de quelques keV. Sous l'effet des ions primaires, des espèces secondaires sont émises, parmi lesquelles une partie est

ionisée, accélérée par une tension d'extraction, filtrée par un champ électrostatique et un champ magnétique, puis captée par le spectromètre de masse [177]. Ce dernier identifie l'élément et la concentration des ions secondaires et leur profondeur sous la surface du matériau de l'échantillon. Les profondeurs atteintes peuvent aller de quelques nanomètres à plusieurs dizaines de microns [2]. cette technique est caractérisée par sa forte capacité de détection et sa haute sensibilité. Elle permet de détecter des concentrations proches de $10^{13} \text{ at.cm}^{-3}$.

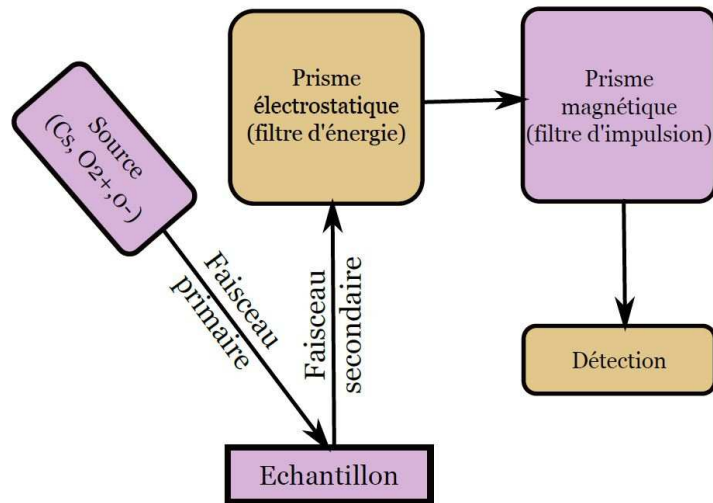


FIGURE 3.29: Principe d'un spectromètre de masse d'ions secondaires [177]

Dans l'objectif d'examiner l'état de la jonction PN d'un composant neuf de référence, l'analyse en Nano-SIMS a été réalisée avec un faisceau d'ions primaires en Cs^+ . Nous notons que cette technique est destructive, d'où l'intérêt de l'appliquer en premier sur un composant neuf. La première analyse menée avait pour but d'identifier la nature des dopants utilisés sur cette technologie. Les quatre principaux dopants du carbure du silicium sont : le bore (B), l'aluminium (Al) pour le dopage type p, et l'azote (N), le phosphore (P) pour le dopage type n. Vu la rugosité de l'état de surface, nous avons pu identifier les dopants utilisés mais nous étions incapables de localiser avec précision les éléments identifiés. En effet, à partir de la figure 3.30 nous constatons la présence du phosphore, de l'aluminium, de l'azote, et l'absence du bore. Donc on peut affirmer avec certitude que le caisson P est dopé en Aluminium (Al). Par contre, le caisson N+ peut être dopé soit en azote ou en phosphore. Connaissant la structure du composant (figure 3.1), une manière de distinguer entre les deux composés est de trouver la concentration du dopant. Cependant vu la petite taille des caissons (environ $5 \mu m$) nous étions dans la limite de l'appareil et de la résolution du faisceau, et nous n'avons pas pu faire un profil en profondeur pour quantifier le dopage des caissons. Ainsi nous constatons que cette technique n'est pas adaptée à notre composant. C'est pour cette raison que l'on

s'est intéressé à une autre technique pour identifier le dopant du caisson N et évaluer l'état de la jonction PN. Il s'agit de la sonde atomique.

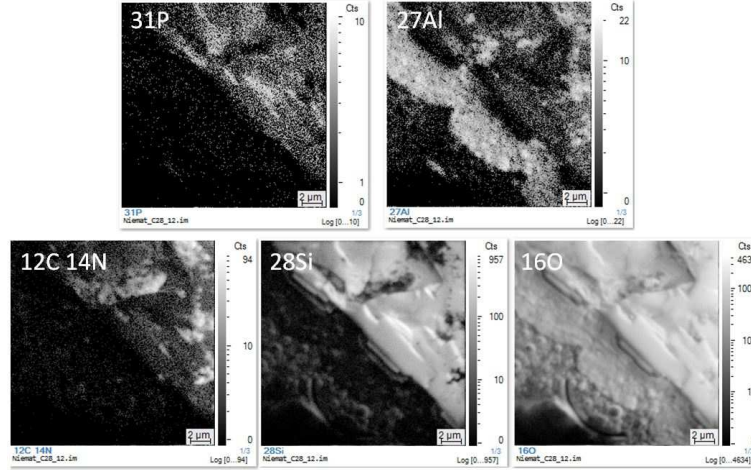


FIGURE 3.30: Cartographie SIMS d'une cellule d'un transistor neuf : (31P) : Révélation de la présence du phosphore. (27Al) : Présence de l'aluminium en source et sur le caisson P. (12C14N) et (28Si) : Révélation du type du substrat (SiC)

3.6.5.2 Sonde atomique

La sonde atomique tomographique est une technique d'imagerie tridimensionnelle d'analyse à une échelle atomique. Elle permet l'obtention d'une cartographie 3D (avec une résolution spatiale de quelques Angströms) de la répartition des espèces chimiques dans le volume analysé (50 nm x 50 nm x 200 nm). A partir de cette cartographie, il est possible de faire la correspondance entre les caractéristiques topologiques ou les hétérogénéités chimiques, et les mécanismes de croissance ou les propriétés physiques (optiques, électroniques, ...) d'un composant. Le principe de base de cette technique repose sur un phénomène physique appelé évaporation par effet de champ. Ce dernier consiste à évaporer les atomes ionisés à travers un champ électrique engendré par l'application d'un potentiel positif sur l'échantillon, taillé sous la forme d'une pointe de faible rayon R (10-100 nm) (figure 3.31). L'évaporation atome par atome de l'échantillon permet d'explorer le matériau en profondeur [178]. La nature chimique des ions évaporés est identifiée par spectrométrie de masse à temps de vol. En effet en mesurant le temps de vol (t_{vol}) mis par un ion évaporé de la pointe pour atteindre le détecteur, nous obtenons le rapport masse sur charge de la particule considérée. La détermination du rapport masse sur charge est calculée à partir de ce temps de vol et les autres paramètres expérimentaux comme la position du détecteur (L) et le potentiel appliqué (V_{dc}) (voir Équation 3.10 [179]).

$$\frac{M}{n} = 2eV_{dc} \frac{t_{vol}^2}{L^2} \quad (3.10)$$

Avec e la charge élémentaire, M la masse de l'ion et n sa charge.

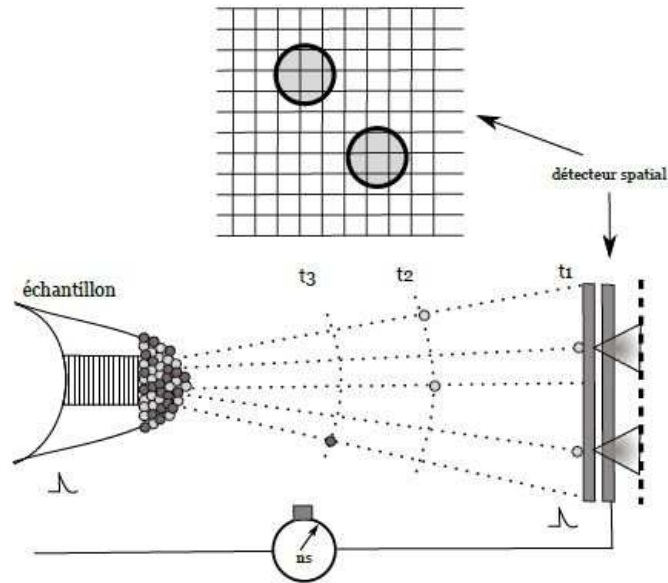


FIGURE 3.31: Principe de la sonde atomique tomographique. Les atomes évaporés depuis la surface de l'échantillon sont identifiés par spectrométrie de masse à temps de vol. Leurs positions sont calculées (projection quasi stéréographique) à partir des coordonnées des impacts sur le détecteur spatial. L'aire grisée de l'échantillon représente le volume analysé.[178]

Ainsi, en mesurant le temps de vol entre l'émission de l'impulsion pilotant l'évaporation et l'impact de l'ion sur le détecteur et en connaissant la longueur de vol et le potentiel, on obtient, pour chaque ion évaporé, son rapport de masse sur charge. Avec cette valeur, on peut ainsi tracer un spectre de masse qui va nous permettre de connaître la composition chimique du matériau analysé [179].

Ainsi on taille au MEB, l'échantillon sous la forme d'une pointe de rayon $R = 100$ nm (figure 3.32). La pointe est mise ensuite dans une enceinte ultravide et soumise à un potentiel positif de plusieurs kilo-volts. Après 24h d'analyse, 19 millions d'atomes sont arrachés de la surface. Pour chaque ion évaporé, on obtient son rapport de masse sur charge et on trace le spectre de masse qui va nous permettre de connaître la composition chimique du D-MOSFET analysé. On retrouve sur le spectre de masse (figure 3.33), la présence de l'aluminium (Al), du phosphore (P), du carbone (C) et du silicium (Si). Ces résultats confortent l'analyse SIMS qui a identifié les mêmes composés. La reconstruction tridimensionnelle du sommet de la pointe (figure 3.34), permet la localisation du phosphore en majorité sur le caisson N. Ceci prouve que le caisson N^+ est dopé en phosphore (P) et que le substrat est dopé en azote (N). Cette technique nous a permis d'identifier la nature des dopants dans les caissons. Pour aller plus loin dans l'analyse de l'évolution de ces caissons, nous avons utilisé des mesures C-V.

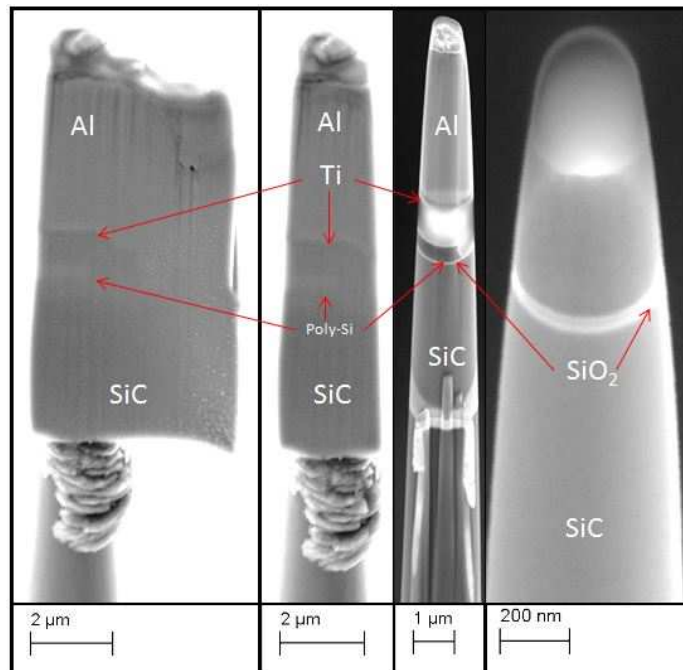


FIGURE 3.32: Préparation au FIB d'une pointe de rayon de 100 nm

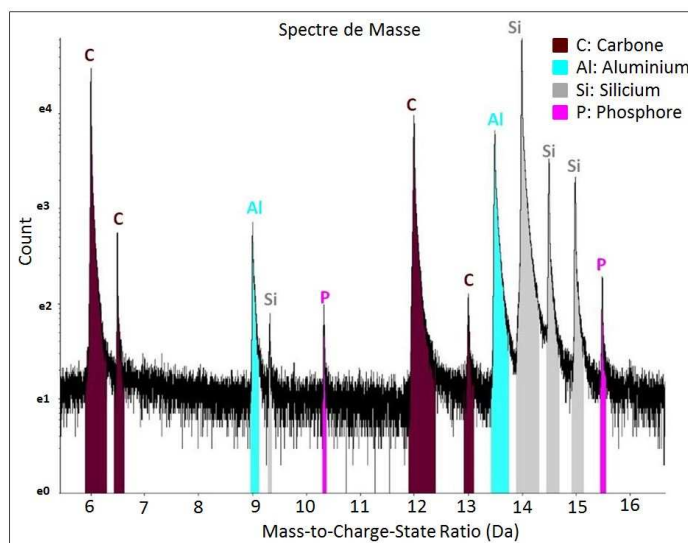


FIGURE 3.33: Spectre de masse 1 : Présence de Silicium (Si), Carbone (C), Aluminium (Al), Phosphore(P)

3.6.5.3 Mesure C-V

Des mesures de capacité en mode diode Grille-Source ont été effectuées afin de confirmer les hypothèses émises en microscopie à émission de photons spectrale. Ces mesures sont couramment utilisées dans l'étude de la fiabilité des MOSFETs vu la pertinence des informations qu'elles peuvent offrir. En effet, on peut extraire à partir des mesures C-V les paramètres intrinsèques du dispositif tels que l'épaisseur d'oxyde, la tension de

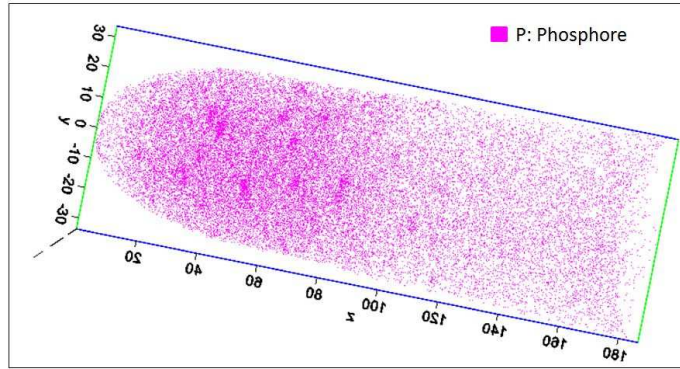


FIGURE 3.34: Reconstruction 3D du sommet de la pointe

bande plate, la tension de seuil [180], [181], [182]. Les mesures ont été effectuées dans la configuration à 3 broches (3 pin guarded), en utilisant le capacimètre HP4194a avec une fréquence de 1 MHz. Pendant les mesures C-V dynamiques, un signal AC de 50 mV d'amplitude est appliqué à la grille et superposé à une composante continue qui est balayée de -20V à 20V. Pour les composants du premier groupe qui ont subi le tir à 6kV, les mesures C-V (figure 3.35) montrent une augmentation de la capacité sous le caisson N (C_{gs3}), et un shift latéral de la courbe C-V vers la gauche. Ceci se traduit par la présence de charges positives dans l'oxyde (Augmentation de la quantité de charges d'oxyde (Q_{ot})). D'après l'équation ??, l'augmentation de Q_{ot} engendre une diminution de la tension de bande-plate V_{fb} ce qui explique selon l'équation 3.12 la réduction de la tension de seuil V_{th} [176].

$$V_{Fb} = \phi_{MS} - \frac{Q_{ox} + Q_{it} + Q_m}{C_{ox}} \quad (3.11)$$

$$V_{th} = V_{Fb} + 2\Psi_B + \frac{\sqrt{2q \cdot N_{dop} \cdot \epsilon_{SiC} \cdot (2\Psi_B)}}{C_{ox}} \quad (3.12)$$

Telle que :

- V_{Fb} : Tension de bande-plate
- ϕ_{MS} : Travail Métal-Semiconducteur
- Q_{ox} : Charge fixe dans l'oxyde
- Q_m : Charge mobile à l'interface SiC/SiO₂
- Q_{it} : Charge d'interface SiC/SiO₂
- C_{ox} : Capacité d'oxyde
- Ψ_B : potentiel du substrat
- ϵ_{SiC} : permittivité du SiC
- N_{dop} Concentration de dopants

De plus, d'après la figure 3.35, nous constatons que la pente du début d'inversion est plus petite. L'amélioration de l'inversion du caisson P est probablement associée à la présence de plus de charges négatives dans le caisson N^+ engendrant l'augmentation de C_{gs3} . Puisque l'inversion du P est améliorée alors le passage de courant est favorisé. Ce qui explique l'augmentation du courant de fuite (I_{dss}).

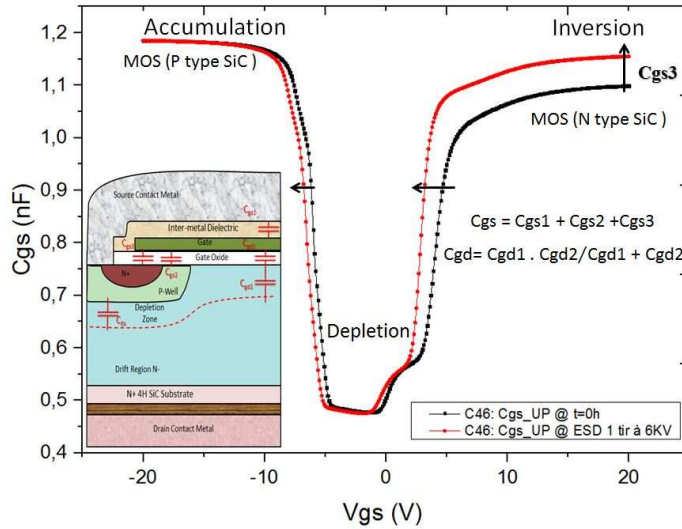


FIGURE 3.35: Caractéristique C-V à 1 MHz du C46 avant et après stress ESD

Malheureusement, les composants du deuxième groupe qui ont subi le tir à 8kV n'ont pas été caractérisés en C-V à l'état neuf. Par conséquent, nous comparons la caractéristique C-V du composant vieilli (C7) avec la caractérisation C-V de quatre composants neufs. La figure 3.36) montre une très légère dispersion des composants neufs. De plus, la mesure C-V du composant vieilli semble relativement proche de celle des composants neufs. Ainsi, nous constatons qu'a priori l'oxyde de grille n'est pas dégradé, et que les dopants électriquement actifs n'ont pas varié (N_D et N_a constants). Puisque l'analyse spectrale en PE a conclu un shift spectral vers les grandes longueurs d'onde, et étant donné que V_{th} a diminué, alors il se pourrait que la dégradation soit liée à la jonction PN [152], [166]. En effet un mouvement de dopants non actifs du caisson N vers le caisson P pourrait arriver et générer ainsi la baisse de la barrière de potentiel, et par conséquent l'augmentation de la longueur d'onde et la diminution de V_{th} . Donc on peut dire que ce stress a engendré plausiblement une dégradation de la jonction PN qui a causé la dégradation des caractéristiques électriques des composants sous test. Étant donné que les contacts de drain et de source étaient en l'air lors du tir ESD sur la grille, alors la dégradation n'a pas atteint que l'oxyde mais également la jonction PN. L'analyse par la technique EBIC a été menée par la suite pour essayer d'apporter plus d'interprétations.

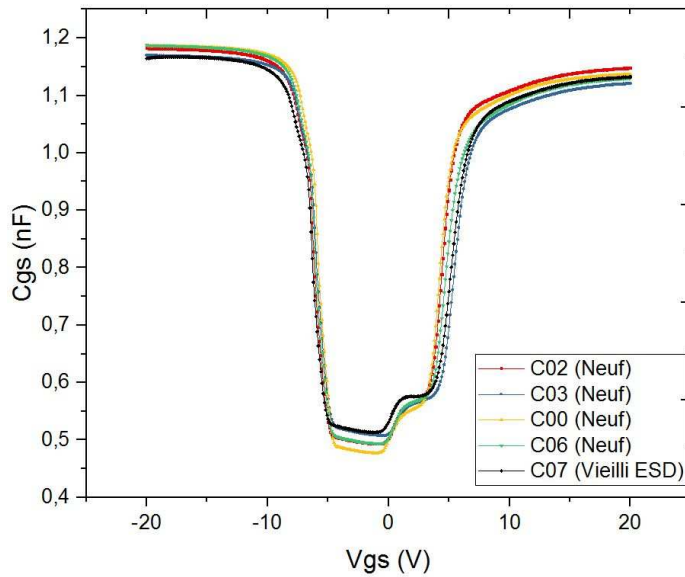


FIGURE 3.36: Comparaison de la caractéristique C-V à 1 MHz d'un composant Neuf à celle d'un composant Vieilli

3.6.5.4 EBIC

L'EBIC est une technique qui permet d'imager et de caractériser les jonctions PN. Lors de la collecte des signaux EBIC à partir d'une jonction p-n, l'analyse peut être effectuée avec le faisceau d'électrons qui frappe sur le contact avant, sur le contact arrière ou sur la coupe transversale du dispositif. Nous nous intéressons à cette technique pour évaluer l'état des jonctions PN du transistors MOSFET stressé en ESD à 8kV. A partir des techniques OBIRCH et PEM nous avons localisé un spot lumineux susceptible d'être un défaut ponctuel (figure 3.37). Une coupe transversale du MOSFET stressé est réalisée sur la position du spot. Une analyse EBIC est effectuée sur cette coupe lorsque la diode (Drain-Source) est connectée et le faisceau d'électrons est balayé avec une tension d'accélération supérieure ou égale à 2kV (figure 3.38). Le signal EBIC trace bien la zone de charge d'espace et met en évidence le phénomène de décalage de masque. L'investigation de la cellule défaillante où le spot lumineux est observé, avec ce mode de polarisation, ne montre aucun signe de dégradation de la jonction PN (figure 3.37). Généralement, il existe un mode de fonctionnement où la jonction PN (uniquement la jonction pn connectée) pourrait également être étudiée sous un potentiel inverse de 10V mais seulement s'il n'y a pas une augmentation de courant. Si le courant généré par la polarisation en inverse de la jonction est supérieur à 100nA, le gain de l'amplificateur doit être réduit afin de ne pas dépasser ce courant. Or pour révéler une dégradation de la jonction, il faudrait pouvoir aller chercher des courants supérieurs à 100 nA. Dans ces conditions, il n'est pas possible de révéler une dégradation de jonction avec la technique EBIC sur notre échantillon.

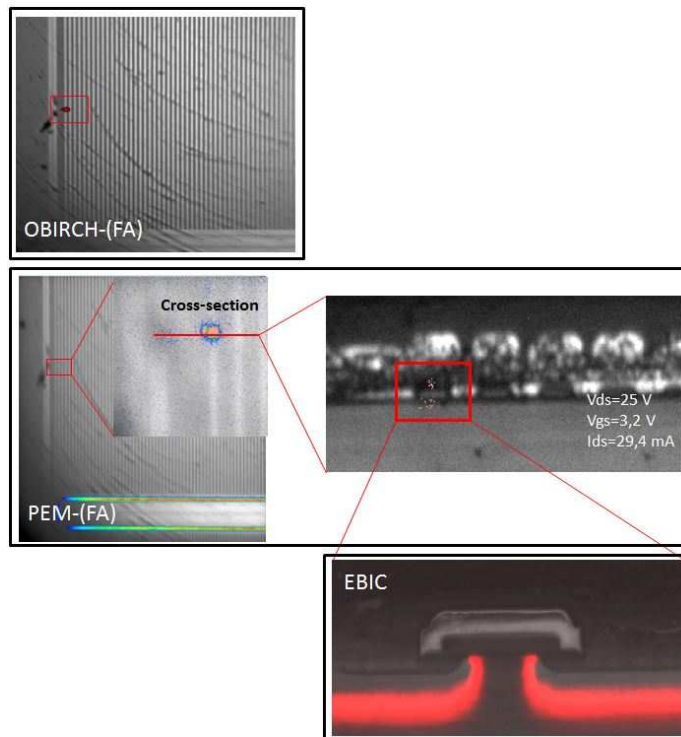


FIGURE 3.37: Localisation du défaut : (top) OBIRCH, (middle) PEM, et (bottom) Analyse EBIC

3.7 Caractérisation de l'effet de la température sur les MOSFETs SiC

L'impact d'un des tests environnementaux sur les MOSFETs SiC, à savoir le stress ESD, a été étudié dans la partie précédente. Nous nous intéressons maintenant à évaluer l'effet de la température sur ces composants à travers des tests à haute température. Les données de ces tests sont généralement utilisées pour estimer à travers des modèles statistiques et des lois d'accélération, la valeur du taux de défaillance [[150], [183]]. Il existe deux tests de vieillissement à haute température : les tests HTGB (High Temperature Gate Bias) et les tests HTRB (High Temperature Reverse Bias).

Le High Temperature Gate Bias Stress Test vérifie la stabilité de la grille et la qualité de l'oxyde en confirmant la stabilité du courant de fuite de la grille. En effet, le champ électrique appliqué dans une grille exempte de défaut entraîne un courant de fuite de grille stable dans le temps [3].

Le High Temperature Reverse Bias Test vérifie la stabilité à long terme du composant en terme de courant de fuite. Combiner les contraintes thermique et électrique dans un test permet de tester l'intégrité de la jonction de la diode, les défauts cristallins et le niveau de contamination ionique. Pendant le test HTRB, les puces sont stressées avec une tension

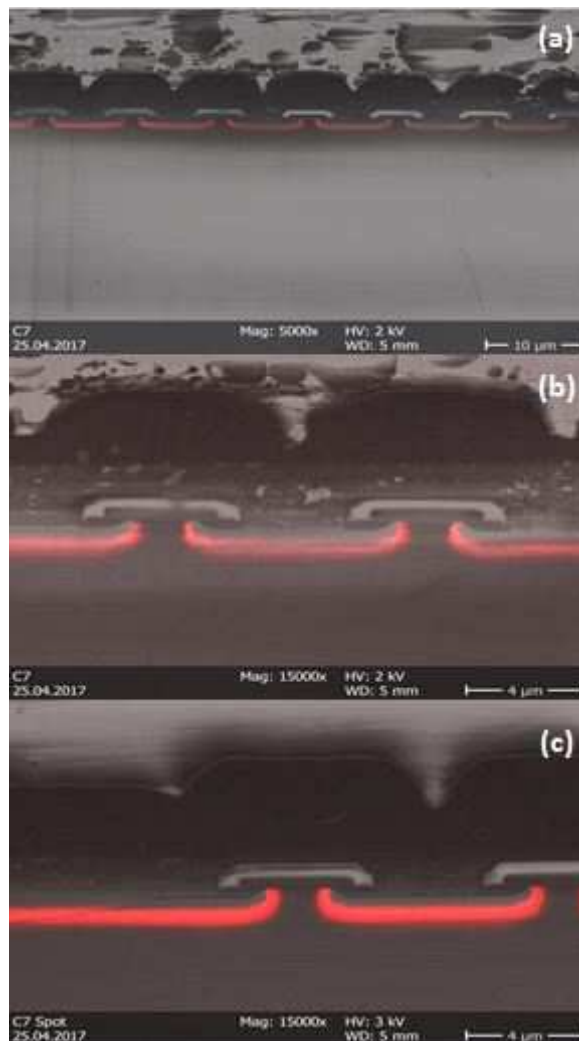


FIGURE 3.38: Analyses en EBIC de la cross section du composant stressé à des grossissements et des tensions différents

continue drain source tandis que le composant est à l'état bloqué et à une température ambiante proche de la température opérationnelle limite [160]. La mesure est effectuée sur le courant de fuite. Avec ce test aucune dégradation de substrat n'est attendue. Par contre le test est en mesure de révéler les faiblesses ou les effets de la dégradation dans la zone de charge d'espace au niveau des interfaces et de la couche passivation.

3.7.1 Etude A : Stress à paliers de température

3.7.1.1 Description du test

Parmi les essais de qualification accélérés les plus connus pour les MOSFETs de puissance, notre choix s'est porté sur un test de grille statique avec des paliers en température

HTGB		HTRB	
Protocole 11 :	Protocole 12 :	Protocole 21 :	Protocole 22 :
$V_{gs} = -5V$; $V_{ds} = 0V$	$V_{gs} = 20V$; $V_{ds} = 0V$	$V_{gs} = -5V$; $V_{ds} = 960V$	$V_{gs} = 0V$; $V_{ds} = 960V$
C11	C12	C13	C14

TABLEAU 3.4: Protocoles des tests de vieillissement & Récapitulatif du stress appliqué sur chaque MOSFET

qui combinent entre les tests HTRB (High Temperature Reverse Bias Test) et HTGS (High Temperature Gate Stress Test) [184]. Ces tests vont atteindre une température de $190^{\circ}C$. Ils ont deux objectifs. Le premier consiste à vieillir les composants le plus rapidement possible pour les étudier avec la technique de microscopie en photoémission spectrale. Le deuxième objectif de ce type de vieillissement est de connaître les variations des caractéristiques électriques des composants sous test au-delà des limitations du constructeur ($T_{max} = 150^{\circ}C$). Le test consiste à polariser la puce par une excitation électrique avec des paliers de température jusqu'à $190^{\circ}C$. Chaque palier a une durée spécifique pendant laquelle le composant sous test est soumis à un des stress électriques HTGB ou HTRB. Entre chaque palier, les composants sont refroidis à $25^{\circ}C$ afin de les caractériser, surveiller l'évolution de leurs paramètres, et détecter un éventuel indicateur de vieillissement. Lorsque le composant est placé dans une application industrielle, il va passer par différentes étapes de fonctionnement : la phase de conduction avec une tension de grille positive, la phase de commutation à l'état bloqué avec une tension de grille parfois négative ou nulle, la phase de commutation à l'état passant [3]. A partir de ces étapes, on déduit quatre protocoles de test que l'on met en place. Deux protocoles pour le test HTGB, et deux autres pour le test HTRB (Tableau 3.4).

Les MOSFETs SiC sous test ont une tension de commande qui varie entre $-5V$ pour l'état bloqué, et $20V$ pour l'état passant. Nous utilisons ces niveaux de tension pour établir notre stress de grille constant. Pour le stress HTRB, le niveau de drain appliqué est de 80% de la tension maximale ($960V$). Quatre véhicules tests ont été vieillis dans un four unique (figure 3.39). Sur chaque composant, nous appliquons un stress électrique spécifique (comme présenté dans le synopsis de la figure 3.40).

Le stress était programmé pour une durée totale de 75 jours, avec 4 jours à $140^{\circ}C$, 2 jours à $160^{\circ}C$, 5 jours à $170^{\circ}C$, 5 jours à $180^{\circ}C$, 5 jours à $190^{\circ}C$, 23 jours à $180^{\circ}C$, et 31 jours à $180^{\circ}C$. Deux composants n'ont pas survécu au stress (C13 et C14). En effet, au bout de 22 jours, C14 est endommagé (court-circuit drain source), et par conséquent, il a été retiré du four. Alors que C13 a présenté une forte dégradation des caractéristiques électriques au bout de 26 jours de vieillissement. Donc, il a été décidé d'arrêter son stress et de l'analyser par la technique de microscopie à émission de photons spectrale. Par contre, le stress était complet pour les deux composants C11 et C12 .

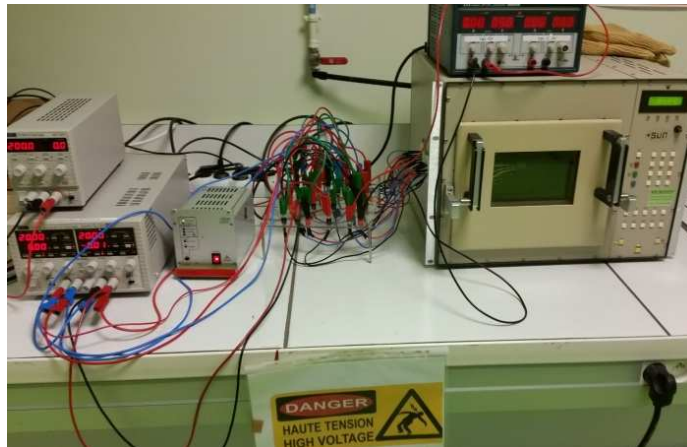


FIGURE 3.39: Banc du vieillissement

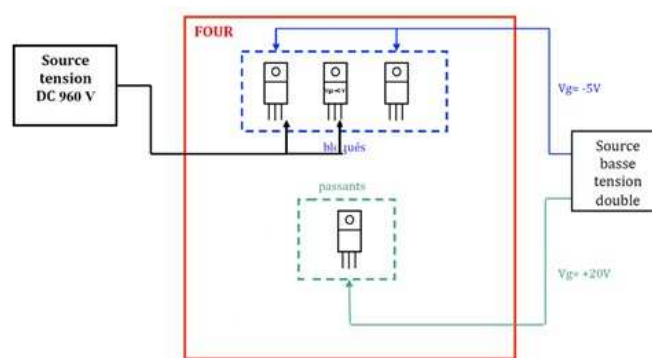


FIGURE 3.40: Synopsis du test de vieillissement de grille statique en palier de température

3.7.1.2 Caractérisation électrique

Pour le composant C13, nous visualisons suite au stress HTRB une augmentation de la résistance à l'état passant (figure 3.41), qui se traduit par une baisse du courant de saturation comme c'est montré sur les caractéristiques de sortie (figure 3.42). La dérive de $R_{ds(on)}$ doit en principe être similaire à celle de la tension de seuil. Par contre, cette dernière tend paradoxalement à diminuer pour le C13 (figure 3.41).

En effet, la tension de seuil tend à augmenter pour les MOSFETs qui ont une tension de grille positive (C12), alors qu'elle tend à diminuer pour les MOSFETs qui ont une tension de grille négative (C11, C13) (figure 3.43). La variation étant faible, elle marque moins les caractéristiques d'entrée (figure 3.44). En outre, les mesures de la résistance à l'état passant du C11 et C12 montrent une évolution non uniforme de ce paramètre, avec une tendance générale de croissance (figure 3.45). Cette variation non uniforme est observée aussi sur les caractéristiques de sortie des composants C11 et C12 (figure 3.46) avec le courant de saturation qui tend généralement à augmenter pendant le vieillissement. Ces

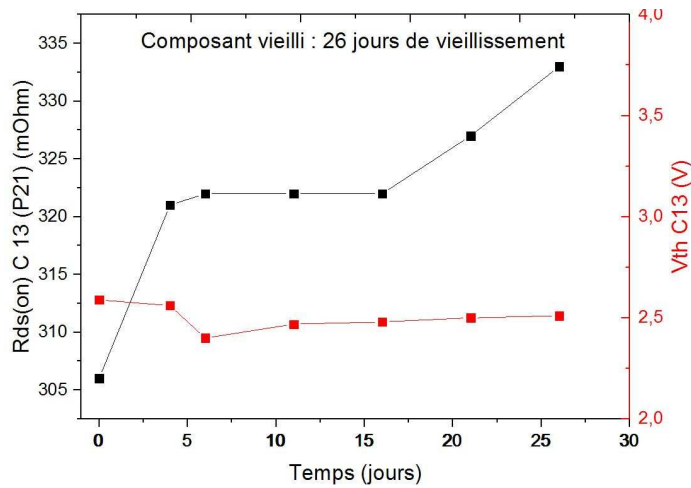


FIGURE 3.41: Évolution de $R_{ds(on)}$ et V_{th} du C13 au cours du vieillissement HTRB

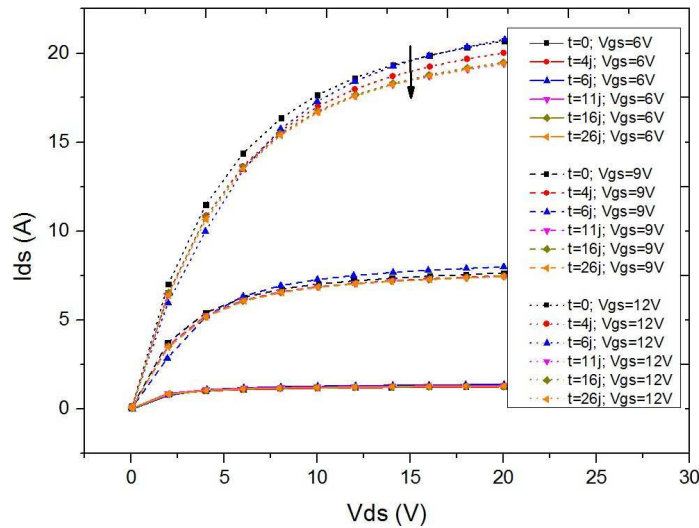


FIGURE 3.42: Évolution du réseau de sortie du transistor C13 au cours du vieillissement HTRB

résultats non uniformes ont déjà été observés dans la littérature sur des technologies SiC. [185].

Pour tous les composants, on constate selon les figures 3.47, 3.48 que le courant de fuite est devenu approximativement dix fois plus grand que sa valeur initiale au bout de 20 jours de vieillissement. Ce qui traduit une forte dégradation de ces composants.

La nature non uniforme des résultats obtenus sur ses composants rend l'interprétation difficile. Par conséquent, aucune conclusion sur les mécanismes de défaillance ne peut être tirée avant de faire d'autres analyses par des techniques non-destructives et micro-structurales. Par contre, on peut déduire que les essais HTRB et HTGB en step-stress

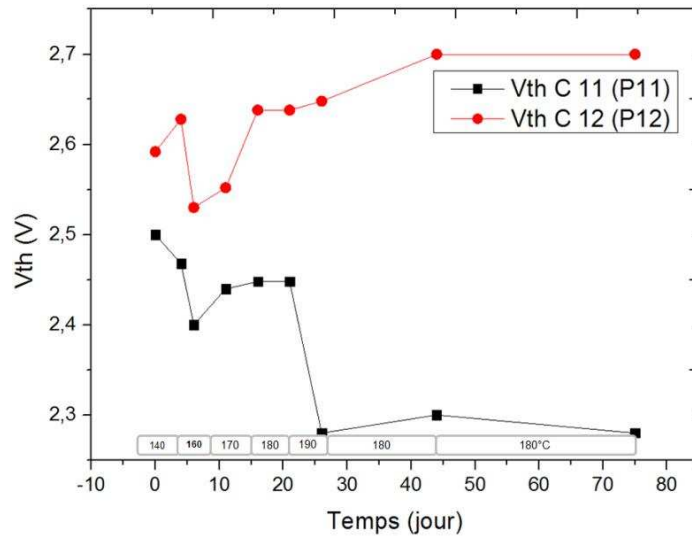


FIGURE 3.43: Évolution de la tension de pincement des transistors C11 et C12 au cours du vieillissement HTGB

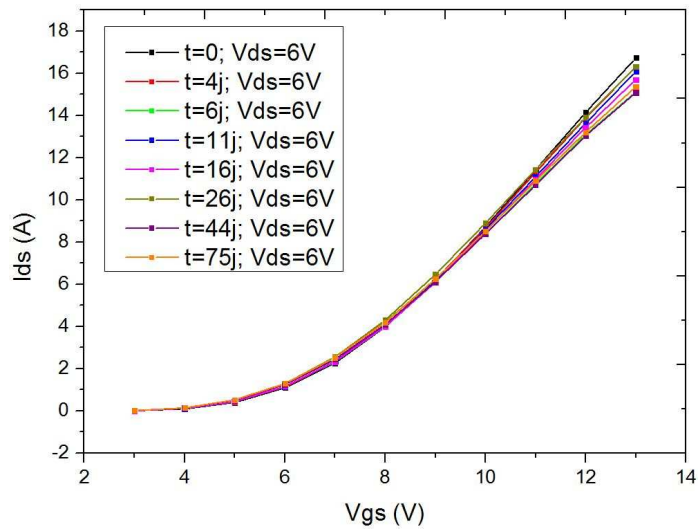


FIGURE 3.44: Évolution du réseau d'entrée du transistor C11 au cours du vieillissement HTGB

ne permettent pas d'obtenir des résultats consistants (Non uniformité et dispersion importante). A titre d'alternative, ces stress peuvent être remplacés par des essais à température constante.

3.7.1.3 Analyses en microscopie à émission de photons spectrale

L'analyse en PEM du dispositif vieilli C13 montre une baisse de l'intensité de PE par rapport au composant de référence. En effet, la figure 3.49 montre la cartographie de l'EL du composant neuf et du composant vieilli pour les mêmes tensions V_{ds} et courant

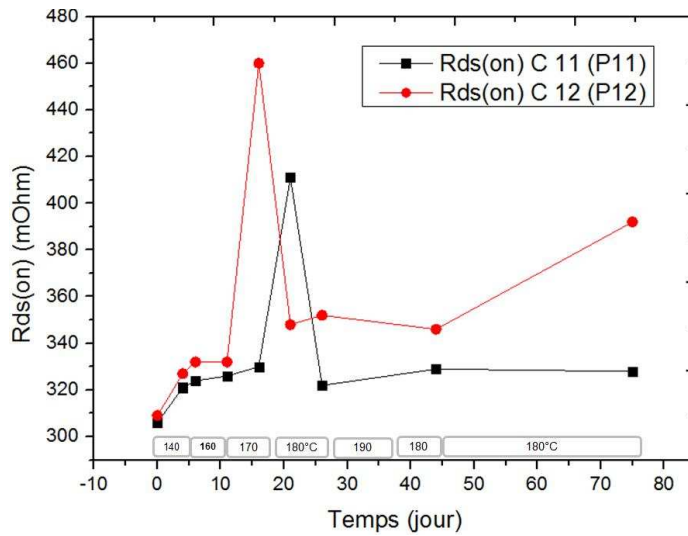


FIGURE 3.45: Évolution de la résistance à l'état passant des transistors C11 et C12 au cours du vieillissement HTGB

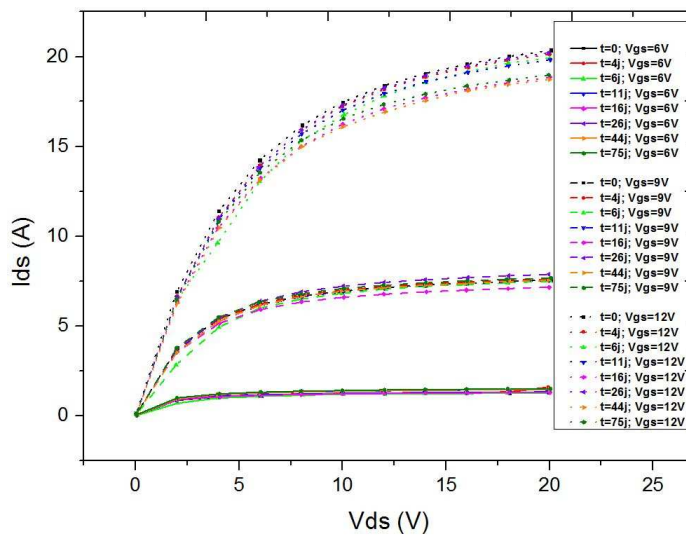


FIGURE 3.46: Évolution du réseau de sortie du transistor C11 au cours du vieillissement HTGB

I_{ds} . A partir de cette cartographie, nous constatons que seulement les zones au bord de la grille sont actives en EL sur le composant vieilli, alors que sur le composant neuf tous les doigts du transistor s'illuminent sous ces conditions de polarisation.

La comparaison entre la signature spectrale du composant vieilli avec un composant neuf de référence (figure 3.50), montre bien la diminution de l'intensité de PE pour le composant vieilli et un léger décalage en longueur d'onde vers le sens décroissant des longueurs d'onde. Étant donné que la mesure C-V n'a pas été effectuée sur le composant à l'état neuf, nous comparons alors les caractéristiques du composant vieilli avec celles des quatre composants neufs. La figure 3.51 montre qu'il n'y a, a priori, aucune dégradation

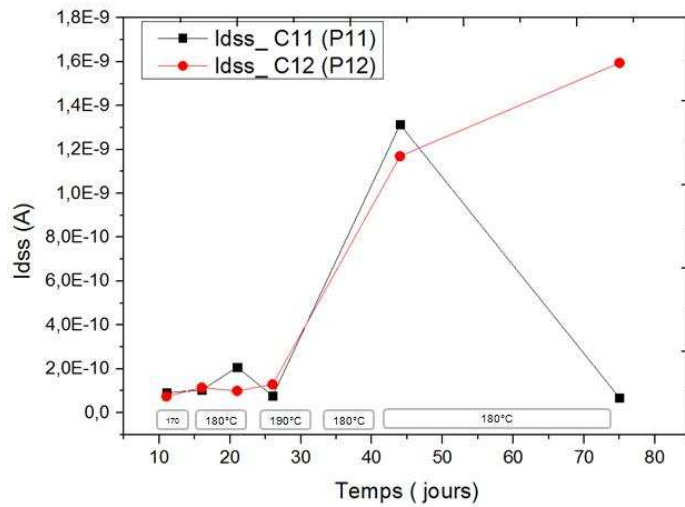


FIGURE 3.47: Évolution du courant de fuite de drain des transistors C11 et C12 au cours du vieillissement HTGB

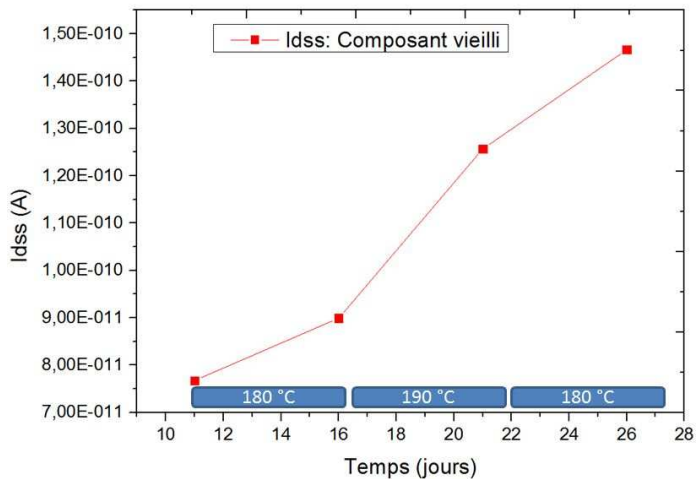


FIGURE 3.48: Évolution du courant de fuite de drain du transistor C13 au cours du vieillissement HTRB

d'oxyde (aucun shift de la courbe). Selon la littérature, l'augmentation du courant de fuite de drain I_{dss} suite à un stress HTRB peut être due à des dislocations qui montent jusqu'à la jonction PN et une ségrégation des ions d'Al le long de ces dislocations [186], [187]. En effet, suite à notre vieillissement, il est fort probable que des dislocations aient été créées dans le 4H-SiC passant par la jonction PN, ce qui permet un déplacement des ions non actifs du caisson N (les ions de Al), et crée des pièges profonds dans le caisson P induisant une diminution de la longueur d'onde et de la tension de seuil.

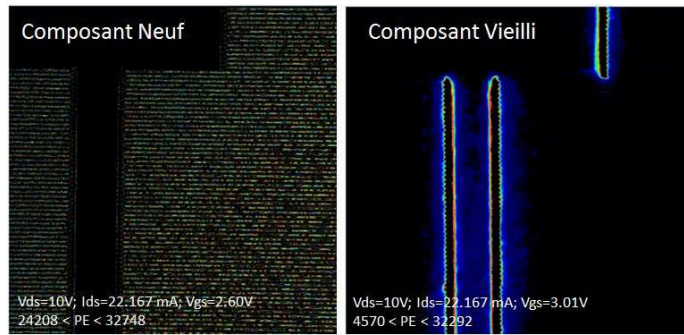


FIGURE 3.49: Comparaison de la réponse en PE du composant vieilli (C13) versus le composant de référence (C06) ($V_{ds} = 9V$; $I_{ds} = 18,961mA$)

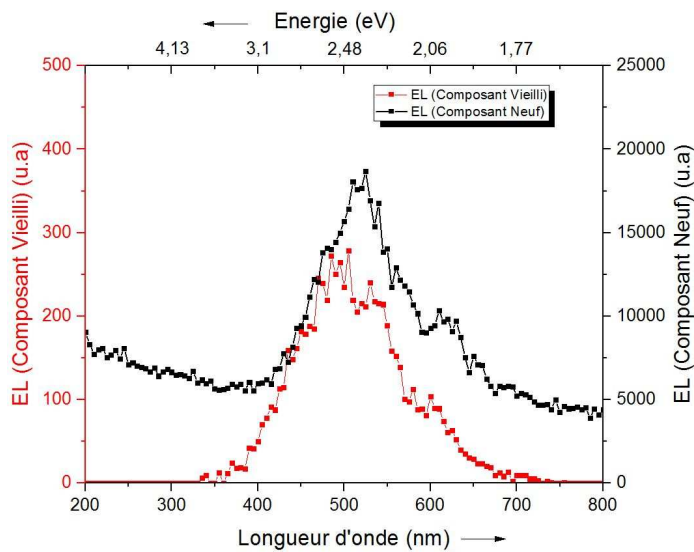


FIGURE 3.50: Comparaison entre le spectre du composant neuf et celui du composant vieilli en HTGB

3.7.2 Étude B : Stress à température constante

D'après la non-uniformité et la dispersion importante des résultats du step-stress HTRB et HTGB obtenues dans la partie précédente, il a été jugé plus intéressant de remplacer les stress à paliers de température par des essais à température constante. C'est dans cette optique que nous nous sommes intéressés à un stress HTRB à température constante qui respecte la température et la tension limite ($T_{max} = 150^{\circ}C$, $V_{dsmax} = 1200V$) indiqués par le constructeur.

3.7.2.1 Description du test

Sept composants ont été vieillis selon un stress HTRB dans un four, à une température constante de $150^{\circ}C$. Les composants sont polarisés par une tension $V_{ds} = 1100V$ tout

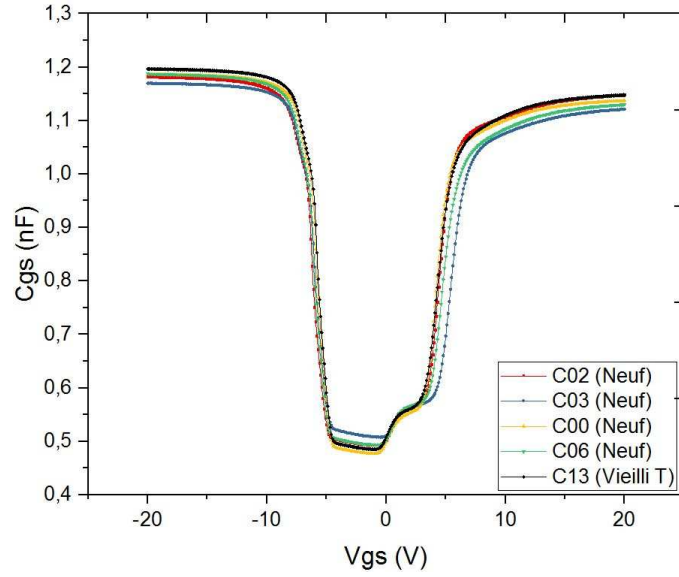


FIGURE 3.51: Comparaison des caractéristiques C-V d'un composant vieilli en HTRB (C13) avec les caractéristiques de quatre composants neufs.

	C50	C51	C52	C53	C55	C56
V_{th} (V) t=0	2,256	2,3	2,274	2,246	2,125	2,441
V_{th} (V) t=1j	2,153	2,208	2,162	2,157	2,055	2,32
$R_{ds(on)}$ mΩ t=0	262,5	262,3	262,7	260	250	278,7
$R_{ds(on)}$ mΩ t=1j	287,5	278,5	350	276	350	312,5
I_{dss} (nA) t=0	0.872	0.974	0.967	1,28	1,44	1,32
I_{dss} (pA) t=1j	52.9	51.3	99.5	75.6	129	73.4

TABLEAU 3.5: Évolution des caractéristiques électriques après le stress HTRB de 24h à 150°C et 1100V

en les gardant dans un état bloqué ($V_{gs} = 0V$). Après 24 heures de stress, l'un des sept composants (C54) est fortement endommagé. La mesure de la résistance drain-source a conduit à la présence d'un court-circuit entre le drain et la source. À la suite de la défaillance catastrophique du C54, le stress a été arrêté et des caractérisations électriques ont été effectuées sur les six autres dispositifs pour évaluer leur état après ce court stress.

3.7.2.2 Caractérisation électrique

Le tableau 3.5 récapitule les résultats du stress sur la tension de seuil, la résistance à l'état passant, et le courant de fuite.

Le premier paramètre électrique examiné est V_{th} . On constate d'après le tableau 3.5 que pour les six dispositifs stressés, la tension de seuil a légèrement diminué. Ce petit décalage de V_{th} peut également être noté sur les caractéristiques d'entrée comme indiqué dans la figure 3.52 pour le composant C50. En général nous attribuons cet effet soit à la présence

de charges fixes dans l'oxyde, soit à la présence des charges piégées sur l'interface SiC / SiO₂ appelée défauts des états d'interface [144]. La distinction entre ces deux types de défauts nécessite des techniques complémentaires telles que C-V.

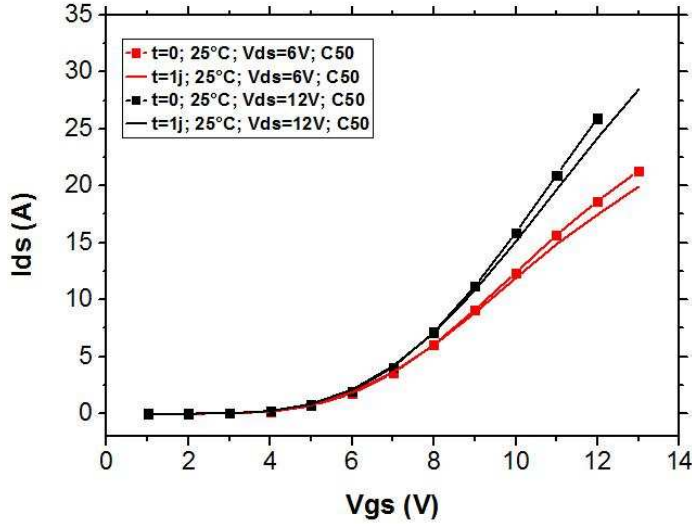


FIGURE 3.52: Caractéristique d'entrée du C50 avant et après stress ($I_{ds} = f(V_{gs})$ à 25 °C)

Les mesures C-V d'un MOSFET sont réalisées en mode diode. C_{gs} est la capacité grille-source, tandis que C_{ds} correspond à la capacité drain-source et C_{gd} est la capacité grille-drain. Lorsqu'une tension DC est appliquée sur la grille, elle provoque le passage du MOS (SiC n-type) ou du MOS (SiC p-type) du dispositif D-MOSFET par les régions d'accumulation, de déplétion (d'appauvrissement) et d'inversion (figure 3.53).

Les mesures ont été effectuées dans la configuration 3 broches, à l'aide du capacimètre HP4194a à une fréquence de 1 MHz. Pour la mesure de la capacité grille-source (C_{gs}), la tension V_{gs} est balayée de -20V à 20V. Alors que pour la mesure de la capacité drain-source (C_{ds}), V_{ds} est balayée de -2,5 V à 25 V. À partir des caractérisations C-V avant et après le stress, nous constatons une diminution de la capacité du caisson N (C_{gs3}) et de la capacité drain-source (C_{ds}) suite au stress HTRB, tandis que la capacité grille-drain (C_{gd}) est restée constante (figures 3.53 et 3.54).

La mesure C-V dans le sens haut et bas a montré une petite hystérésis de capacité avant et après le stress (figure 3.53). Cette hystérésis est utilisée pour quantifier les charges mobiles Q_m . On remarque une petite augmentation de ΔQ_m du côté du caisson N et une variation constante du côté du caisson P. Cela suggère que la dégradation est probablement localisée sur le côté du caisson N du transistor. La variation de C_{gs} traduit une variation de la quantité de charges dans l'oxyde (Q_{ot}), ou la présence des pièges dans l'interface SiC / Oxyde (Q_{it}), ou encore une augmentation de l'épaisseur d'oxyde (t_{ox}) [188]. Les états d'interface ne peuvent être mesurés qu'à basse fréquence et seulement

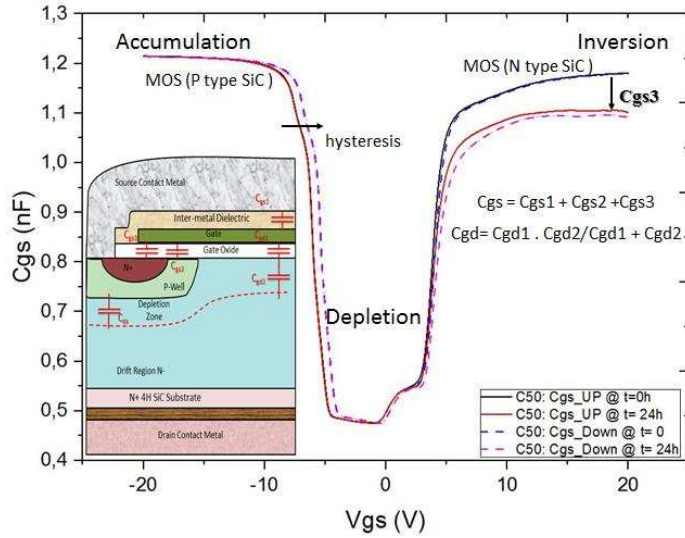


FIGURE 3.53: Caractéristique C-V du C50 avant et après stress HTRB ($C_{gs} = f(V_{gs})$ à 1MHz)

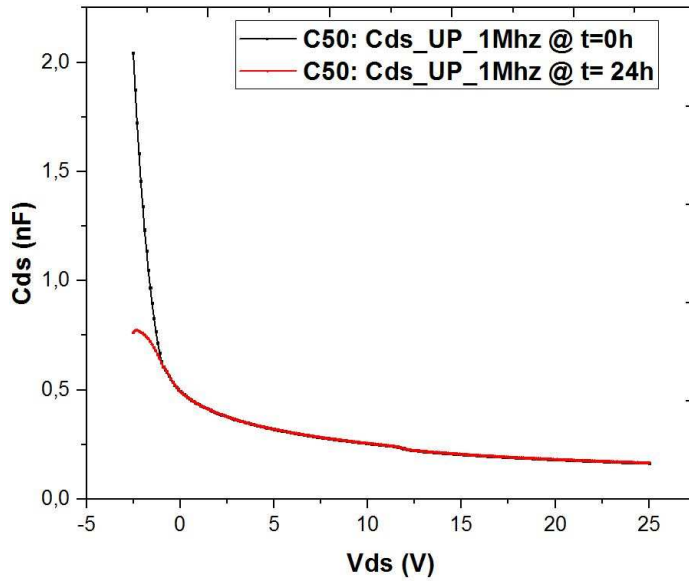


FIGURE 3.54: Caractéristique C-V du C50 avant et après stress HTRB ($C_{ds} = f(V_{ds})$ à 1MHz)

s'ils présentent une variation significative. Ainsi, à partir de nos mesures (figure 3.53) réalisées à haute fréquence (1Mhz), il est difficile de conclure à propos de la variation des états d'interface. Cependant, ces mesures affirment que la dégradation n'est pas liée à la charge de l'oxyde. Sinon, il y aurait un décalage de toute la caractéristique C-V. De plus, étant donné que le stress a entraîné une diminution de la capacité drain-source (C_{ds}) pour les tensions négatives, il est improbable que l'épaisseur de l'oxyde ait augmenté.

Un autre phénomène reflété par la dégradation de la jonction pourrait expliquer la diminution de C_{gs3} et C_{ds} . En fait, les défauts de jonction PN pourraient provoquer une

migration de charges (e^-) du caisson P vers le caisson N^+ , ce qui diminuerait la quantité de charges dans l'interface Caisson-P/ Oxyde et expliquerait la diminution de V_{th} puisque moins de charges positives sont nécessaires pour ouvrir le transistor (figure 3.55). Par conséquent, les charges d'interface qui auraient migré, réagiraient comme des pièges dans le caisson N^+ et apparaîtraient dans les mesures C_{gs} comme une capacité ($C_{defaults}$) connectée en série. Cela entraînerait la diminution de C_{gs3} et C_{ds} après le stress (figure 3.56).

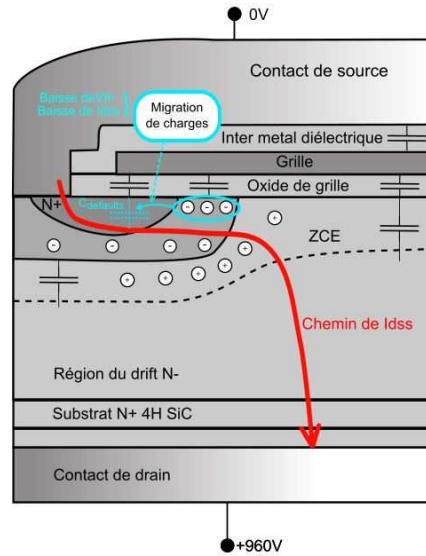


FIGURE 3.55: Modélisation de la distribution de charges après le stress pour $V_{ds}=960V$.

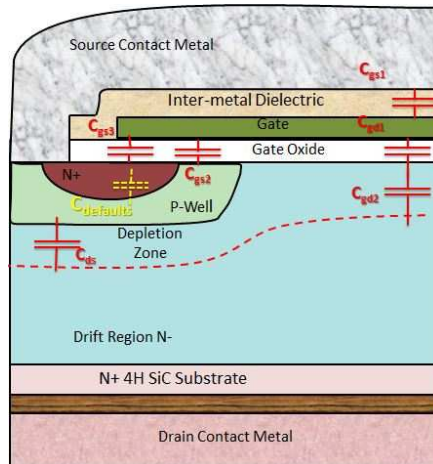


FIGURE 3.56: Schéma équivalent de la structure du D-MOSFET après stress

L'évolution d'un autre paramètre électrique a été étudiée. Il s'agit de la résistance à l'état passant calculée pour $I_{ds} = 2A$ et $V_{ds} = 10V$. Nous constatons à partir du tableau 3.5 que cette résistance a augmenté pour l'ensemble des six composants stressés. D'après l'équation 3.9, nous constatons que pour un V_{gs} et V_{ds} donné, la variation de $R_{ds(on)}$ dépend principalement de la variation de V_{th} et C_{ox} . Dans notre cas, V_{th} a légèrement

varié. Par conséquent, $R_{ds(on)}$ sera inversement liée à C_{ox} . À partir de la mesure C-V, nous avons constaté que la capacité était considérablement réduite (figure 3.53). Selon l'équation 3.9, cela entraîne une augmentation de $R_{ds(on)}$. Et comme la résistance est inversement liée au courant, nous remarquons que cette dérive de $R_{ds(on)}$ est corrélée à une diminution du courant de saturation tel qu'il est illustré sur les caractéristiques de sortie (figure 3.57). La résistance $R_{ds(on)}$ est un chemin constitué de la circulation du courant depuis la source en passant par les zones N+, P-well et N- jusqu'au drain. Ici l'augmentation de $R_{ds(on)}$ est liée à la diminution des charges négatives dans le P-well et l'augmentation de C_{ox} .

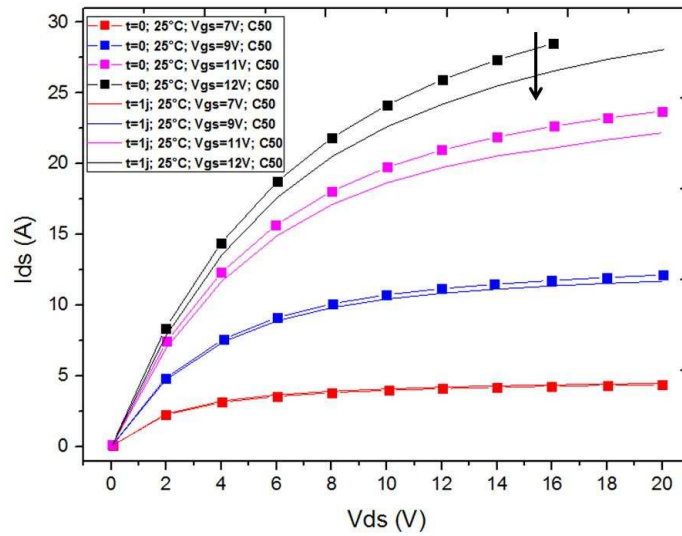


FIGURE 3.57: Caractéristiques de sortie du C50 avant et après stress ($I_{ds} = f(V_{ds})$ à $25\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Pour évaluer le composant dans l'état off, nous nous référons habituellement au courant de fuite. Le courant de drain de fuite (I_{dss}) est mesuré ici pour 80% de la tension maximale autorisée par le constructeur ($V_{ds} = 960\text{V}$) tel que la grille est court-circuitée à la source. Pour obtenir une bonne précision de mesure de faible courant ($< 1\text{A}$), nous utilisons le Source-Meter Keithley 6485 A System. Comme on peut le voir à partir du tableau 3.5, le courant de fuite de drain diminue suite au stress HTRB. Cette dérive de I_{dss} peut s'expliquer par l'hypothèse découlant des mesures C-V qui suggèrent une dégradation de la jonction PN conduisant à une diminution de la quantité de charges dans la zone de charge d'espace.

Pour confirmer l'hypothèse des caractérisations électriques et pour identifier le mécanisme de dégradation, l'un des composants stressés (C50), est analysé avec les techniques PE et SPE.

3.7.2.3 Analyses en microscopie à émission de photons

La distribution en PE du composant stressé (C50) est extraite selon les mêmes conditions que le composant de référence (même courant : $I_{ds} = 22,3mA$) (la figure 3.58). En comparant la distribution en PE du composant référence avec la distribution du composant vieilli, nous remarquons que pour le composant de référence, tous les bords des doigts du composant s'illuminent, tandis que pour le composant stressé, il y a seulement des points "chauds" qui réagissent en électroluminescence. Ces points chauds sont localisés sous la grille du côté source comme illustré par la figure 3.59.



FIGURE 3.58: pour $I_{ds} = 22.1mA$: Signature en émission de photon du composant de référence (Gauche). Signature du composant vieilli(C50)

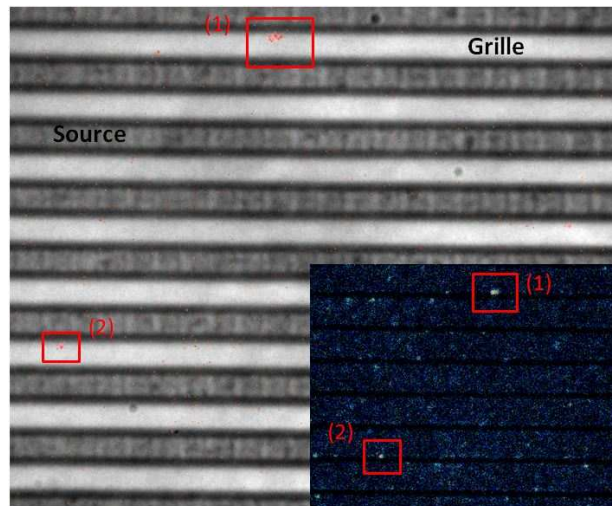


FIGURE 3.59: Localisation en face arrière des spots du transistor C50

3.7.2.4 Analyses en microscopie à émission de photons spectrale

Deux points "chauds" illuminés en PE ont été analysés avec la technique PEM spectrale. Le spectre de PE obtenu pour le premier spot (figure 3.60) se positionne entre le visible et le proche infrarouge. Il s'agit d'un spectre polychromatique contenant deux composantes

spectrales ($\lambda_1 = 692,07nm$ et $\lambda_2 = 777,65nm$) correspondant respectivement à $E_1 = 1,79$ eV et $E_2 = 1,59$ eV. Ce spot traduit des pièges dans la jonction PN. Le deuxième point "chaud" analysé a un large spectre correspondant à une luminescence de la jonction PN. La comparaison du spectre du composant référence à celui du composant vieilli montre un léger décalage spectral en direction des longueurs d'onde croissantes (figure 3.61). Ce fait appuie les hypothèses des caractérisations électriques suggérant une dégradation de la jonction PN. En effet, la migration des charges vers le caisson N^+ engendre la diminution de la hauteur de barrière de la jonction PN induisant la diminution de la différence d'énergie entre le caisson P et N ce qui traduit l'augmentation des longueurs d'onde.

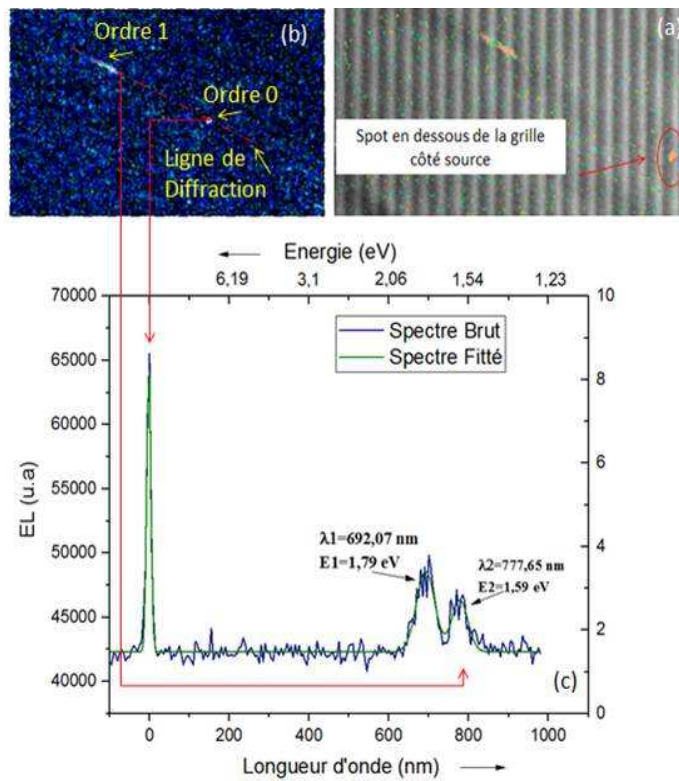


FIGURE 3.60: Spectre d'émission de photons du (C50) après stress : (a) Spot sous la grille côté source. (b) Diffraction du Spot. (c) Extraction du spectre (pour $I_{ds} = 22.3mA$).

3.8 Conclusion du chapitre

Ce chapitre a été destiné dans un premier temps, à décrire le composant d'étude et les mécanismes de dégradation des MOSFETs SiC. Dans un deuxième temps, il explique l'origine d'émission de lumière dans cette structure ainsi que le processus de guidage. L'étude révèle que l'émission de lumière dans notre composant d'étude est attribuée à

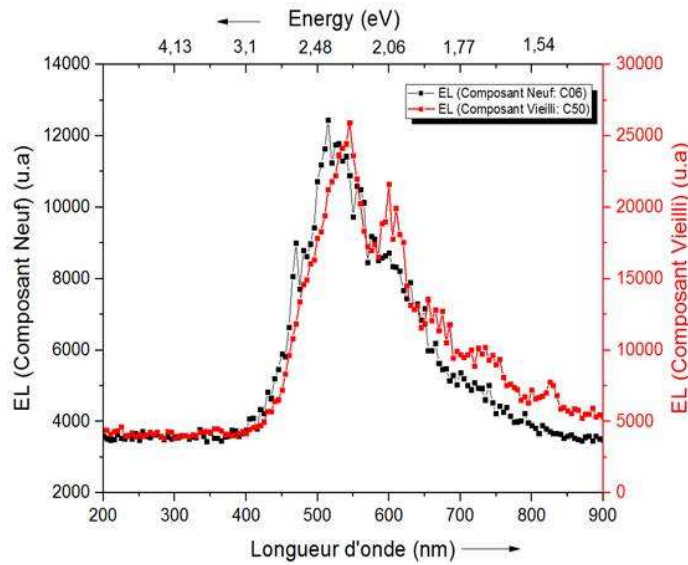


FIGURE 3.61: Spectre du deuxième spot lumineux Vs Spectre du composant référence

la luminescence de la jonction PN lorsqu'elle est polarisée en direct. La diffraction de la signature en EL de cette dernière possède une forme de goutte. La réponse spectrale de cette luminescence est située dans le visible avec un spectre centré sur $\lambda = 550\text{nm}$ et une largeur mi-hauteur de $\Delta\lambda = 200\text{nm}$. La lumière arrive de la jonction PN à l'oxyde de grille SiO_2 par fuite du champ évanescent, pour être guidé par la suite dans la couche du diélectrique (inter-métallique) entre les deux métaux de grille et de source. L'étude du phénomène de l'EL sur ces MOSFETs SiC selon différents modes de polarisation, a révélé une relation linéaire entre l'EL et la tension de grille. De plus, cette étude a montré une forte relation entre les paramètres de polarisation (fort champ ou fort courant) et la distribution en EL (les sites de photoémission activés).

La première application de l'électroluminescence spectrale que nous avons développée s'est portée sur la robustesse des MOSFETs SiC vis-à-vis des décharges électrostatiques. A partir des résultats du test ESD et des analyses en PEM spectrale, nous constatons que les MOSFETs SiC répondent différemment aux décharges électrostatiques. Il s'avère que selon la tension de la décharge appliquée, la défaillance observée est due soit à une défaillance de la jonction PN (décharge à 8kV), ou à une dégradation de l'oxyde de grille (décharge à 6kV). Puisque les tirs ESD sont appliqués sur la grille en gardant les contacts de drain et de source en air, alors l'ensemble du composant peut remonter en tension à plusieurs kilo volts. Ceci engendre des dégradations non seulement au niveau de la grille et de son oxyde, mais aussi au niveau de la jonction PN.

Le deuxième cas d'étude vise à évaluer les performances des composants MOSFETs SiC dans des applications de haute température. Elle s'intéresse à évaluer l'influence de la température sur les MOSFETs SiC. Nous avons procédé en premier lieu à un

vieillessement HTRB et HTGB en palier de température qui a induit une dégradation non-uniforme des caractéristiques électriques. L'analyse en PEM spectrale d'un des composants stressés en HTRB, en complément à des caractérisations électriques, conclut à une dégradation de la jonction PN par la présence de dislocations dans le 4H-SiC. D'après l'hétérogénéité et la dispersion importante des résultats du step-stress HTRB et HTGB obtenues, il a été jugé plus intéressant de remplacer les stress en paliers de température par des essais à température constante. Ainsi, un test HTRB à température constante a été développé. L'analyse en PEM spectrale montre suite à ce stress une dégradation de la jonction PN qui se traduit par un phénomène de piégeage de charges induisant une baisse de la tension de seuil et de la capacité grille-source. Ceci montre que ces composants ne respectent pas complètement la datasheet constructeur pour fonctionner à 150°C avec une tension 1100V inférieure à la tension nominale (1200V).

Parmi les technologies de composant à grand gap il y a ceux à base de nitrure de gallium (GaN) sur lequel on peut appliquer la PEM spectrale pour chercher d'autres mécanismes de dégradation. Il s'agit des transistors HEMT AlGa_N/Ga_N qui feront l'objet d'étude du chapitre suivant.

Chapitre 4

Application de la microscopie à émission de photons spectrale à l'analyse de défaillance des HEMTs AlGaN/GaN

4.1 Introduction

Les transistors à effet de champ à haute mobilité électronique (HEMT) à base des semi-conducteurs à large bande interdite tel que le Nitrure de Gallium ont été développés pour répondre à des besoins croissants en termes de puissance aux hautes fréquences, de tenue en température et de résistance aux radiations ionisantes. Le premier HEMT AlGaN/GaN a été réalisé sur un substrat saphir en 1993 par Asif Khan et al. pour des applications d'hyperfréquences [189]. Grâce aux propriétés du GaN et de l'AlGaN, les HEMTs AlGaN/GaN permettent à la fois une forte densité de porteurs confinés à l'hétérojonction et des mobilités électroniques élevées, avec une fréquence de coupure atteignant plusieurs dizaines de gigahertz. Ces transistors possèdent de larges champs d'applications de natures très diversifiées et répondent à des besoins d'ordre commerciaux et militaires. Il s'agit du marché des télécommunications (stations émettrices), du marché spatial (communications RF, applications satellites) et du marché de la défense (RADAR).

Cependant de nombreuses interrogations concernant les limites de performance de ces dispositifs subsistent. Les origines possibles des effets parasites et leurs conséquences sur

le fonctionnement du composant sont des questions qui ouvrent d'intéressantes perspectives d'étude. La compréhension des mécanismes de dégradation de ces composants est donc primordiale pour identifier les défauts présents dans ces structures et leur potentielle évolution au cours du temps. La maturation de cette technologie impose donc des études de fiabilité pointues sur ces composants. C'est dans ce cadre que nous traitons dans ce chapitre l'étude de la fiabilité des HEMTs AlGaN/GaN par électroluminescence spectrale. Nous donnons d'abord un bref aperçu sur le principe de fonctionnement des HEMTs AlGaN/GaN et sur les mécanismes de dégradation de ces structures. Nous décrivons par la suite le processus d'émission de lumière dans ces composants pour les étudier ensuite par la technique de l'électroluminescence spectrale. Le composant étudié est issu du fabricant United Monolithic System (UMS). Nous présentons une analyse de défaillance d'un composant vieilli pendant 3500h par un stress RF-HTOL. Une synthèse des résultats des caractérisations électriques obtenus suite au stress est introduite. Puis les analyses en EL classique et en EL spectrale sont détaillées. L'étude est finalisée par une analyse micro-structurale en microscopie électronique par transmission.

4.2 Généralités sur les HEMTs AlGaN/GaN

Le transistor à haute mobilité électronique HEMT (High Electron Mobility Transistor) encore appelé TEGFET (Two-dimensional Electron Gas Field Effect Transistor) ou MODFET (MODulation Doped Field Effect Transistor) constitue une évolution majeure du MESFET (FET à jonction métal/semiconducteur) dans laquelle les propriétés d'une hétérojonction sont exploitées. Les premiers HEMTs ont été conçus et réalisés conjointement par Fujitsu et Thomson au début des années 80 [190] et depuis le début des années 1990, ces composants ont largement pris le pas sur les MESFETs en radio-fréquence.

Le principe de base du HEMT repose sur les propriétés relatives aux hétérojonctions. Il s'agit de la juxtaposition de deux semi-conducteurs ayant des largeurs de bande interdite (" gap ") différentes permettant la création d'un gaz bidimensionnel d'électrons (2-DEG) à l'interface de ces deux semi-conducteurs. L'hétérojonction AlGaN/GaN est donc réalisée par la mise en contact d'une couche AlGaN et d'une couche GaN qui présentent des largeurs de bande interdite différentes. Un HEMT est caractérisé par trois contacts métal-semiconducteur : un contact Schottky pour la grille et deux contacts ohmiques pour les électrodes de source et de drain. Le fonctionnement du HEMT se fait à travers la modulation du gaz d'électrons 2D. Le contrôle de la densité de charges présente dans le canal s'effectue par modulation de la tension de grille V_{gs} qui fait varier la position énergétique de la bande de conduction sous la grille par rapport au niveau de Fermi. Dans notre composant d'étude, la modulation de grille se fait par des tensions négatives

permettant de dépeupler plus ou moins la zone du canal bidimensionnel entre la grille et le drain (transistor à déplétion, ou “ normally on ”). La figure 4.1 montre l'empilement des différentes couches qui constituent un HEMT ainsi que le diagramme de bande correspondant. La couche buffer en GaN dans laquelle va se former le canal bidimensionnel (2-DEG) à la surface, est épitaxiée sur un substrat à l'aide de plusieurs couches tampons d'accord de maille. Ces couches permettent de réduire la contrainte mécanique dans le buffer GaN et donc d'obtenir une meilleure qualité cristallographique dans ce dernier, du fait de la réduction du nombre de dislocations. Le substrat est en général à base de SiC, Si ou Al_2O_3 et son épaisseur varie de $100\mu m$ à $500\mu m$.

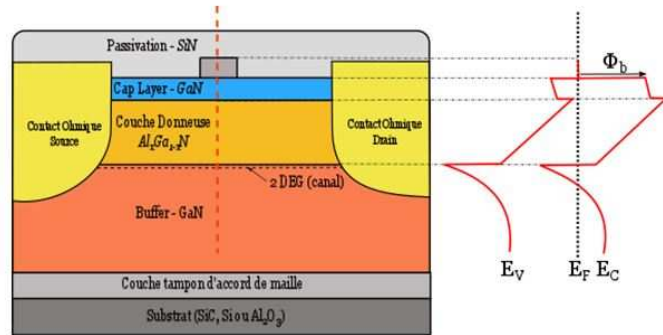


FIGURE 4.1: Structure d'un HEMT AlGaIn/GaN

4.3 Mécanismes de défaillance des HEMTs AlGaIn/GaN

Jusqu'à présent, les performances des transistors HEMTs AlGaIn/GaN n'ont pas atteint les prédictions théoriques que promettent les propriétés physiques des matériaux à base de GaN. De nombreuses études ont été menées récemment afin de caractériser et comprendre les mécanismes de défaillance observables dans les technologies GaN [191][192]. Ces mécanismes sont de nature complexe tant les phénomènes intervenant sont nombreux et couplés. On peut classer ces dégradations en trois grandes catégories (figure 4.2) :

- Dégradations activées thermiquement : La couche de passivation sert à protéger la surface du composant des effets extérieurs et des courants de fuite à la surface du semi-conducteur. Dans les applications à haute température, cette couche présente un risque de délamination générant des états d'interfaces parasites à l'interface passivation/AlGaIn, ce qui peut induire le phénomène de grille virtuelle [193].

Une des principales limitations de l'utilisation du GaN à haute température réside dans les problèmes de “ piqûres ” de surface (surface pitting) [194], et de stabilité des métallisations Schottky et ohmique, particulièrement en ce qui concerne la diffusion de l'alliage des contacts ohmiques et l'inter-diffusion au niveau du contact Schottky [195] [196].

- Dégradations activées par le fort champ électrique et le fonctionnement à de haute tension :

Les matériaux GaN et AlGaIn étant fortement piézoélectriques, les forts champs électriques appliqués entre la grille et le drain génèrent des contraintes mécaniques en tension dans la couche AlGaIn, ce qui engendre des défauts cristallins.

Le fonctionnement à forte tension favorise le piégeage de charges dans différentes régions du transistor (électrons “ chauds ”). En effet, le piégeage de porteurs peut se produire à différents endroits de la structure tels qu’à l’interface métal/barrière, dans la zone d’accès grille-drain, à l’interface barrière/couche tampon ou bien dans la couche tampon de GaN (figure 4.2). En général, le mécanisme de piégeage consiste en la capture d’électrons par des défauts présents dans la structure. Ceci est montré par Alamo et al. [197] [198] et répertorié récemment par Bisi [199]. Les électrons capturés induisent la réduction de la densité de porteurs dans le canal 2D qui maintient la neutralité de la charge globale dans la structure. La conséquence est une baisse du courant de drain I_d et une variation de la tension de coude. La capture ou l’émission de ces pièges est liée à un temps caractérisant la durée du mécanisme. Il existe deux indicateurs quantifiant la contribution de ces effets de piège dans le fonctionnement du transistor. Il s’agit du “ gate-lag ” et du “ drain-lag ”. L’effet “ drain-lag ” est observé dans le cas où la chute du courant de drain est observé lors d’une variation brusque de la tension appliquée sur le drain. L’autre effet, appelé “ gate-lag ”, se manifeste lorsque la réduction du courant est liée à l’apparition de charges piégées en surface du composant lorsque le composant est fortement pincé [200].

Dernièrement, Brunel et al. ont observé un nouveau mécanisme de dégradation lié au fonctionnement à fort champ, appelé “ mécanisme d’emballement électrique ” [201]. Ce phénomène engendre en fonctionnement RF une forte augmentation du courant de grille négative accompagnée d’une chute de la puissance de sortie. En fonctionnement DC, ce mécanisme se présente par une augmentation des courants de drain et de grille dans la zone de saturation. Ce nouveau mécanisme de dégradation est corrélé à la conduction par effet tunnel et semble être très dépendant de la qualité du contact Schottky et de la barrière d’AlGaIn.

- Dégradations liées à la densité de courant : au niveau des contacts Schottky, l’électromigration appelée aussi “ gate sinking ” entraîne généralement des modifications sur la tension de pincement et une augmentation des courants de fuite, ce qui entraîne le plus souvent la destruction du composant et le claquage du contact de grille puisque cette dernière ne joue plus son rôle de commande, et le canal ne peut plus être modulé [202].

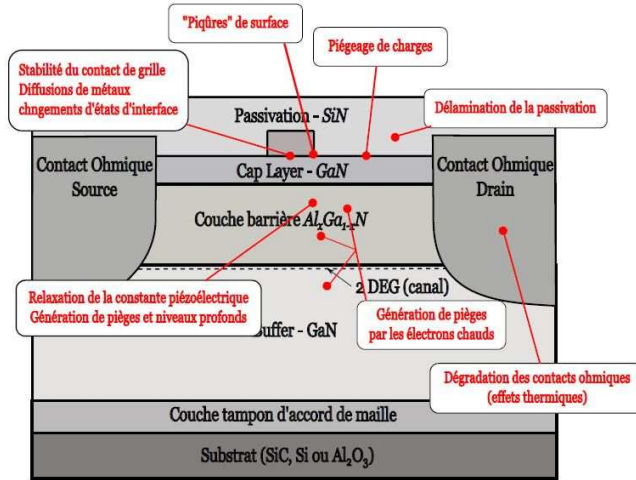


FIGURE 4.2: Mécanismes de dégradation dans les structures HEMTs AlGa_xN/GaN

4.4 Émission de lumière dans les HEMTs AlGa_xN/GaN

L'électroluminescence est une technique qui a fait ses preuves dans l'analyse de défaillance de différentes technologies de composants comme le Si ou le GaAs. Vu la pertinence et les potentiels de cette technique, un grand intérêt s'est porté dernièrement à son implémentation pour l'analyse de composants à base de GaN. Elle a souvent été utilisée comme indicateur de fiabilité pour les concentrations d'électrons chauds [203], [204] et pour la localisation des défauts dans les HEMTs.

Dans la littérature, L'EL dans les HEMTs AlGa_xN/GaN est un phénomène associé aux électrons chauds générés par le fort champ électrique présent dans ces structures. L'émission de lumière est attribuée principalement aux transitions intrabandes des électrons [205]. Ces transitions peuvent être classées en quatre catégories :

- Transitions intrabandes assistées par phonons.
- Transitions intrabandes inélastiques des électrons dues aux collisions inélastiques responsables de la diffusion des porteurs (scattering) ou rayonnement de freinage (Bremsstrahlung).
- Transitions intrabandes directes.
- Recombinaisons sur les niveaux profonds.

L'EL peut être due à l'ionisation par impact dans le canal GaN sous forte polarisation du transistor qui engendre des rayonnements de freinage (Bremsstrahlung). L'étude spectrale de l'électroluminescence dans le domaine du visible-infrarouge de composants HEMTs AlGa_xN/GaN, effectuée par Brazzini et al. [206], rapporte que l'EL du GaN due au rayonnement de freinage (Bremsstrahlung) peut être montrée selon trois indicateurs :

La forme continue du spectre, la grande variation dans l'émission d'EL, et la polarisation de la lumière émise.

L'EL a été souvent utilisée sur les HEMTs AlGaIn/GaN en ON-State, afin de rechercher la distribution d'électrons chauds et de la température des électrons pour localiser les pièges générés dans les dispositifs pendant le stress [207], [208]. Cette technique de PEM a également prouvé son efficacité dans la démonstration de la présence d'ionisation par impact dans les HEMTs AlGaIn/GaN en ON-State [209]. L'EL est considérée aussi comme un outil efficace de surveillance de la dégradation des HEMTs AlGaIn/GaN en OFF-State [210]. En effet, l'EL révèle sur les HEMTs stressés en OFF-State, des points chauds liés à la génération de défauts non radiatifs dans la couche d'AlGaIn [210]. Ceci est attribué à des courants de fuite accrus dans les HEMTs AlGaIn/GaN via la couche d'AlGaIn. Dans [211], l'EL est utilisée pour analyser le chemin de percolation induit par le stress dans les HEMTs AlGaIn/GaN. Marko et al. ont remarqué une augmentation du courant de fuite de grille pendant le stress, qui est en corrélation avec l'augmentation du nombre de spots d'EL au bord de la grille [211]. Cela indique une création d'un nouveau chemin de percolation. Dans une autre étude, l'EL est utilisée pour évaluer l'influence du niveau d'oxydation de surface [212]. Il a été déduit des signatures d'EL, qu'il y avait un changement de répartition du champ électrique au bord de la grille côté drain, résultant en la génération de pièges sur les transistor HEMT ayant une épaisseur d'oxyde de surface plus grande [212]. Dans ce chapitre, nous présentons une analyse en PE sur des transistors HEMT AlGaIn/GaN neufs et vieillis, fonctionnant en OFF-State. Les points chauds en PE sont observés et corrélés avec le courant de grille inverse.

4.5 Présentation du composant d'étude

Le composant d'étude est un HEMT AlGaIn/GaN du fondeur UMS (United Monolithic Semiconductors) dédié à des applications RF de puissance en bande S. Il est de technologie GH50 correspondant à une longueur de grille de $0,5\mu m$. Le dispositif assure un fonctionnement large bande (DC-5GHz) avec une puissance de sortie supérieure à 25 W et une tension nominale de 50V. Le composant (référence CHK025A-SOA) est livré dans un boîtier non adapté (figure 4.3). Ce dernier se présente sous la forme d'une embase métallique avec un capot en céramique afin d'éviter les effets des résistances parasites et thermiques. Le contact de source du transistor est assuré en face arrière à travers les vias métallisés du composant brasés sur l'embase. Ainsi, le contact de source est reporté sur l'embase tandis que les deux contacts de grille et de drain sont reportés sur les broches du composant. La grille correspond à la broche biseautée alors que la broche droite est reliée au drain.

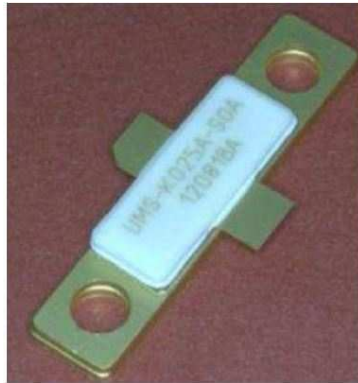


FIGURE 4.3: Boîtier non adapté du CHK025A-SOA

La décapsulation en face avant d'un composant est effectuée afin d'accéder à la puce et d'observer la structure interne du transistor. L'ouverture en face avant consiste à chauffer le composant à 200°C sur une plaque chauffante jusqu'à ce que la colle entre le capot et l'embase du boîtier soit ramollie pour pouvoir retirer le capot à l'aide d'une pince. A partir de la vue du composant en observation au Microscope Électronique à Balayage (MEB) (figure 4.4), on relève plusieurs informations sur l'architecture du transistor. Nous constatons que la puce fait 2.3×1 mm, et que le transistor est constitué de 4×8 doigts de grille faisant $250\mu\text{m}$ de largeur en structure interdigitée (développement de grille total de 8 mm). Quatre fils d'interconnexion sont connectés sur la patte de la grille. Chaque fil d'interconnexion est relié à un contact rapporté à un groupe de 8 doigts de grille. De l'autre côté de la puce, la broche de drain est reliée de la même façon aux doigts de drain. Le contact de source est reporté via les ponts à air puis à ses plots de part et d'autre de la puce. Le contact se retrouve en face arrière par les vias métallisés.

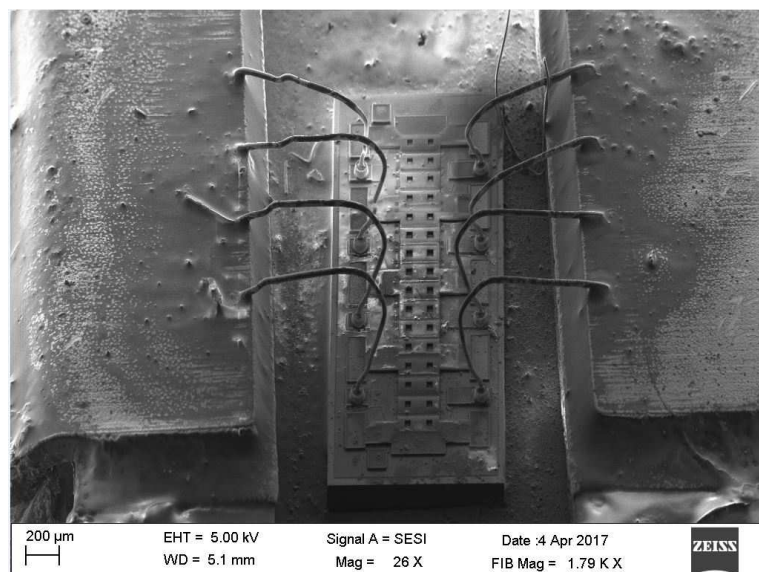


FIGURE 4.4: Image MEB du composant décapsulé

4.6 Description du test et caractérisation électrique

Afin de se rapprocher des conditions réelles de fonctionnement des transistors HEMTs AlGaIn/GaN de la technologie GH50 dans les applications radar, un vieillissement de type pulsed-RF HTOL est effectué dans le cadre de la thèse d'Alexis Divay au GPM [213]. Nous nous intéressons ici à analyser un des composants vieillis pendant 3500h selon les conditions nominales ($V_{ds0} = 50V$ et $T_C = 160^\circ C$). Pendant le vieillissement, un certain nombre de paramètres sont suivis en fonction du temps. Parmi ces paramètres, nous nous focaliserons sur les caractéristiques de diode Grille-Source, les caractéristiques d'entrée et les caractéristiques de sortie. Les mesures en mode diode Grille-Source permettent d'évaluer la qualité du contact Schottky. Les caractéristiques de diode en direct (figure 4.5) et en inverse (figure 4.6) du composant d'étude montrent une forte baisse du courant de fuite de grille. Pour $V_{gs} = -14V$ le courant de fuite a baissé de $22,8\mu A/mm$ à $5,9\mu A/mm$. Par contre, les paramètres thermoïoniques, à savoir la hauteur de barrière et le coefficient d'idéalité, ne présentent pas de variation trop importante durant le vieillissement. Ceci montre que la diode Schottky ne présente pas d'évolution au niveau des états d'interface des matériaux en regard.

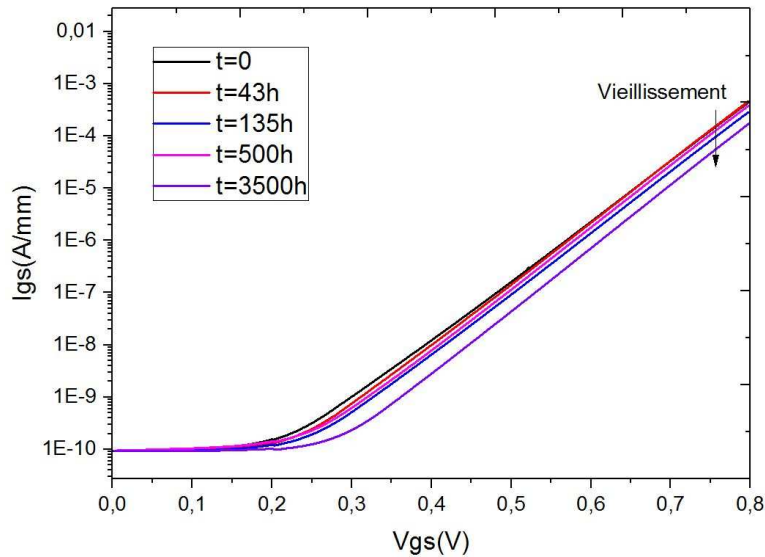


FIGURE 4.5: Mesure de diode en direct pendant le vieillissement

Généralement, la réduction du courant de fuite de la grille pourrait être attribuée soit au phénomène de piégeage lié à la grille virtuelle, soit à la dégradation de l'interface, ou à des dislocations, ou encore à la présence de tous ces phénomènes en même temps. Puisque les paramètres thermoïoniques n'ont pas varié, alors l'hypothèse de la dégradation d'interface peut être exclue. Pour investiguer le phénomène de piégeage, des mesures de "gate-lag" et de "drain-lag" ont été effectuées à partir des caractéristiques de sortie. La quantification

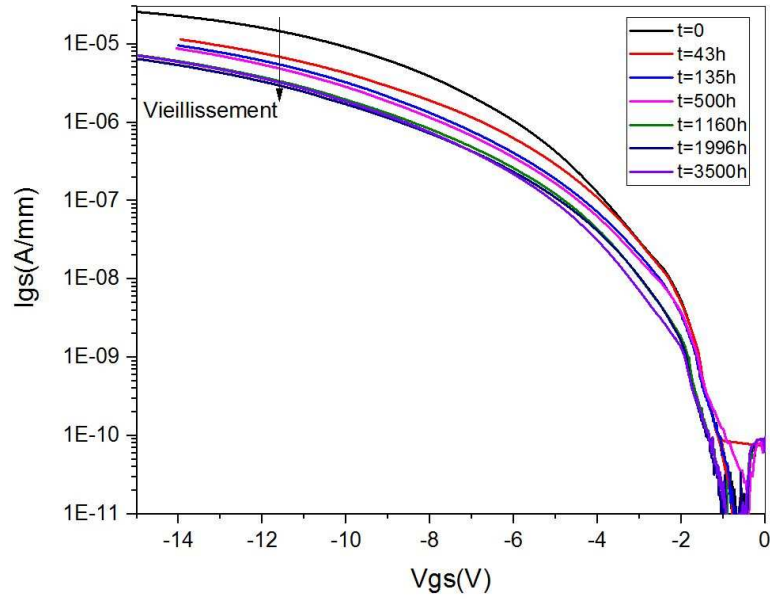


FIGURE 4.6: Mesure de diode en inverse pendant le vieillissement

des “ gate-lag ” et “ drain-lag ” est obtenue respectivement par l’expression 4.1 et 4.2 [214] :

$$\text{Pour le gate-lag : } GL(\%) = 100 \cdot \left(1 - \frac{I_{ds}(0, 0)}{I_{ds}(-7, 0)}\right) \quad (4.1)$$

$$\text{Pour le drain-lag : } DL(\%) = 100 \cdot \left(1 - \frac{I_{ds}(-7, 0)}{I_{ds}(-7, 50)}\right) \quad (4.2)$$

En effet, le point $(V_{GS0}, V_{DS0}) = (0V, 0V)$ est le point de repos standard. Cependant, le point $(V_{GS0}, V_{DS0}) = (-7V, 0V)$ permet de quantifier les possibles effets de piégeage sur la grille, alors que le point $(V_{GS0}, V_{DS0}) = (-7V, 50V)$ permet d’identifier la présence des pièges à la fois sur la grille et sur le drain. Le calcul est effectué pour $V_{DS} = 10V$ à partir des réseaux IV mesurés en impulsion pendant le vieillissement à trois points de repos : $(V_{GS0}, V_{DS0}) = (0V, 0V)$, $(-7V, 0V)$ et $(-7V, 50V)$ (figures 4.7, 4.8, 4.9). Le tableau 4.1 montre l’évolution du “ gate-lag ” et “ drain-lag ” avec le stress.

	Gate-lag	Drain-lag
@ t=0	GL(%)= - 3,7%	DL(%)= - 39%
@ t=3500h	GL(%)= - 3,6%	DL(%)= - 48,4%

TABEAU 4.1: Quantification du “ gate-lag ” et du “ drain-lag ” avant et après le stress

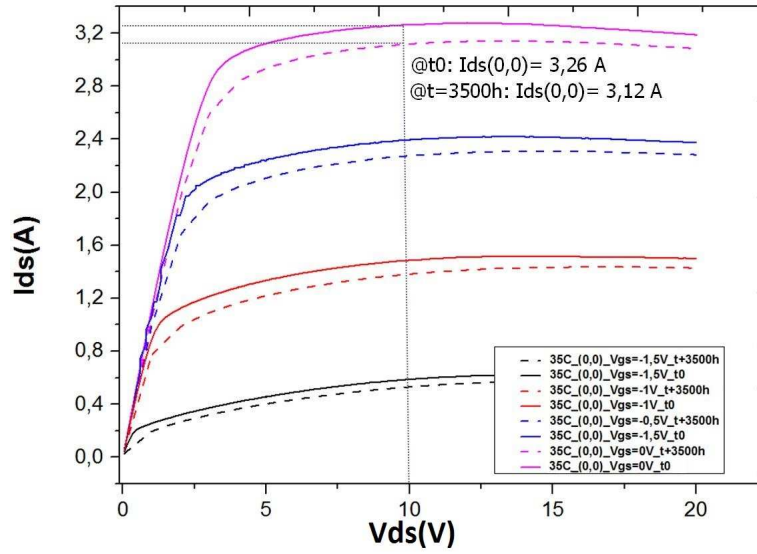


FIGURE 4.7: Évolution de la caractéristique de sortie avec le vieillissement pour le point de repos $(V_{ds}, V_{gs}) = (0V, 0V)$

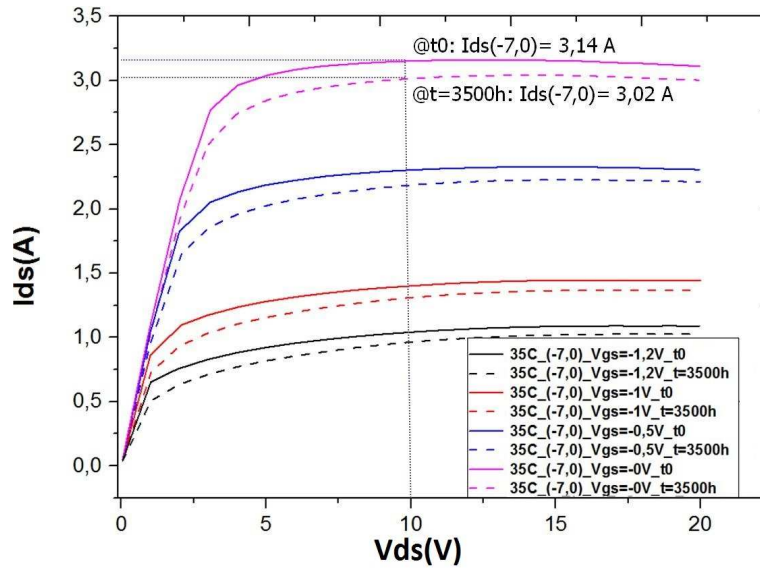


FIGURE 4.8: Évolution de la caractéristique de sortie avec le vieillissement pour le point de repos $(V_{ds}, V_{gs}) = (-7V, 0V)$

Nous constatons que le drain-lag augmente avec le vieillissement suggérant une évolution de la quantité de pièges dans le buffer. De plus, l'évolution de la caractéristique de sortie pour le point de repos $(-7V, 50V)$ (figure 4.9), montre une baisse de 10% du courant de saturation, ainsi qu'une forte diminution de la transconductance (-8% par rapport à sa valeur mesurée à l'état initial). Cela traduit un fort effet de pièges liés au " drain-lag " qui s'accroît avec le temps. Cependant, à partir de la figure 4.10 et du tableau 4.1, nous constatons que le " gate-lag " ne présente pas une évolution significative, ce qui suggère que la quantité de pièges dans les bords de la grille n'a pas beaucoup évolué.

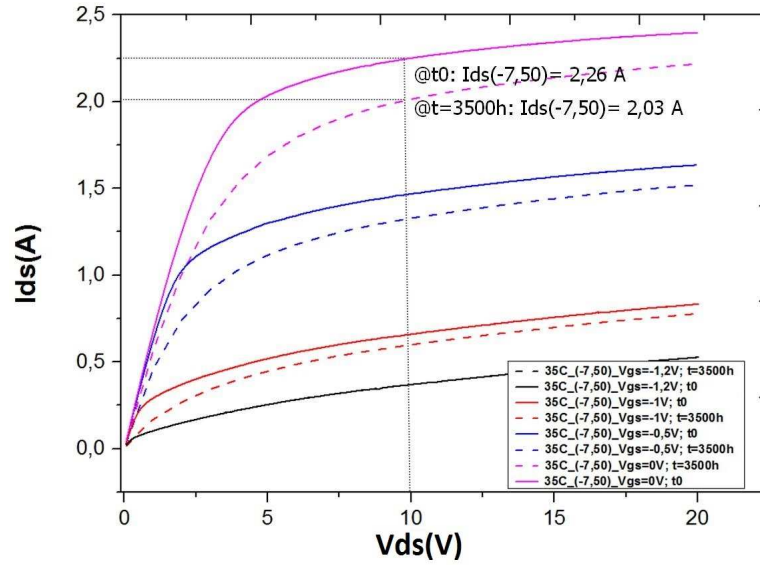


FIGURE 4.9: Évolution de la caractéristique de sortie avec le vieillissement pour le point de repos (V_{ds}, V_{gs}) = (-7V, 50V)

En effet, les caractéristiques de sortie aux points de repos ne faisant pas intervenir le “ drain-lag ” (i.e : 0V,0V et -7V,0V) (figures 4.7, 4.8) montrent une légère baisse de la transconductance (différence d’environ 4%), et du courant de saturation (inférieure à 5%). Ceci prouve que l’effet de “ gate-lag ” a donc peu d’impact sur le fonctionnement du transistor, même après vieillissement. En outre, la tension de pincement V_{th} ne semble pas être touchée par le vieillissement (figure 4.11). Ceci indique que la baisse de courant de fuite aperçue suite au vieillissement, ne peut pas être attribuée au phénomène de la grille virtuelle. Par conséquent, il semble que cette dérive de I_{gss} pourrait être attribuée a priori aux dislocations. Pour confirmer cette hypothèse, des analyses complémentaires avec les techniques PE et SPE sont effectuées.

4.7 Analyse en microscopie à émission de photons

D’après la figure 4.4, nous constatons que la surface active du composant d’étude est quasi masquée par des ponts à air. Ceci rend impossible l’observation en PE frontale puisque la propagation de la lumière est bloquée par la métallisation. Par conséquent, l’observation des doigts de grille en face avant nécessite d’enlever les ponts de source longs de $250\mu m$. Vu les dimensions à retirer, ce processus devient difficile et coûteux ce qui nous amène à passer à l’observation en face arrière. Un composant neuf et un composant vieilli ont été ouverts en face arrière afin de les observer en PE. L’ouverture face arrière nécessite tout d’abord d’ouvrir le composant en face avant en retirant le capot en céramique. Cette étape est nécessaire afin de tenir la puce par une résine thermoplastique. En effet, cette

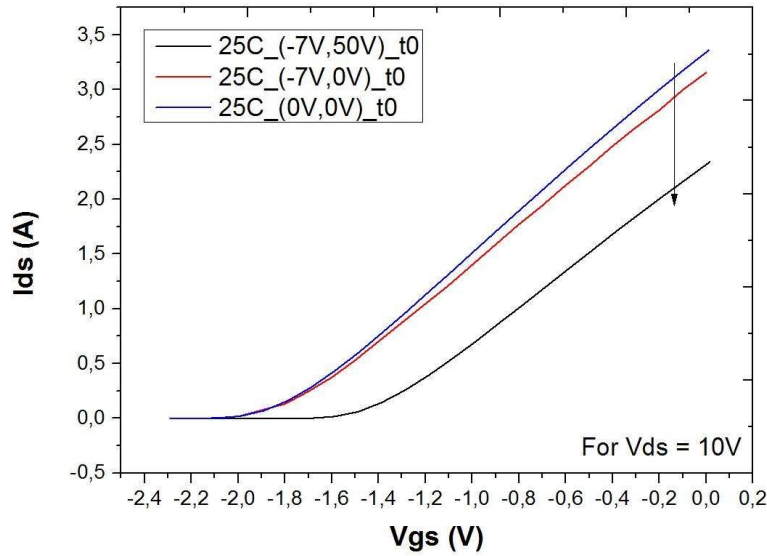


FIGURE 4.10: Caractéristique d'entrée du composant d'étude pour plusieurs points de repos

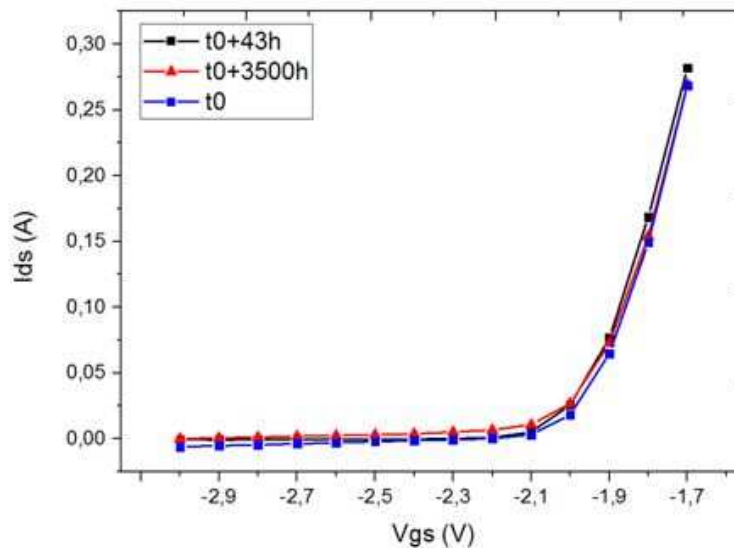


FIGURE 4.11: Évolution de la caractéristique d'entrée avec le vieillissement pour le point de repos (0V,0V)

dernière est coulée sur la puce, qui sera par la suite placée dans un porte-échantillon de manière à former une pastille de résine (figure 4.12-1). Ensuite l'échantillon est poli manuellement par la face arrière afin de retirer l'embase du boîtier (figure 4.12-2) ainsi que la brasure du transistor (figure 4.12-3), jusqu'à l'apparition de la puce (figure 4.12-4). Étant donné que le SiC est transparent aux longueurs d'onde visibles à des épaisseurs inférieures à $100\mu\text{m}$, le composant n'est pas trop aminci afin de voir la surface active avec un microscope. Afin de mener des investigations en PE sur le composant ouvert, le composant doit être polarisé en prenant le contact de source sur les vias de source

et en récupérant les contacts de grille et de drain sur les broches du boîtier restantes à travers des pointes. Vu la nature de la résine utilisée dans l'ouverture face arrière, nous sommes limités au niveau de la puissance dissipée. En effet, nous ne pouvons plus nous permettre de chauffer le transistor et de dissiper une trop forte puissance sans risque de faire fondre la résine. Par conséquent, nos investigations en PE seront seulement menés à des champs tels que le transistor soit pincé.

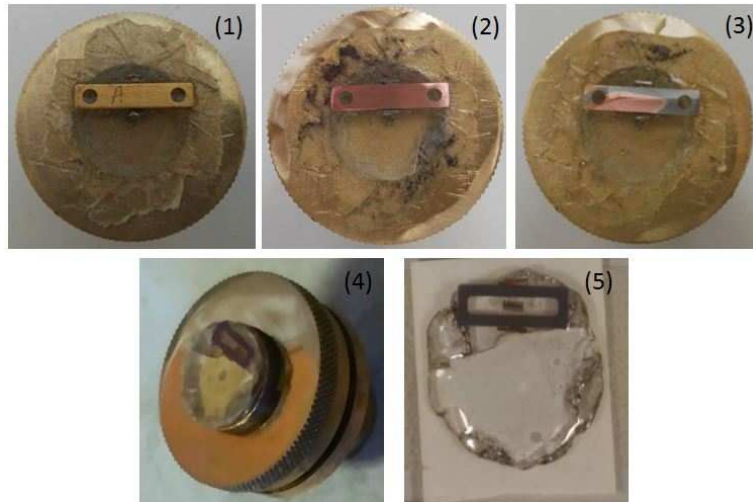


FIGURE 4.12: Ouverture face arrière : Étapes de polissage du composant

Pour visualiser l'impact du mode de polarisation sur la distribution en PE, les mesures sont réalisées suivant deux modes de polarisation. Les caractérisations en PE ont été réalisées en premier sur le composant neuf, en mode diode Grille-Source à faible tension inverse ($V_{gs} = -15V$) (correspondant à la tension maximale de ce transistor selon la fiche technique). Dans ces conditions de polarisation, le composant émet un signal de luminescence faible réparti uniformément le long du canal (figure 4.13-a). Ensuite, la distribution de PE du composant neuf a été étudiée dans le mode diode Gate-Drain à $V_{gd} = -30V$ (figure 4.13-b). Sur ce protocole de mesure, la source est isolée électriquement (laissée en l'air). Ce mode révèle l'émergence des spots de haute intensité en raison de la présence d'un champ électrique suffisamment élevé avec le passage d'un faible courant de l'ordre du micro ampère). Ces mêmes spots sont également observés en mode transistor où la grille est polarisée à $V_{gs} = -7V$ et le drain à $V_{ds} = 30V$ (figure 4.14). Dans ce mode, le courant I_{ds} ($I_{ds} = 18\mu A$) est extrêmement faible puisque le transistor est fortement pincé.

La figure 4.14 présente la comparaison entre un composant neuf et un composant vieilli. La distribution en PE du composant neuf est caractérisée par une émission le long des doigts de grille (due au passage du courant) avec la présence de quelques spots de plus fortes intensités, visibles le long de ces doigts (figure 4.14-a). Brunel et. al. ont observé la même signature sur une technologie GH25 d'UMS ($0,25\mu m$ de longueur de grille)

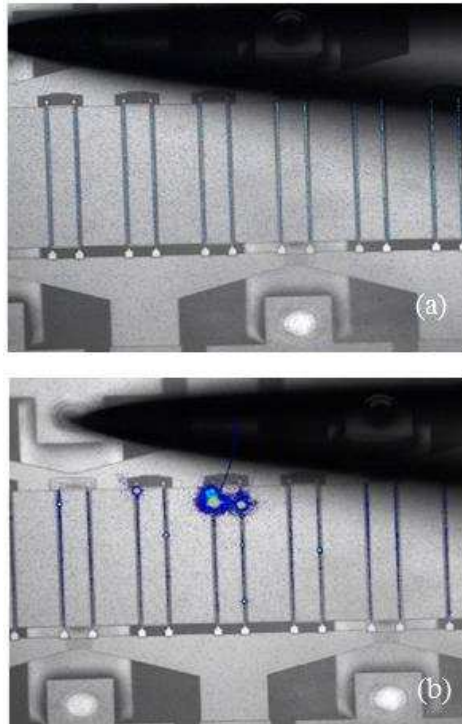


FIGURE 4.13: Localisation des spots sur un composant neuf en photo-émission : (a) : en mode diode (Grille - Source) : ($V_{gs} = -15V$). (b) : en mode diode : $V_{gd} = -30V$.

[215]. Le transistor vieilli montre une distribution en PE similaire mais à des intensités plus faibles (figure 4.14-b). De plus, le nombre de spots sur le composant vieilli est plus faible que sur le composant neuf. Pour observer plus de signal sur le composant vieilli, la polarisation de drain a été augmentée jusqu'à $V_{ds} = 50V$. En augmentant la tension, on observe une augmentation du nombre de spots et de leurs intensités (figure 4.14-c) pour coïncider globalement avec la signature du composant neuf. Ceci montre que le vieillissement du composant se traduit en PE par une réduction d'intensité. La dérive d'intensité lumineuse après vieillissement est probablement due à la diminution du courant de fuite comme le montre la caractéristique de la diode (figure 4.6). En effet, la signature en PE est moins intense étant donné que le courant est plus faible sur le composant vieilli polarisé à $(-7V, 30V)$. Ainsi, l'illumination ici est attribuée à la fuite de la grille. L'électroluminescence démontre que l'augmentation du courant de fuite de grille est corrélée à la création de points d'injection de courant discrets et très localisés ou de " points chauds (hot-spots) " qui correspondent peut-être à des défauts dans le semi-conducteur ou à l'interface métal-semi-conducteur [216].

En fait, l'augmentation du courant de grille correspond à la génération de points luminescents, ce qui indique la présence d'un chemin préférentiel pour la conduction du courant de fuite. Ceci a été déjà mis en évidence en " step stress " fortement négatif sur la grille par Meneghini [217]. L'augmentation de la tension de drain de 30V à 50V génère

une augmentation du courant de fuite aux bornes du composant et met en évidence les points de faible intensité relevés à la polarisation $(V_{gs}, V_{ds}) = (-7V, 30V)$. (figure 4.14-b).

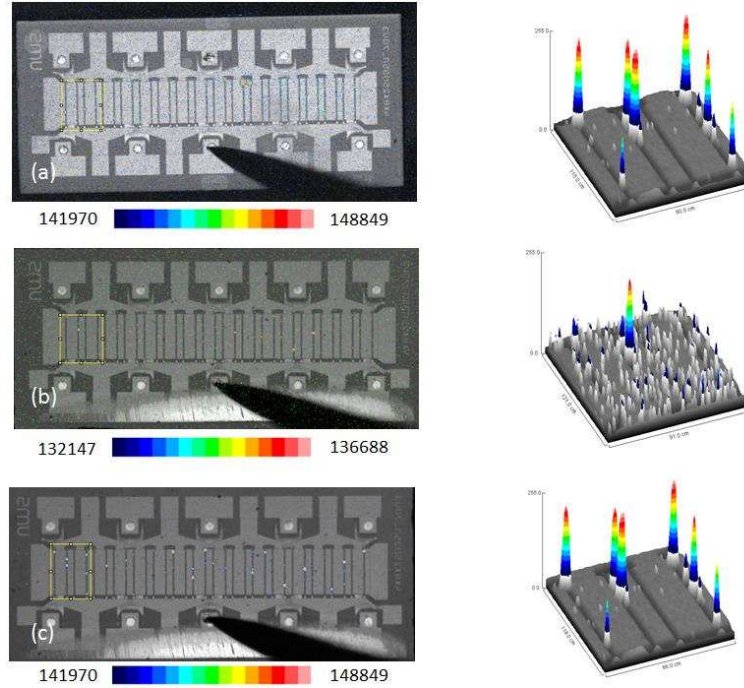


FIGURE 4.14: (a) : Distribution en EL du composant neuf polarisé en mode transistor : $(V_{gs}, V_{ds}) = (-7V, 30V)$. (b) : Distribution en EL du composant vieilli polarisé en mode transistor : $(V_{gs}, V_{ds}) = (-7V, 30V)$. (c) : Distribution en EL du composant vieilli polarisé en mode transistor $(V_{gs}, V_{ds}) = (-7V, 50V)$.

Les émissions observées sont de trois natures : des spots qui sont situés sous la grille du côté drain (figure 4.15-b-1), des spots situés sous le milieu de la grille (figure 4.15-b-2) et des spots situées sous la grille du côté source (figure 4.15-a). Les spots situés sous la grille du côté drain ont déjà été observés par Brunel et. Al. [215] et correspondent selon M.Bajo et al. aux phénomènes de puits de surface révélés suite à un stress off-state en champ électrique [218]. Par contre, pour autant que nous le sachions, les deux derniers types de spots n'ont jamais été observés dans la littérature avec la technique de PE en face arrière. Cependant, E. Zanoni et al. ont observé depuis la face avant d'un composant vieilli, des spots en PE situés au bord de la grille du côté du drain et de la source [216].

4.8 Analyse en spectrométrie RAMAN

Pour mieux comprendre les signatures en PE observées, des analyses en spectrométrie Raman ont été effectuées en collaboration avec le laboratoire GREYC. La mesure thermique par spectrométrie Raman sert à réaliser une cartographie de la distribution de la

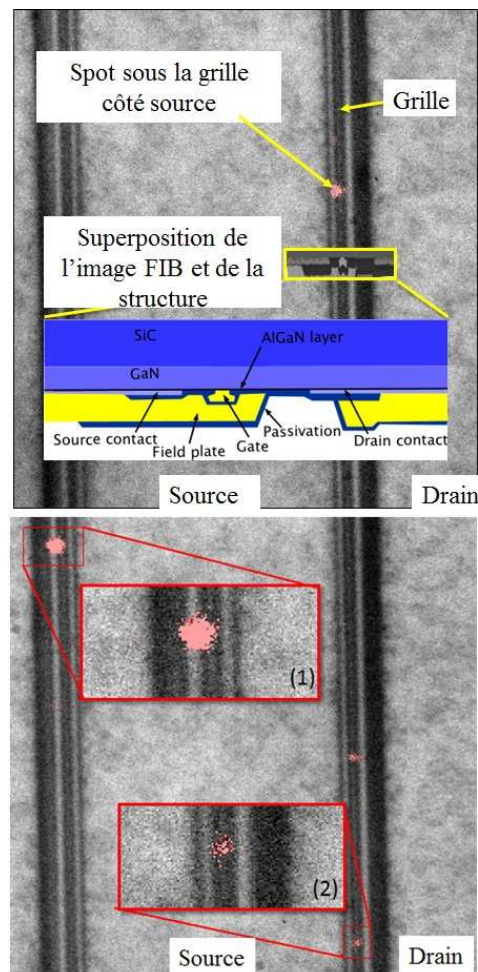


FIGURE 4.15: Localisation des spots. (a) : Spot sous la grille côté source. (b) : (1) Spots sous la grille côté drain, (2) spots au milieu de la grille.

température permettant d'associer l'électroluminescence à un phénomène thermique ou non [219].

Cette technique se base sur l'excitation de la surface du composant par une source lumineuse. Suite à l'interaction de la lumière avec la matière, un transfert d'énergie inélastique se fait entre les photons incidents et les phonons. La mesure de la température est déduite à partir de cet échange, et plus précisément de tous les changements de comportement des phonons du cristal (leur population, durée de vie ou énergie) car la température du composant est indépendante de la lumière incidente. En effet, l'élévation de la température dans le composant engendre la dilatation thermique du cristal et donc une dérive de la fréquence de vibration des phonons. L'élévation de la température fait varier également la distribution des phonons ce qui modifie l'intensité de la diffusion Raman. La température dans les semi-conducteurs peut être mesurée de trois façons différentes par spectrométrie Raman. La première méthode utilise le rapport d'intensité des raies Stokes et anti-Stokes, la seconde méthode utilise le déplacement de la fréquence de la raie Raman

Stokes (car c'est la plus intense), la troisième méthode utilise la largeur à mi-hauteur de la raie Raman Stokes). Nous utilisons dans nos mesures les deux dernières méthodes [220].

A travers la technique de PE, nous avons localisé deux doigts (D19 et D20) où les points chauds sont visibles le long de la grille du transistor (figure 4.16). Nous nous intéressons à analyser la variation de la température le long de ces deux doigts pour remonter à la relation entre l'origine de l'émission de lumière et la température.

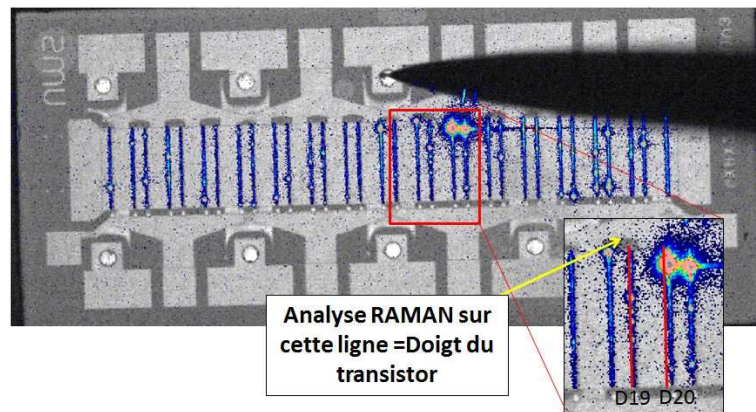


FIGURE 4.16: Localisation en PE des doigts à analyser en Raman

Étant donné que l'échantillon est ouvert en face arrière, le contact de source est repris à travers une pointe soudée à la laque d'argent sur un via. Le contact de source est reporté ensuite sur un coude en cuivre permettant une connexion à la source comme le montre la figure 4.17-a. Le composant est polarisé selon les mêmes conditions de polarisation de la PE ($V_{ds} = 30V$, $V_{gs} = -7V$, $I_{ds} = 18\mu A$) pour générer les mêmes points chauds. Une source excitatrice dans le domaine du visible (633 nm) est utilisée pour l'analyse Raman. Le faisceau laser est focalisé à la surface de l'échantillon ouvert en face arrière au plus près de la grille, c'est-à-dire au niveau du point chaud (figure 4.17-b).

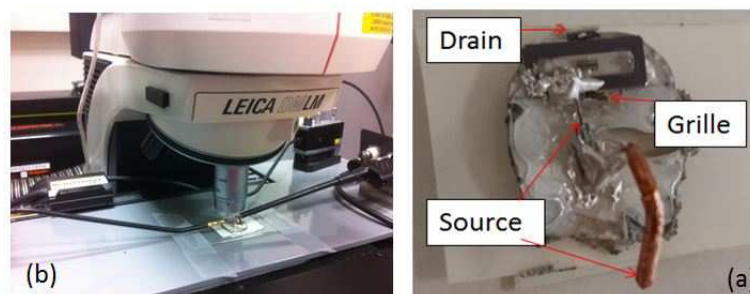


FIGURE 4.17: (a) : Composant d'étude. (b) : Branchement pour l'analyse Raman

La géométrie utilisée est la rétrodiffusion de la lumière sur la face (0001) des solides cristallins GaN, AlGaN, ceci correspond à la configuration géométrique $Z(-,-)\bar{Z}$ quelles

que soient les polarisations des faisceaux incidents et diffusés. Dans cette configuration, les règles de sélection autorisent, en principe, uniquement les modes E2 et A1(LO) pour la phase wurtzite des matériaux GaN et AlGaIn [220] (figure 4.18).

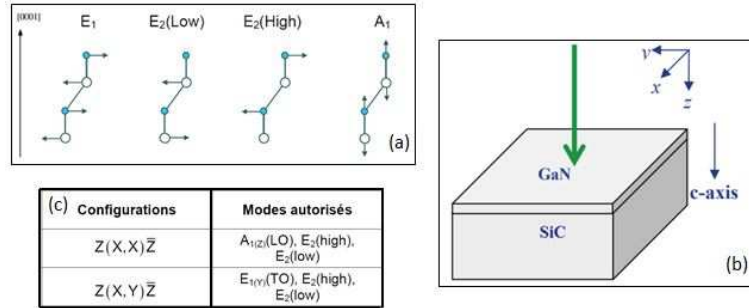


FIGURE 4.18: (a) :Déplacements atomiques associés aux modes optiques de vibration des cristaux dans la structure hexagonal wurtzite. (b) : Géométrie Z(-,-)Z utilisée pour l'étude des spectres Raman du GaN. (c) : Règle de sélection en rétrodiffusion sur la face (0001) du système hexagonal wurtzite [220].

Puisque les analyses sont faites en face arrière et comme la source excitatrice est dans le visible, alors on obtient un spectre de substrat SiC en plus de toute l'hétérostructure AlGaIn/GaN (car le mode E2(high) du GaN porte l'information de la couche d'AlGaIn aussi).

L'évaluation de la température en se basant sur le déplacement de la fréquence de la raie Raman Stokes (figure 4.19) montre qu'il n'y a pas de dérive significative du nombre d'onde le long de la grille des deux doigts que cela soit pour le mode E2(high) ou A1(LO). Ceci suggère que la température est restée quasi-constante. La deuxième méthode de mesure confirme ce résultat. En effet la largeur à mi-hauteur du spectre Raman n'a présenté aucune variation le long de la grille des deux doigts (figure 4.20). Ceci prouve que pour ces conditions de polarisation, qui évitent l'auto-échauffement du composant (faible densité de courant ($\sim 18\mu A$)), la température des deux doigts est invariante. Par conséquent, ces mesures Raman suggèrent que la variation de la distribution de l'intensité de l'EL, peut être expliquée éventuellement par des mécanismes non radiatifs de dissipation d'énergie électrique. Ces résultats sont observés par Pomery et al. [219] qui trouvent que l'EL n'est pas liée seulement au champ électrique mais aussi à des distributions de courant inhomogènes ou à des mécanismes non radiatifs.

4.9 Analyse en microscopie à émission de photons spectrale

Afin d'identifier la nature des spots en PE observés, nous procédons à une analyse en PE spectrale de quelques spots du composant vieilli et du composant de référence. Peu importe le type de spot et sa localisation, il s'avère qu'ils ont tous la même distribution

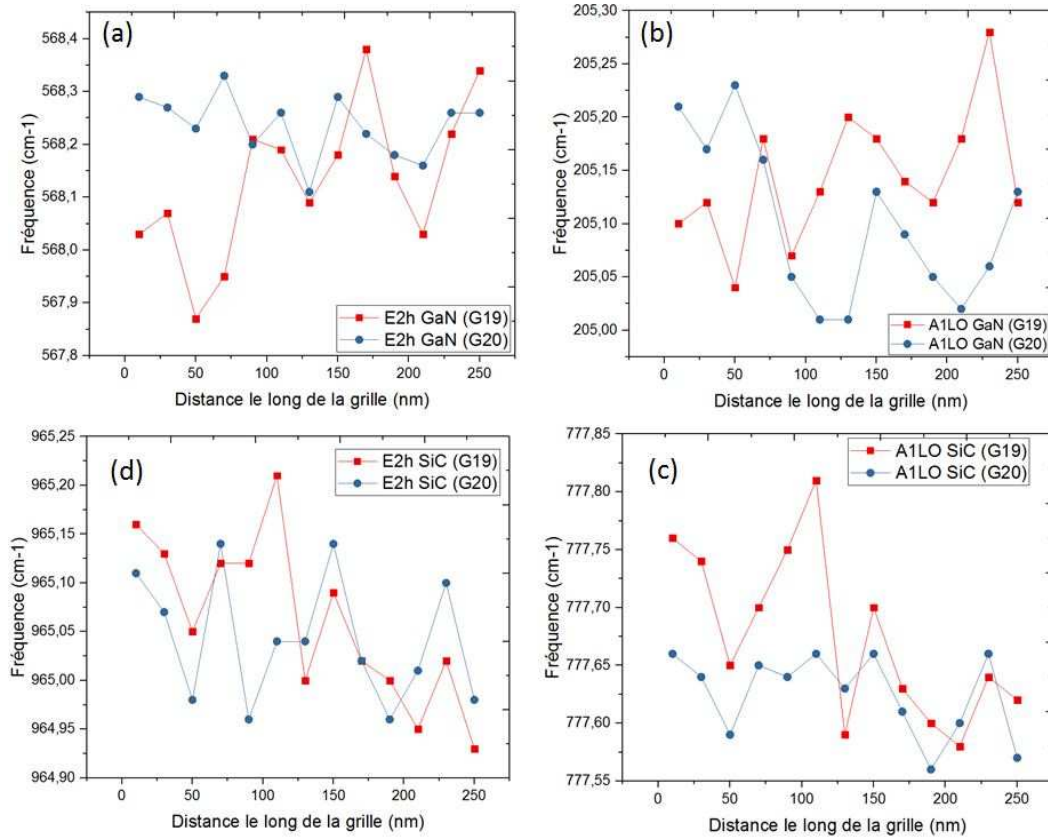


FIGURE 4.19: Variation du nombre d'onde du spectre Raman le long de la grille de deux doigts du transistor : (a) Variation du mode E2(high) du GaN. (b) Variation du mode A1(LO) du GaN. (c) Variation du mode A1(LO) du SiC. (d) Variation du mode SiC du SiC.

spectrale. L'analyse en PE spectrale est effectuée par le système développé et selon la méthodologie détaillée dans le chapitre 2. Comme le montre la figure 4.21, un des spots du composant de référence est diffracté par le réseau de diffraction et le spectre est extrait sur la droite de diffraction à partir de l'ordre 1. Le spectre indique une émission quasi monochromatique. Sur les composants de référence et stressé, la longueur d'onde mesurée était d'environ 930 nm (avec une erreur $e=0,62$ nm) (figure 4.22), ce qui correspond à un niveau d'énergie de 1,35 eV. Selon la littérature, cette énergie de niveau profond correspond soit à un défaut de carbone interstitiel qui se forme le long des dislocations [221], soit à un défaut omniprésent tel que C ou peut-être des dislocations [222].

Les spectres du composant de référence et du composant vieilli sont identiques (figure 4.22), ce qui prouve que les défauts aperçus sont natifs. En effet, les pièges responsables de l'électroluminescence sont supposés être des défauts natifs, présentés sous forme de dislocations, situées sous le milieu de la grille ou sous la grille du côté source. Les défauts dans les structures HEMTs AlGaN/GaN peuvent être classifiés en quatre catégories : des défauts natifs, des impuretés, des défauts étendus, et des défauts de surface. Rossetto

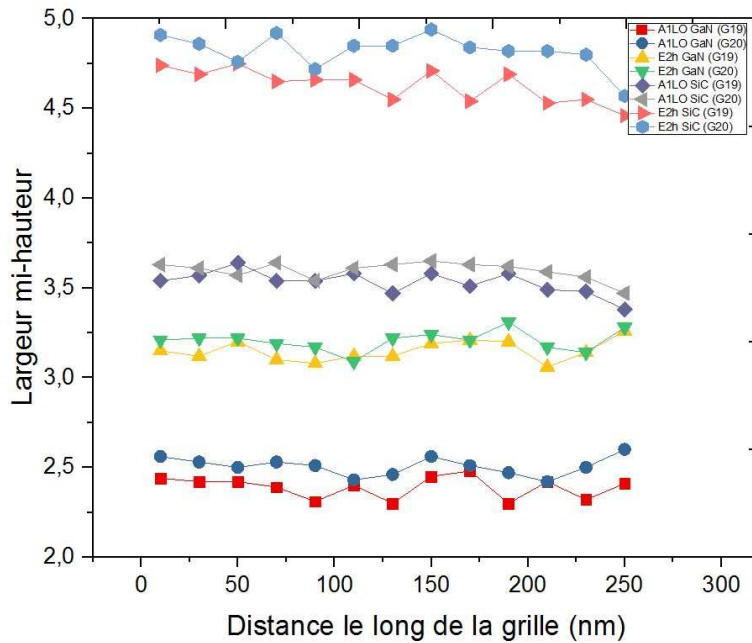


FIGURE 4.20: Variation de la largeur mi-hauteur du spectre Raman le long de la grille de deux doigts du transistor

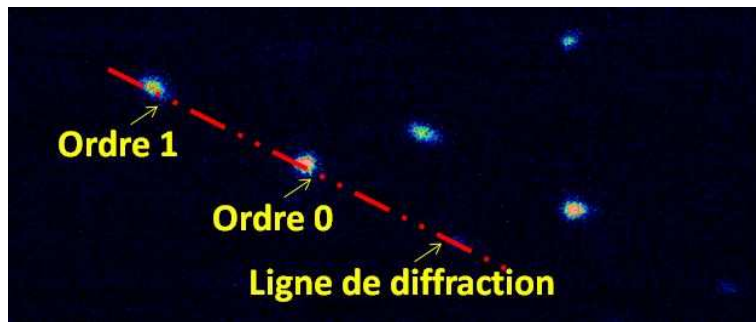


FIGURE 4.21: Diffraction d'un spot de PE d'un composant neuf

et al. ont récapitulé dans la figure 4.23 les principaux niveaux profonds associés à ces défauts. Ils ont rapporté les niveaux d'énergie autorisés dans la bande interdite du GaN, introduits par des défauts intrinsèques et des dislocations. L'énergie zéro correspond à la bordure supérieure de la bande de valence, la ligne noire épaisse au bord inférieur de la bande de conduction, les lignes bleues aux niveaux profonds identifiés avec une certitude acceptable, tandis que les niveaux rouges sont attribués provisoirement à leur cause spécifique [223].

En fait, Feng a montré que le substrat 4H-SiC peut présenter des défauts d'empilement natifs qui pourraient avoir un impact très négatif sur les performances des dispositifs SiC [224]. En utilisant la méthode de cartographie en photoluminescence, Feng a identifié trois types de défauts d'empilement avec trois longueurs d'onde différentes à 460nm, 480nm et 500nm.

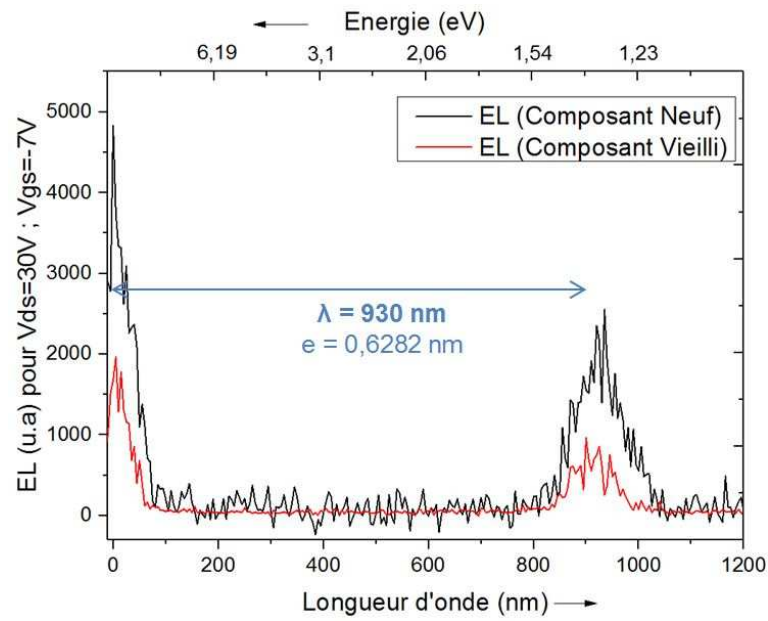


FIGURE 4.22: Comparaison du spectre d'émission des composant neuf et composant vieilli

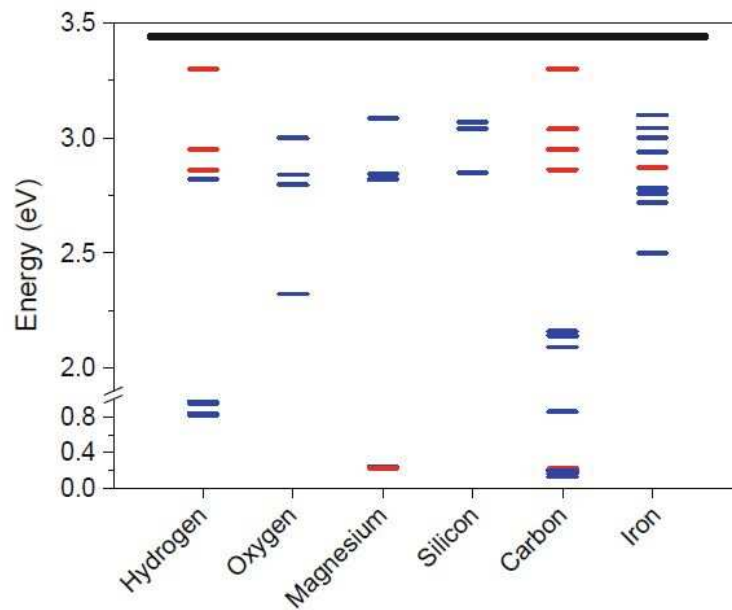


FIGURE 4.23: Les niveaux d'énergie autorisés à l'intérieur de la bande interdite du GaN causés par des défauts intrinsèques et des dislocations [223]

Pour valider nos hypothèses et faire la corrélation entre les spots de PE et les dislocations, il faut aller plus loin en réalisant une analyse micro-structurale sur le composant vieilli.

4.10 Analyse Micro-structurale

A la lumière des caractérisations électriques et des analyses en PE spectrale effectuées, nous avons mis en évidence la possibilité d'avoir une forte relation entre les signatures en PE et les dislocations. Afin de corrélérer les mesures électriques et les résultats en PE spectrale à l'analyse physique du transistor, une étape de préparation d'échantillon est indispensable.

4.10.1 Préparation d'échantillon

Afin d'observer la structure du transistor (les contacts, l'hétérojonction AlGaIn/GaN formant le canal 2DEG, et les couches de report sur le substrat SiC), et déterminer avec précision la cause de la dégradation, la zone d'intérêt sur le composant vieilli doit être repérée, pour y prélever un échantillon. Ce dernier doit avoir des dimensions particulières pour être traité et analysé par la suite au microscope électronique en transmission (MET).

Nous déterminons à travers la technique de PE la zone d'intérêt sur le composant vieilli. Un spot de PE est sélectionné et localisé pour extraire sur cette position de la puce un échantillon (Lame TEM1) servant de support à l'analyse physique de la structure intrinsèque du transistor (figure 4.24). Pour des raisons de comparaison, un deuxième échantillon (Lame TEM2) est extrait sur le même doigt du transistor, mais sur une zone qui ne réagit pas en PE (figure 4.24).

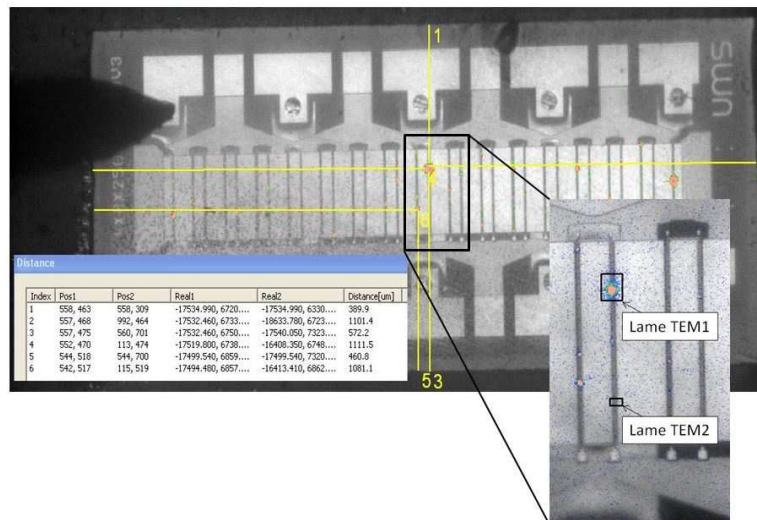


FIGURE 4.24: Position des deux lames : TEM1 (L1) sur le spot de PE et TEM2 (L2) sur un endroit où il n'y a pas de spot

Étant donné que la zone d'intérêt que l'on souhaite analyser au MET est située sur la face frontale du composant, et que ce dernier est ouvert en face arrière, il a fallu retourner

le composant et accéder à sa zone active de la face avant. Pour ce faire, le composant est soudé premièrement sur un stub métallique à la laque d'argent. Ensuite, il est trempé longtemps dans l'acétone afin de dégager la résine thermoplastique qui tenait la puce et qui masquait la face frontale (figure 4.25).

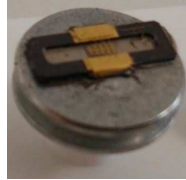


FIGURE 4.25: Récupération du composant en face avant

Puisque la zone active est masquée par le pond à air (en or), alors ce dernier est coupé par un usinage au FIB (pour Focused Ion Beam) et soulevé par une pointe au micro-manipulateur (figure 4.26-a). L'extraction de l'échantillon TEM est ensuite effectuée sur plusieurs étapes en utilisant le FIB (Focused Ion Beam : faisceau d'ions focalisé). Tout d'abord, grâce à un faisceau d'ion intense, le pourtour de l'échantillon est dégagé (figure 4.26-b) jusqu'à ce que la structure soit complètement révélée (figure 4.26-c). Ensuite, une pointe au rayon de courbure d'environ $2\mu\text{m}$ est soudée à une des extrémités de la lame grâce à la projection d'un mélange gazeux contenant du Platine ou du Tungstène. L'autre extrémité est ensuite tronçonnée et extraite de la structure générale pour être reportée et soudée sur une grille ad hoc (figure 4.26-d). Pour finir la préparation, l'échantillon est aminci afin de le transformer en une lame mince adaptée à l'analyse au microscope électronique en transmission (figure 4.27). En effet, l'analyse au TEM exige que la lame soit quasi transparente aux électrons. Ainsi, l'épaisseur brute d'environ $2\mu\text{m}$ est réduite à environ 40nm en utilisant des passages successifs au FIB à faible courant.

4.10.2 Observations au Microscope Électronique en Transmission

Le principe du microscope électronique en transmission (MET) repose sur l'utilisation d'un faisceau d'électrons transmis à travers un échantillon très mince. Après la traversée de l'échantillon, le faisceau frappe un écran phosphorescent ou un détecteur Si-CCD qui transforme l'image électronique en image optique. Ce mode d'imagerie permet également d'étudier la nature cristallographique de l'échantillon (traitement des images dans l'espace de Fourier (en diffraction)), ainsi que sa composition chimique (en mesurant le rayonnement X provoqué par le faisceau électronique).

Nos analyses en microscopie électronique en transmission sont effectuées sur le modèle ARM 200F de JEOL ayant une résolution en mode STEM (Scanning Transmission Electron Microscopy) pouvant atteindre $0,08\text{nm}$.

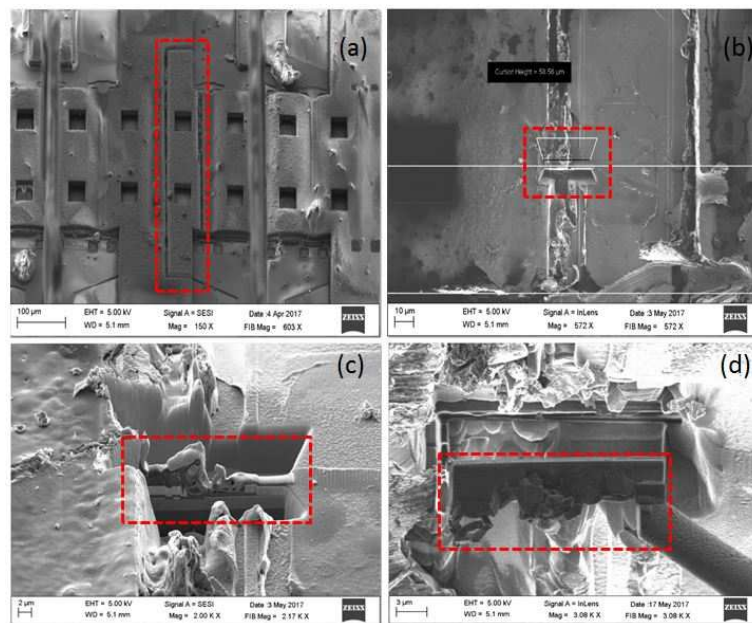


FIGURE 4.26: Préparation de la lame TEM (Usinage au FIB) : (a) Dégagement du pont au FIB par la face frontale.(b) : Dégagement du bord de l'échantillon. (c) Révélation de la structure (d) : Extraction de la lame TEM après l'avoir soudé sur une pointe

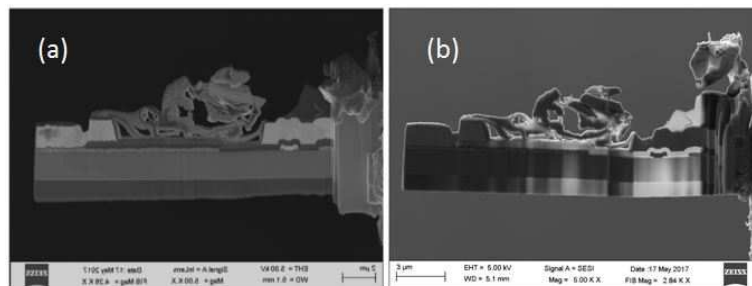


FIGURE 4.27: Amincissement de la lame TEM : (a) Avant amincissement. (b) Après l'amincissement à faible courant.

L'analyse en mode STEM-LAADF (Scanning Transmission Electron Microscopy - Low Angle Annular Dark Field) de l'échantillon TEM1 extrait sur le spot en PE (figure 4.28-a, b), révèle la présence de plusieurs dislocations débouchant du substrat et se propageant le long de la couche du GaN. Ces dislocations se situent sur différents sites. Nous observons à partir de l'image à fort grandissement en mode STEM-LAADF (Scanning Transmission Electron Microscopy - High Angle Annular Dark Field) la présence de deux dislocations juste en dessous du contact de la grille. L'image en mode TEM (figure 4.29) montre que ces dislocations dépassent le Gas 2DEG et montent jusqu'à la couche de l'AlGa_N. En revanche, l'analyse en STEM-LAADF du deuxième échantillon TEM2 (qui ne présente pas de spot en PE) montre l'absence des dislocations en dessous de la grille (figure 4.30). Ceci prouve que les dislocations traversant le gas 2DEG et se situant en dessous de la grille, sont à l'origine des spots de PE observés en électroluminescence en face arrière

(figure 4.31).

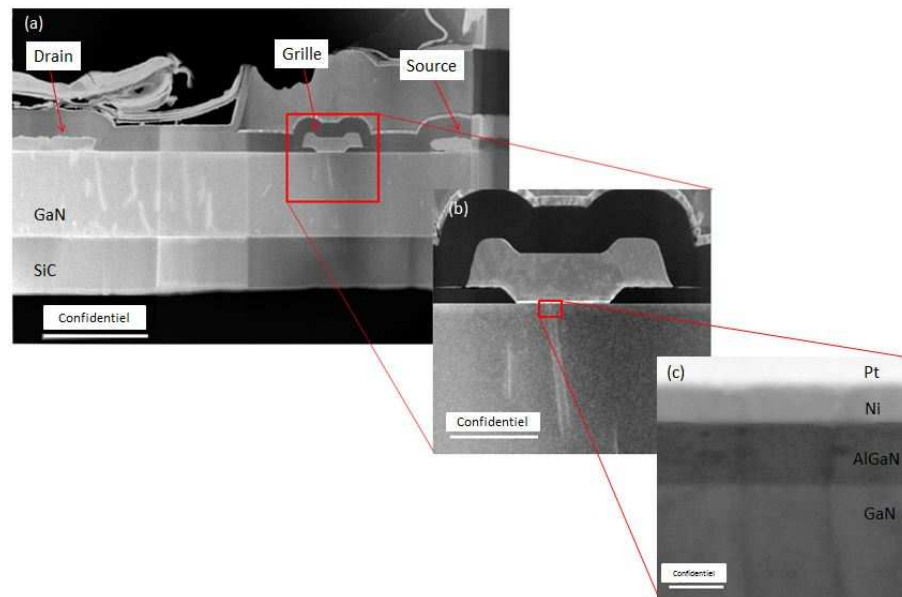


FIGURE 4.28: Lame TEM1 : (a) et (b) Vue en mode STEM-LAADF de l'échantillon, (c) Vue en mode STEM-HAADF de l'échantillon

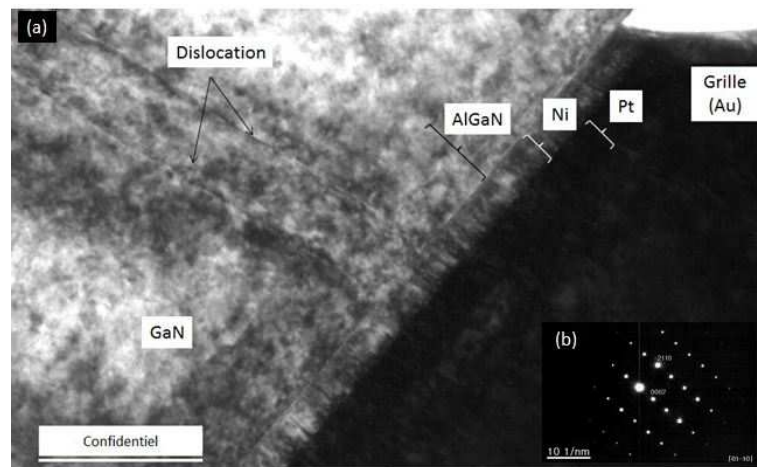


FIGURE 4.29: Lame TEM1 : (a) : Vue en TEM en champ clair (BF) en mode 2 ondes (avec la caméra Orius) des dislocations en dessous de la grille. (b) : L'échantillon est orienté selon l'axe de zone $[01-10]$ et nous avons pris le vecteur $g=[0002]$.

Pour dépister une éventuelle modification de la structure cristalline le long des dislocations de l'échantillon TEM1, une analyse comparative en EDX est effectuée sur deux points d'une ligne perpendiculaire aux dislocations, qui sont situées en dessous de la grille. Le premier point analysé se positionne sur la dislocation alors que le deuxième est situé sur la couche du GaN. La figure 4.33 montre un spectre identique sur les deux points analysés. Par conséquent, le spectre ne révèle aucun changement de structure au niveau de la dislocation, et les défauts interstitiels du carbone sont difficilement identifiés par cette analyse.

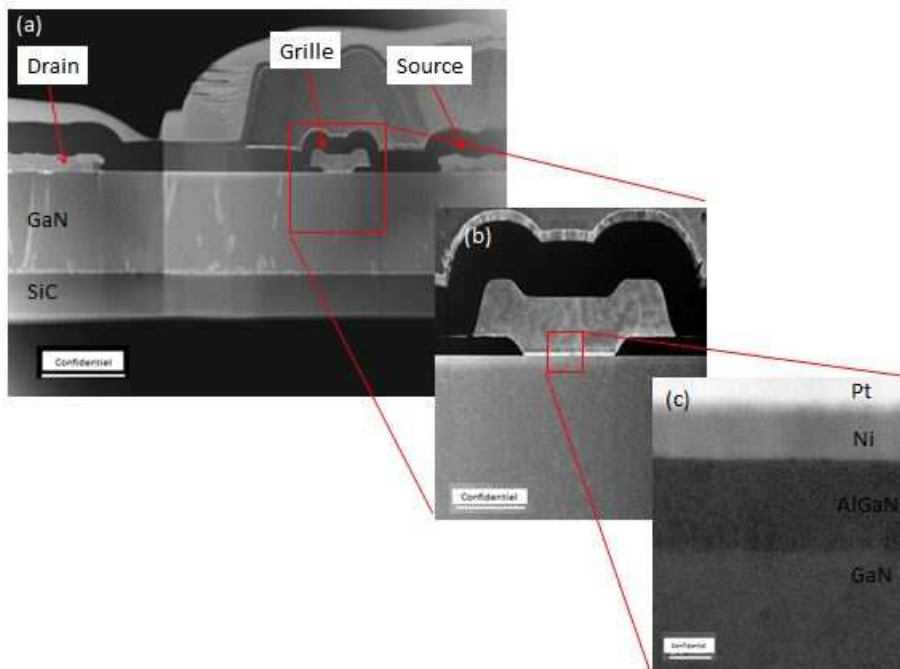


FIGURE 4.30: Lame TEM2 : (a) et (b) Vue en mode STEM-LAADF de l'échantillon, (c) Vue en mode STEM-HAADF de l'échantillon

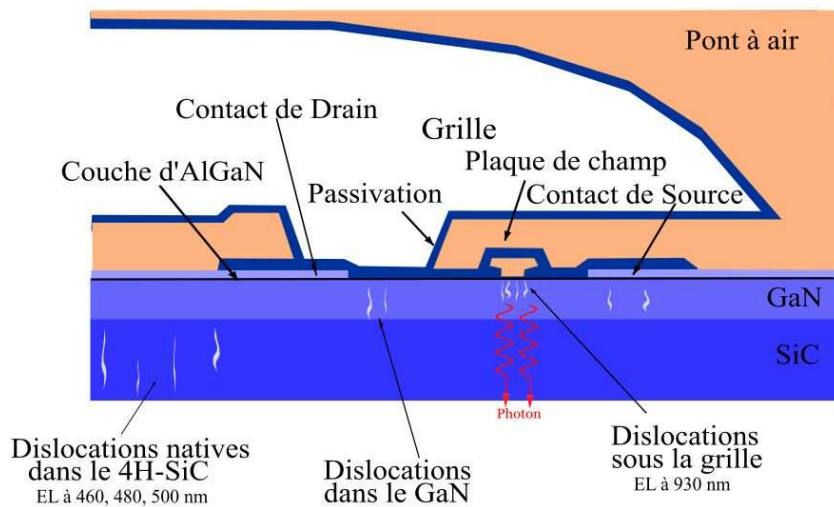


FIGURE 4.31: Électroluminescence d'un HEMT AlGa_N/Ga_N due à la présence des dislocations

Vers le milieu de la grille, une analyse EDX a été effectuée sur l'échantillon afin d'identifier la composition chimique du contact de la grille et évaluer son état après le vieillissement. La grille du transistor est composée d'un empilement Au/Pt/Ni/(Ga_N)/AlGa_N (figure 4.34). Vu sa faible épaisseur (2 nm d'épaisseur selon UMS), la couche de protection en Ga_N, appelée " cap " n'a pas pu être mise en évidence. Sur le coin de la grille, une autre analyse EDX est menée sur l'échantillon (figure 4.35). Elle révèle la diffusion de l'or sous le Nickel. En général, la couche de platine est utilisée afin d'éviter cette diffusion. Or ce

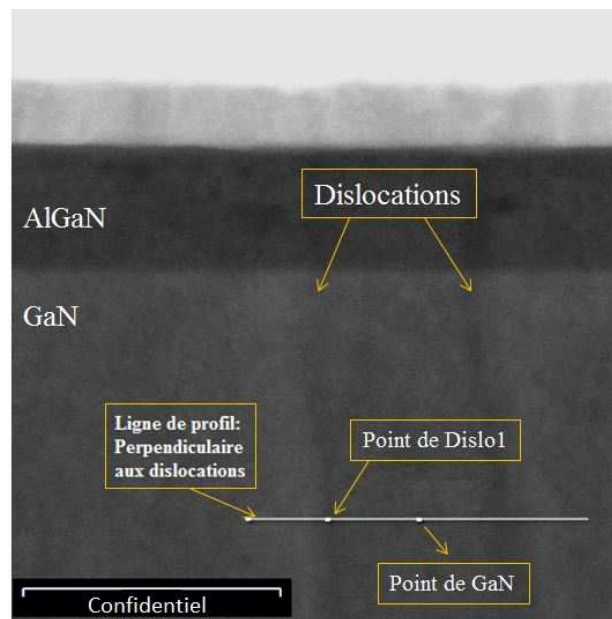


FIGURE 4.32: Ligne de profil EDS perpendiculaire aux dislocations

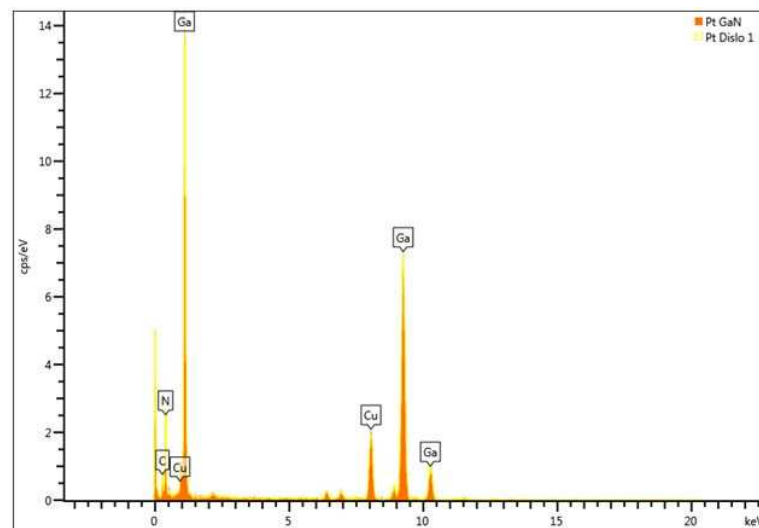


FIGURE 4.33: Analyse EDS des deux points

défaut de fabrication semble être présent sur les deux coins de la grille du composant. Par contre, ce défaut localisé ne semble pas avoir évolué puisqu'il est observé aussi sur l'échantillon neuf [99].

Les contacts ohmiques de drain et de source sont aussi évalués. Ils sont formés d'un empilement SiN/TiN/(AlPtAuNi)/AlNi/TiN (figures 4.36 et 4.37). Le contact est probablement formé par un recuit du mélange d'Aluminium, Platine, Nickel et Or. Ce recuit génère un état de surface non uniforme. Aucun crack ni anomalie locale ne sont observés. En général, l'état des contacts ohmiques ne semble pas être dégradé ni affecté par le stress HTOL.

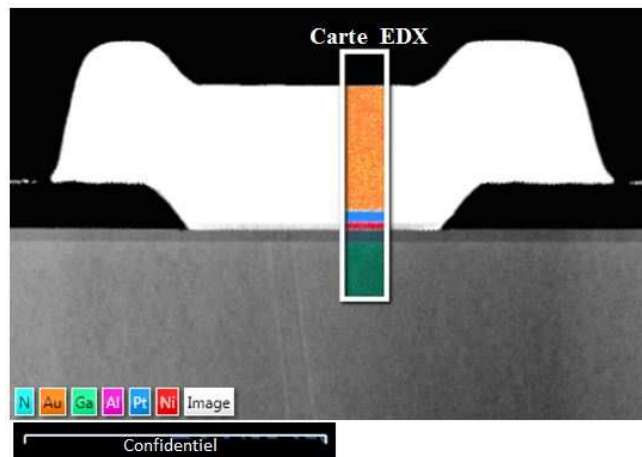


FIGURE 4.34: Cartographie EDX au milieu de la grille

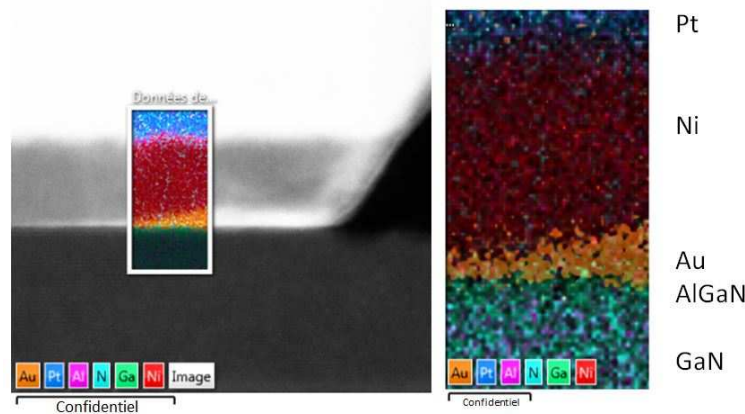


FIGURE 4.35: Cartographie EDX au coin de la grille

4.11 Conclusion du chapitre

Ce chapitre introduit les dispositifs HEMTs AlGa_N/Ga_N avec leur structure et leur principe de fonctionnement. Il met le point sur les faiblesses de cette technologie en présentant ces mécanismes de dégradation qui peuvent être classés en trois grandes catégories : des dégradations activées thermiquement (délamination de la passivation, stabilité du contact de grille, dégradation des contacts ohmiques), des dégradations activées par le fort champ électrique (effet piézoélectrique inverse, génération de pièges par les porteurs chauds), et des dégradations liées à la densité de courant (électromigration au niveau de la grille). Ensuite le chapitre présente un état de l'art sur l'électroluminescence dans les HEMTs AlGa_N/Ga_N en détaillant l'origine de l'émission de lumière dans ces structures qui est attribuée à des transitions intrabandes des électrons assistées par phonons ou à un rayonnement de freinage (Bremsstrahlung) ou à des recombinaisons sur les niveaux profonds. Par la suite, le chapitre présente une analyse de défaillance d'un HEMT AlGa_N/Ga_N du fondeur UMS par électroluminescence spectrale. Le composant est vieilli pendant 3500h

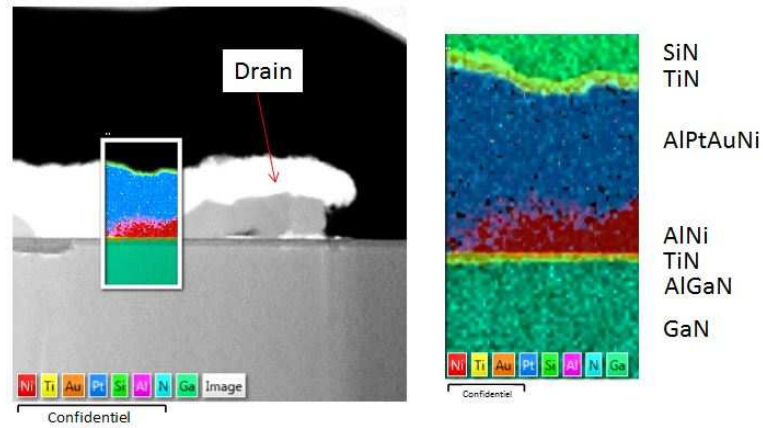


FIGURE 4.36: Cartographie EDX du contact de drain

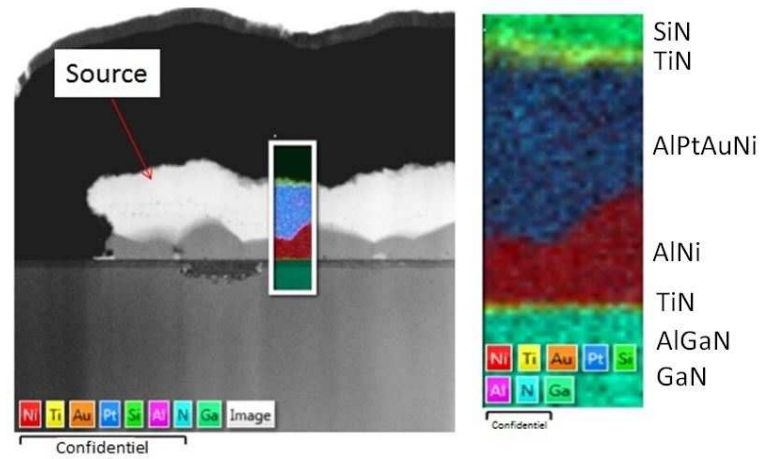


FIGURE 4.37: Cartographie EDX du contact de source

par un stress RF-HTOL qui a engendré une diminution du courant de fuite de grille et de la transconductance g_m . Une baisse de l'intensité du PE est aussi observée sur le dispositif dégradé. Deux nouveaux emplacements de points d'émission ont été identifiés par les analyses face arrière en PE : l'un sous le milieu de la grille et l'autre en dessous de la grille du côté source. Les analyses spectrales en électroluminescence confirment la similitude de la longueur d'onde des émissions d'un composant neuf de référence avec le composant dégradé. La signature spectrale des spots de PE correspond à un niveau d'énergie de 1,35 eV qui est lié, selon la littérature, à un défaut de carbone interstitiel qui se forme selon des dislocations [221], ou un défaut omniprésent tel que C ou peut-être des dislocations [222]. On soupçonne que ces spots de PE sont des défauts natifs dus aux désaccords de maille entre le 4H-SiC et le GaN. L'analyse micro-structurale effectuée sur l'endroit d'un spot de PE prouvent que ces défauts prennent la forme de dislocations où les atomes du carbone du substrat peuvent s'introduire (figure 4.31).

Ces dislocations peuvent être situées n'importe où sous la grille. La position du spot

luminescent nous donne donc la signature de l'emplacement de la dislocation. Après le stress HTOL, le courant de fuite de la grille diminue. Cette évolution est attribuée à une réduction de la densité de dislocations [225] mesurée par une réduction des spots d'émission de photons. Cette diminution de densité de dislocations est une conséquence de la réorganisation du cristal suite à un fonctionnement à haute température.

Conclusion générale et perspectives

Dans le domaine de la micro-électronique, une des étapes primordiales pour améliorer les performances et la qualité des composants est l'analyse de défaillance. Cette dernière vise à comprendre les mécanismes de défaillance, pour identifier la cause et remédier aux problèmes dans les procédés de fabrication et ainsi améliorer les performances du composant. Ce travail de recherche s'inscrit dans ce cadre. Il présente le développement d'une méthodologie d'analyse de défaillance rigoureuse qui consiste à exploiter l'approche spectrale de la technique de microscopie à émission de photons. Cette technique a fait ses preuves pour la localisation de différents types de défauts sur plusieurs technologies de composants électroniques. L'avantage principal de cette technique réside dans sa haute résolution et dans le fait qu'elle est semi-destructive. La technique peut être appliquée sur la face frontale du composant, ou parfois sur la face arrière lorsque la zone active est masquée en face avant. Le but de cette étude est d'étendre les capacités de cette technique et de ne pas seulement trouver la localisation du défauts mais aussi de remonter à la cause de la défaillance. Pour atteindre cet objectif un système spectral de photoémission est développé. Il est basé sur un réseau de diffraction ayant un pas de $10\mu m$ inséré dans la chemin optique d'un microscope à émission de photons. Le système est calibré en x (Pixel) et en y (Intensité de PE). L'étalonnage de l'axe des abscisses est effectué en illuminant une source ponctuelle par une diode multicolore dont le spectre est connu. Ceci nous a permis de trouver une relation linéaire entre la longueur d'onde et les pixels des images brutes capturées par le détecteur Si-CCD du microscope. Le deuxième étalonnage porte sur la correction de l'intensité de PE du spectre par la réponse spectrale du détecteur. Le processus d'extraction des spectres est automatisé par un logiciel de traitement d'image développé pour améliorer la précision de traitement et éviter les erreurs de manipulation d'un opérateur. L'analyse des spectres est conduite ensuite par une interface informatique développée pour identifier les composantes gaussiennes du spectre selon un traitement qui fait appel à l'algorithme de Levenberg Marquardt. Le système spectral de photoémission est validé et utilisé dans l'étude de la fiabilité de deux technologies grand gap : les MOSFETs SiC et les HEMTs AlGaIn/GaN.

Malgré les propriétés physiques prometteuses du SiC et du GaN, les performances de ces deux technologies ne sont toujours pas assurées avec certitude compte tenu des différents mécanismes de défaillance observés jusqu'à maintenant sur des applications à forte tension et à forte température. Ainsi, la fiabilité de ces deux technologies reste un champ suscitant un grand intérêt. Une étude d'analyse de défaillance a été menée sur ces deux technologies en considérant l'aspect spectral qui a permis de définir la signature propre du défaut, et d'identifier le mécanisme de défaillance. Trois cas d'études sont présentés dans ce manuscrit : deux cas des MOSFETs SiC dans le chapitre 3, et d'un cas sur les HEMTs AlGaIn/GaN dans le chapitre 4.

La caractérisation initiale en PE des MOSFETs SiC étudiés (du fondeur Cree) montre que l'émission de lumière dans ces composants s'avère être d'origine de la luminescence de la jonction PN lorsqu'elle est polarisée en direct. Ceci a été suspecté au début par la forme de goutte de la signature de PE, et a été montré par la suite par des analyses en PE en coupe. La lumière générée par la jonction PN peut arriver à l'oxyde de grille par fuite du champ évanescent, et être guidée dans la couche d'inter-métal diélectrique entre les deux métaux de grille et de source. La réponse spectrale de cette luminescence est située dans le visible avec un spectre centré sur $\lambda = 550nm$ et une largeur à mi-hauteur de $\Delta\lambda = 200nm$. Une forte liaison entre les paramètres de polarisation (fort champ ou fort courant) et la distribution en EL des MOSFETs est révélée. Une relation linéaire entre l'EL et la tension de grille est constatée.

Le premier cas d'étude porte sur la robustesse de ces MOSFETs SiC vis-à-vis des décharges électrostatiques. Les tirs ESD sont appliqués sur la grille en gardant les contacts de drain et de source dans l'air. Par conséquent, l'ensemble du composant peut remonter en tension à plusieurs kilo volts. Ceci peut engendrer des dégradations non seulement au niveau de la grille et de son oxyde, mais aussi au niveau de la jonction PN. En effet les résultats du test ESD corrélés à des analyses en PEM spectrale montre que la réponse des MOSFETs SiC aux décharges électrostatiques est hétérogène. Selon la tension de la décharge appliquée, la défaillance observée semble être liée soit à une défaillance de la jonction PN (décharge à 8kV), ou à une dégradation de l'oxyde de grille (décharge à 6kV).

Le deuxième cas d'étude vise à évaluer l'impact de la température sur les MOSFETs SiC. Un vieillissement HTRB et HTGB en palier de température a été appliqué au début. Ce " step stress " a induit une dégradation non-uniforme des caractéristiques électriques. L'analyse en PEM spectrale d'un des composants stressés en HTRB, en complément à des caractérisations électriques, conclut à une dégradation de la jonction PN par la présence de dislocations dans le 4H-SiC, ce qui explique l'augmentation du courant de fuite du drain. Vu l'hétérogénéité et la dispersion importante des résultats du " step stress

" HTRB et HTGB obtenues, il a été jugé plus intéressant de remplacer les stress à palier de température par des essais à température constante. Un test HTRB à température constante de 150°C avec une tension 1100V inférieure à la tension nominale (1200V), a montré que ces composants ne respectent pas complètement la datasheet constructeur car au bout de 24 h de fonctionnement ils ont présenté des dégradations significatives. L'analyse en PEM spectrale montre suite à ce court stress une dégradation de la jonction PN qui se traduit par un phénomène de piégeage de charges induisant une baisse de la tension de seuil et de la capacité grille-source.

Le troisième cas d'étude porte sur un HEMTs AlGa_{0.2}N/GaN du fondeur UMS. Un stress RF-HTOL pendant 3500h a induit une diminution du courant de fuite de grille, de la transconductance g_m , et une baisse de l'intensité du PE. L'étude en EL a permis la localisation de deux nouveaux emplacements de points d'émission : un sous le milieu de la grille et l'autre sous la grille du côté source. La signature spectrale en électroluminescence du composant dégradé s'avère être similaire à celle d'un composant neuf de référence identique. Elle correspond à un niveau d'énergie de 1,35 eV qui est lié selon la littérature, à un défaut de carbone interstitiel qui se forme le long des dislocations [221], ou un défaut omniprésent tel que C ou peut-être des dislocations [222]. Ces spots de PE sont probablement des défauts natifs dus aux désaccords de maille entre le 4H-SiC et le GaN. L'analyse micro-structurale effectuée sur l'endroit d'un spot de PE prouvent que ces défauts prennent la forme de dislocations où les atomes du carbone du substrat sont susceptibles de s'introduire. Ces dislocations peuvent être situées n'importe où sous la grille. Elles sont corrélés aux émissions de lumière observées. Un spot en PE est donc une signature de l'emplacement de la dislocation. Suite au stress HTOL, le courant de fuite de la grille a diminué. Cette dérive est due à une réduction de la densité de dislocations [225] mesurée par une réduction des spots d'émission de photons. Cette diminution de densité de dislocations est le résultat de la réorganisation du cristal suite à un fonctionnement à haute température.

Les perspectives de ces travaux sont nombreuses et en fonction des différents thèmes abordés. Sur l'analyse de l'électroluminescence des MOSFETs SiC, l'hypothèse du guidage pourrait être confirmé en utilisant l'analyse polarimétrique qui consiste à identifier si la lumière émise par le composant est polarisée ou pas. Si c'est le cas, alors nous pourrions affirmer que la lumière est guidée. Suite au stress HTRB sur les MOSFETs SiC, la dégradation a été attribuée à des dislocations. Cette hypothèse peut être vérifiée à travers des analyses micro-structurales approfondies. L'étude effectuée sur les HEMTs peut aussi être complétée en corrélant le nombre de spots avec le nombre des dislocations en calculant la densité des dislocations (TDD : Threding dislocation density) par d'autres techniques comme l'AFM et l'EBIC [30], [31], [32]. De plus, en changeant le détecteur du microscope, nous pouvons étendre notre analyse en EL à l'infrarouge et

aller chercher les pièges à faible énergie. Il sera intéressant aussi de chercher la relation entre les énergies relevées des bruits basse fréquence et celle relevées en PE. Enfin, cette technique de photoémission spectrale, pourra s'étendre à l'étude d'autres technologies de composants avec différents profils de mission pour créer une table de correspondance en longueur d'onde des différents mécanismes de dégradation.

Publications relatives à ce travail

1 Articles de revue

- N. Moulitif, A. Divay, E. Joubert, O. Latry, “ Localizing and analyzing defects in AlGa_N/Ga_N HEMT using photon emission spectral signatures ”, Engineering Failure Analysis, Volume 81, Pages 69-78, ISSN 1350-6307, 2017.
- N. Moulitif, E. Joubert, M. Masmoudi, O. Latry, “ Characterization of HTRB stress effects on SiC MOSFETs using photon emission spectral signatures ”, Microelectronics Reliability, 2017.
- N. Moulitif, E. Joubert, and O. Latry. Reliability Study of Mechatronic Power Components Using Spectral Photon Emission Microscopy. Advanced Electromagnetics, 5(3) :20-24, 2016.

2 Chapitres d’ouvrage

- N. Moulitif, M. Masmoudi, E. Joubert, O. Latry, Chapter 5 : “ Reliability and qualification tests of Power MOSFETs ”, Reliability of High-Power Mechatronic Systems 2, 1st Edition, ISTE Press - Elsevier, ISBN : 9781785482618. 2017.
- N. Moulitif, Alexis Divay, E. Joubert, O. Latry, Chapter 8 : “ Failure analysis by spectral photon emission microscopy ”, Reliability of High-Power Mechatronic Systems 2, 1st Edition, ISTE Press - Elsevier, ISBN : 9781785482618. 2017.

3 Conférences internationales avec Actes et Comité de Lecture

- N. Moultif, E. Joubert, M. Masmoudi, O. Latry, “ Characterization of HTRB stress effects on SiC MOSFETs using photon emission spectral signatures ”, ESREF2017, Bordeaux, (28-30 Septembre), 2017.
- N. Moultif, E. Joubert, M. Masmoudi, O. Latry, “ Characterization of ESD Stress Effects on SiC MOSFETs Using Photon Emission Spectral Signatures ”, 2017 Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), Orlando, FL, USA (23-26 Janvier), 2017, pp. 1-7. doi : 10.1109/RAM.2017.7889732.
- N. Moultif, E. Joubert, O. Latry, “ Reliability study of mechatronic power components using spectral photon emission microscopy ” , Invited speaker, Proceeding of the AES 2016, the 4th Advanced Electromagnetics Symposium, 26-28 Juillet 2016.

4 Autres Conférences

- T.A. Nguyen, A. Echeverri, S. Mbarek, N. Moultif, P.Dherbecourt, O. Latry, E. Joubert “ Analyse par électroluminescence des dégradations des transistors MOSFET-SiC”, Electrical Engineering Symposium (SGE 2016) : EF-EPF-MGE 2016, 7-9 Juin 2016, Grenoble, FRANCE.
- N. Moultif, O. Latry, E. Joubert, “ Étude de la fiabilité des composants mécatronique de puissance par l’analyse spectrale de la photoémission” - Poster dans la journée des doctorants (JDD) (JDD), 16 Juin, 2015.
- N. Moultif, O. Latry, E. Joubert, “ Analyse spectrale de la photoémission ”, Article P06 à la conférence Internationale TELECOM’2015 & 9ème JFMMA in Meknès- Maroc. 13-15 Mai, 2015.
- N. Moultif, O. Latry, E. Joubert, “ Étude de la fiabilité des composants électroniques de puissance par l’analyse spectrale en microscopie à émission de photons ”. Poster dans la journée ISP3D, (Integration and 3D Power Systems) à Tour, 30-31 Mars, 2015.

Bibliographie

- [1] Christopher L. Henderson. *Education and Training for the Analyst : FA Operation and Management*, chapter 17, pages 718–722. ASM International, Ohio, 2014.
- [2] M. Bouya. *Etude des mécanismes de défaillances et de transport dans les structures HEMTs AlGa_N/Ga_N*. PhD thesis, Université Bordeaux 1, 2010.
- [3] Rémy Ouaida. *Aging and mechanisms on SiC power component for high temperature applications*. Theses, Université Claude Bernard - Lyon I, October 2014.
- [4] S. A. Vitusevich, N. Klein, A. E. Belyaev, S. V. Danylyuk, M. V. Petrychuk, R. V. Konakova, A. M. Kurakin, A. E. Rengevich, Avksentyev, B. A. Danilchenko, V. Tilak, J. Smart, A. Vertiatchikh, and L. F. Eastman. Effects of γ -irradiation on AlGa_N/Ga_N-based HEMTs. *phys. stat. sol. (a)*, 195(1) :101–105, January 2003.
- [5] O. Aktas, A. Kuliev, V. Kumar, R. Schwindt, S. Toshkov, D. Costescu, J. Stubbins, and I. Adesida. 60 Co gamma radiation effects on DC, RF, and pulsed I–V characteristics of AlGa_N/Ga_N HEMTs. *Solid-State Electronics*, 48(3) :471–475, March 2004.
- [6] Christophe Raynaud, Dominique Tournier, Hervé Morel, and Dominique Planson. Comparison of high voltage and high temperature performances of wide band-gap semiconductors for vertical power devices. *Diamond and Related Materials*, 19(1) :1–6, January 2010.
- [7] A. Aubert. *Analyse de défaillance de nouvelles technologies microélectroniques : nouvelles approches dans la méthodologie de préparation d'échantillon*. PhD thesis, Université Bordeaux 1, 2014.

- [8] Verguin D. Pascale. *Industrialisation d'une méthode de localisation de défauts sur circuits intégrés par cristaux liquides*. PhD thesis, Institut national polytechnique de Grenoble, Grenoble, 1994.
- [9] C. K. Lau and K. S. Sim. Characterization of emission microscopy and liquid crystal thermography in IC fault localization. In *AIP Conference*, volume 1528, page 231. American Institute of Physics, 2013.
- [10] M. Sienkiewicz. *Méthodologie de localisation des défauts soft dans les circuits intégrés mixtes et analogiques par stimulation par faisceau laser : Analyse de résultats des techniques dynamiques paramétriques*. PhD thesis, Université Bordeaux 1, 2010.
- [11] T. M. Hoe, S. Y. Tan, and K. K. Ng. Factors that affect hotspot localization in Infrared Lock-in Thermography. In *the 20th IEEE International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA)*, pages 341–346, 2013.
- [12] Specifications of Thermal Emission Microscope "Themos-mini" Hamamatsu equipment, 2007.
- [13] Delvallée Alexandra. *Métrie dimensionnelle de nanoparticules mesurées par AFM et par MEB*. PhD thesis, L'ENSTA - PARIS TECH, 2014.
- [14] Zhong-lin Wang. *Elastic and Inelastic Scattering in Electron Diffraction and Imaging*. Springer Science, 1995.
- [15] M. Remmach. *Analyse de défaillance des circuits intégrés par émission de lumière dynamique : Développement et optimisation d'un système expérimental*. PhD thesis, Université Bordeaux 1, 2009.
- [16] Iveland, Justin, Martinelli, Lucio, Peretti, Jacques, Speck, S. James, Weisbuch, and Claude. Direct Measurement of Auger Electrons Emitted from a Semiconductor Light-Emitting Diode under Electrical Injection : Identification of the Dominant Mechanism for Efficiency Droop. *Physical Review Letters*, 110(17) :177406–177411, April 2013.
- [17] S. Achour. Effects of surface treatments on cathodoluminescence from CdS and GaAs. *Philosophical Magazine Letters*, 59(4) :205–211, April 1989.
- [18] J. Christen, M. Grundmann, and D. Bimberg. Scanning cathodoluminescence microscopy : A unique approach to atomic scale characterization of heterointerfaces

- and imaging of semiconductor inhomogeneities. *Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics : Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*, 9(4) :2358+, 1991.
- [19] E. I. Cole and R. E. Anderson. Rapid localization of IC open conductors using charge-induced voltage alteration (CIVA). In *30th Annual Proceedings Reliability Physics*, pages 288–298, 1992.
- [20] *Use of the charge-induced voltage alteration technique to analyze precursors to dielectric breakdown*, volume 1802, 1993.
- [21] Edward I. Cole. Electron and optical beam testing of integrated circuits using CIVA, LIVA, and LECIVA. *Microelectronic Engineering*, 31(1-4) :13–24, February 1996.
- [22] Massaoud Bissar. Modélisation du signal EBIC : Effet du choix de la fonction de génération. Master’s thesis, Université de constantine, 2007.
- [23] A. Yadav. *Impact of gamma irradiation on the characteristics of III-N/GaN Based high electron mobility transistors*. PhD thesis, University of Central Florida, Summer Term 2016.
- [24] H. Hamad. *Détermination des coefficients d’ionisation de matériaux à grand gap par génération multi-photonique*. PhD thesis, L’institut National des Sciences Appliquées INSA-Lyon, 2015.
- [25] H. J. Leamy. Charge collection scanning electron microscopy. *Journal of Applied Physics*, 53(6), 1982.
- [26] D. Cavalcoli, A. Cavallini, and A. Castaldini. Determination of minority carrier diffusion length by integral properties of electron beam induced current profiles. *Journal of Applied Physics*, 70(4) :2163–2168, 1991.
- [27] Stephan Kleindiek, Klaus Schock, Andreas Rummel, Michael Zschornack, Pascal Limbecker, Andreas Meyer, and Matthias Kemmler. Current imaging, EBIC/E-BAC, and electrical probing combined for fast and reliable in situ electrical fault isolation. *Microelectronics Reliability*, 64 :313–316, September 2016.
- [28] D. S. H. Chan, V. K. S. Ong, and J. C. H. Phang. A direct method for the extraction of diffusion length and surface recombination velocity from an EBIC

- line scan : planar junction configuration. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 42(5), May 1995.
- [29] Leonid Chernyak, Andrei Osinsky, Henryk Temkin, J. W. Yang, Q. Chen, and M. Asif Khan. Electron beam induced current measurements of minority carrier diffusion length in gallium nitride. *Applied Physics Letters*, 69(17) :2531–2533, 1996.
- [30] E. B. Yakimov. Electron-beam-induced-current study of defects in GaN; experiments and simulation. *Journal of Physics : Condensed Matter*, 14(48) :13069+, 2002.
- [31] Grigore Moldovan, Payam Kazemian, Paul R. Edwards, Vincent K. S. Ong, Oka Kurniawan, and Colin J. Humphreys. Low-voltage cross-sectional EBIC for characterisation of GaN-based light emitting devices. *Ultramicroscopy*, 107(4-5) :382–389, April 2007.
- [32] Aaron R. Arehart. *Investigation of electrically active defects in GaN, AlGaIn, and AlGaIn/GaN high electron mobility transistors*. PhD thesis, The Ohio state university, 2009.
- [33] Shi-Qiu Zhu, E. I. Rau, and Fu-Hua Yang. A novel method of determining semiconductor parameters in EBIC and SEBIV modes of SEM. *Semiconductor Science and Technology*, 18(4) :361+, 2003.
- [34] O. Lopatiuk-Tirpak, L. Chernyak, F. X. Xiu, and J. L. Liu. Studies of minority carrier diffusion length increase in p-type ZnO :Sb : *Journal of Applied Physics* : Vol 100, No 8. *Journal of Applied Physics*, 100(8) :086101+, 2006.
- [35] Jonathan D. Poplawsky, Chen Li, Naba R. Paudel, Wei Guo, Yanfa Yan, and Stephen J. Pennycook. Nanoscale doping profiles within CdTe grain boundaries and at the CdS/CdTe interface revealed by atom probe tomography and STEM EBIC. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 150 :95–101, June 2016.
- [36] Myung-Geun Han, Joseph A. Garlow, Matthew S. J. Marshall, Amanda L. Tiano, Stanislaus S. Wong, Sang-Wook Cheong, Frederick J. Walker, Charles H. Ahn, and Yimei Zhu. Electron-beam-induced-current and active secondary-electron voltage-contrast with aberration-corrected electron probes. *Ultramicroscopy*, 177 :14–19, June 2017.

- [37] S. Wei, S. Lim, M. Zulkifli, Syahirah, and D. Khatri. Optimization and application of Electron Beam Absorbed Current technique. In *International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits*, pages 250–254, 2015.
- [38] L. Chang, K. Y. Wang, S. T. C. Wang, and Y. P. Chang. The investigation of Active VC and EBAC analysis utilization on test structure. In *IEEE 22nd International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits*, pages 205–208, 2015.
- [39] K. Mizukoshi, T. Oyamada, A. Shimase, Y. Matsumoto, S. Yorisaki, and T. Majima. Fault location using electron beam current absorbed in LSI interconnects, 2004.
- [40] P. K. Tan. Nanoprobing EBAC technique to reveal the failure root cause of gate oxide reliability issues of an IC process. In *2014 IEEE International Integrated Reliability Workshop Final Report (IIRW)*, pages 10–15, 2014.
- [41] Wen P. Lin and Hsiu J. Chang. Physical failure analysis cases by Electron Beam Absorbed Current & Electron Beam Induced Current detection on nano-probing SEM system. In *17th IEEE International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits*, pages 1–4, 2010.
- [42] S. J. Cho. Logic Failure Analysis 65/45nm Device using RCI & Nano Scale Probe. In *2009 16th IEEE International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA 2009)*, pages 50–54, 2009.
- [43] P. Larry, H. Tupin, C. Chareles, R. H. Newton, and A. Reverdy. Precise Localization of 28nm Via Chain Resistive Defect Using EBAC and Nano-probing. In *38th International Symposium for Testing and Failure*, pages 67–70, November 2012.
- [44] M. Simon-Najasek, J. Jatzkowski, C. Crobe, and F. Altmann. A new Technique for non-invasive Short - Localisation in Thin Dielectric Layer by Electron Beam Absorbed Current (EBAC) Imaging. In *38th International Symposium for Testing and Failure*, pages 61–66, November 2012.
- [45] E. Ziegler and H. P. Feuerbaum. IC testing using optical beam induced currents generated by a laser scan microscope. *Microelectronic Engineering*, 7(2-4) :309–316, jan 1987.

- [46] M. Boostandoost. *Signature of Photon Emission and Laser Stimulation for Failure Analysis of Semiconductor Devices with respect to Thin-Film Solar Cells*. PhD thesis, Université Technique de Berlin, 2013.
- [47] R. A. Falk. Advanced LIVA/TIVA Techniques. In *ISTFATM, Conference Proceedings from the 27th International Symposium for Testing and Failure Analysis*, pages 59–65, 2001.
- [48] V. K. Ravikumar. Understanding testing for dynamic fault isolation of microprocessors. In *2016 IEEE 23rd International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA)*, pages 17–21, 2016.
- [49] P. Perdu. Fault localization by Dynamic Laser Stimulation extended testing. In *16th IEEE International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits*, pages 182–190, 2009.
- [50] M. Rutkauskas, C. Farrell, C. Dorrer, K. L. Marshall, T. Crawford, T. R. Lundquist, P. Vedagarbha, K. Erington, D. Bodoh, and D. T. Reid. Two-photon laser-assisted device alteration in CMOS integrated circuits using linearly, circularly and radially polarized light. *Microelectronics Reliability*, 60 :62–66, May 2016.
- [51] F. L. Sheng, R. S. S. Mun, and D. T. K. Teck. Laser Assisted Device Alteration (LADA) for fault isolation and quick design fix in marginality failure. In *2015 IEEE 22nd International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits*,, pages 9–12, 2015.
- [52] Kristopher D. Staller and Corey Goodrich. Test Circuit Conditioning for soft defect localization. In *ISTFA, 40th international Symposium for testing and failure analysis*, November 2014.
- [53] Chunlei Wu and Suying Yao. A dynamic synchronization method to realize soft defect localization applied on digital and mixed-mode analog ICs in failure analysis. *Microelectronics Reliability*, 54(5) :993–999, May 2014.
- [54] E. I. Cole. Resistive interconnection localization. In *the 9th International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits*, pages 15–21, 2002.

- [55] F. Beaudoin, R. Desplats, P. Perdu, A. Firiti, and A. Haller. Laser stimulation applied to dynamic IC diagnostics. In *International Symposium For Testing and Failure Analysis*, pages 371–377, 2003.
- [56] R. A. Falk. New Application of Thermal Laser Signal Injection Microscopy (TL-SIM). In *ISTFA*, pages 25–35, 2003.
- [57] K. Sanchez. Delay variation mapping induced by dynamic laser stimulation. In *2005 IEEE International Reliability Physics Symposium*, pages 305–311, 2005.
- [58] K. Sanchez, P. Perdu, and F. Beaudoin. Phase Variation Mapping, a Dynamic Laser Stimulation Technique with Picosecond Timing Resolution. In *2007 IEEE International Reliability Physics Symposium, 45th Annual*, pages 534–541, 2007.
- [59] D. E. Sawyer and D. W. Berning. Semiconductor measurement technology : A laser scanner for semiconductor devices. *U.S. Government Printing Office*, pages 72+, February 1977.
- [60] K. C. Stevens and T. J. Wilson. Locating IC defects process monitors and test structures using optical beam induced current Parameter identification for semiconductor diodes by LBIC imaging. *Microelectronic Engineering*, 12 :397–404, 1990.
- [61] Markus Finkeldey, Lena Göring, Falk Schellenberg, Carsten Brenner, Nils C. Gerhardt, and Martin Hofmann. Multimodal backside imaging of a microcontroller using confocal laser scanning and optical-beam-induced current imaging. volume 10110, pages 101101F–101101F–7, 2017.
- [62] Faleh Altal and Jun Gaoa. High resolution scanning optical imaging of a frozen polymer p-n junction. *Journal of Applied Physics*, 120(11) :115501+, 2016.
- [63] D. Lewis. Backside laser testing of ICs for SET sensitivity evaluation Document. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 48(6) :2193–2201, December 2001.
- [64] Hassan Hamad, Christophe Raynaud, Pascal Bevilacqua, Sigo Scharnholz, Bertrand Vergne, and Dominique Planson. Determination of 4H-SiC Ionization Rates Using OBIC Based on Two-Photon Absorption. *Materials Science Forum*, 858 :245 – 248, May 2016.

- [65] T. Flohr and R. Helbig. Determination of minority-carrier lifetime and surface recombination velocity by optical-beam-induced-current measurements at different light wavelengths. *Journal of Applied Physics*, 66(7) :3060–3065, 1989.
- [66] J. Bajaj and W. E. Tennant. Remote contact LBIC imaging of defects in semiconductors. *Journal of Crystal Growth*, 103(1-4) :170–178, June 1990.
- [67] Stavros Busenberg, Weifu Fang, and Kazufumi Ito. Modeling and Analysis of Laser-Beam-Induced Current Images in Semiconductors. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 53(1) :187–204, February 1993.
- [68] Kazufumi I. Weifu Fang. Parameter Identification for Semiconductor Diodes by LBIC Imaging. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 62(6) :2149–2174, August 2002.
- [69] E. I. Cole. Novel Failure Analysis Techniques Using Photon Probing With a Scanning Optical Microscope. In *the International Reliability Physics Symposium, IEEE*, pages 388–398, 1994.
- [70] B. B. Yang, J. L. Cruz-Campa, G. S. Haase, E. I. Cole, P. Tangyunyong, M. Okandan, and G. N. Nielson. Comparison of Beam-Based Failure Analysis Techniques for Microsystems- Enabled Photovoltaics. In *the 39 th International Symposium for Testing and Failure Analysis*, volume 7, pages 369–375, 2013.
- [71] K. Nikawa and S. Tozaki. Novel OBIC Observation Method for Detecting Defects in Al Stripes Under Current Stressing. In *the 19th International Symposium for Testing and Failure Analysis*, pages 303–310, 1993.
- [72] F. Beaudoin and P. Jacob. OBIRCH – Monitoring as a Reliability-Failure-Analysis and Screening Tool. In *27th International Symposium for Testing and Failure Analysis*, pages 397–403, 2001.
- [73] J. Roux. presentation HAMAMATSU. In *ECPE Workshop*, October 2014.
- [74] E. I. Cole, P. Tangyunyong, and D. L. Barton. Backside Localization of Open and Shorted IC Interconnections,. In *the 36th IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS)*, pages 129–136, 1998.
- [75] D. L. Barton, K. Bernhard-Höfer, and E. I. Cole. FLIP-chip and ” backside” techniques. *Microelectronics Reliability*, 39(6-7) :721–730, June 1999.

- [76] K. Nikawa and S. Inoue. New Capabilities of OBIRCH Method for Fault Localization and Defect Detection. In *Proceedings of 6th Asian Test Symposium*, pages 214–219, 1997.
- [77] R. Llido. *Contribution à l'étude de la simulation photoélectrique Laser pour le développement de nouvelles méthodologie d'analyse de défaillance*. PhD thesis, Université Bordeaux 1, 2012.
- [78] Safa Kasap. Thermoelectric effects in Metals : Thermocouples, 2001. e-book, [http ://materials.usask.ca/samples/Thermoelectric-Seebeck.pdf](http://materials.usask.ca/samples/Thermoelectric-Seebeck.pdf).
- [79] Stefan Dilhaire, Amine Salhi, Stéphane Grauby, and Wilfrid Claeys. Laser Seebeck Effect Imaging (SEI) and Peltier Effect Imaging (PEI) : complementary investigation methods. *Microelectronics Reliability*, 43(9-11) :1609–1613, September 2003.
- [80] Bernard Valeur. *Lumière et luminescence : ces phénomènes lumineux qui nous entourent*. Belin, coll. "Pour la science ", 2005.
- [81] D. Curie. *Luminescence cristalline*. Dunod Paris, 1960.
- [82] R. Christian Beauge. *Elaboration, caractérisation, et modélisation des phénomènes de luminescence du Monoaluminate de Strontium 1 dopé à l'Europium et au Dysprosium SrAl₂O₄ : Eu, Dy*. PhD thesis, Institut nationale polytechnique de Grenoble et de l'école nationale supérieure des mines de Saint-Etienne, 1999.
- [83] Dieter K. Schroder. *Semiconductor Material and Device Characterization*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, October 2005.
- [84] J. C. Tsang, J. A. Kash, and D. P. Vallett. Picosecond imaging circuit analysis. *IBM Journal of Research and Development*, 44(4) :583–603, July 2000.
- [85] Stas Polonsky, A. Weger, and M. McManus. Picosecond Imaging Circuit Analysis of Leakage Currents in CMOS Circuits. In *ISTFA 2002 : 28 th International Symposium for Testing and Failure Analysis*, pages 387–390, 2002.
- [86] R Desplats, G. Faggion, M. Remmach, F. Beaudoin, P. Perdu, and D. Lewis. Time Resolved Photon Emission Processing Flow for IC Analysis. *Microelectronics Reliability*, 44(9-11) :1655–1662, September 2004.

- [87] K. Shao. *Nouvelles méthodes d'imagerie haute résolution pour l'analyse des composants nanoélectriques*. PhD thesis, Université Bordeaux 1, 2012.
- [88] Stephan Hüfner. *Introduction and basic principles*. Springer, 3rd edition, 2003.
- [89] Peter Y. Yu. *Photoelectron spectroscopy*, chapter 8. Springer, 4th edition, 2010.
- [90] Roger Newman. Visible Light from a Silicon PN Junction. *Phys. Rev.*, 100(2) :700–703, October 1955.
- [91] P. Solomon and N. Klein. Electroluminescence at high fields in silicon dioxide. *Journal of Applied Physics*, 47(3) :1023+, 1976.
- [92] T. S. Leng. *NIR photon emission microscopy and spectroscopy*. PhD thesis, Université de Singapour, 2009.
- [93] A. Weger, S. Voldman, F. Stellari, P. Song, P. Sanda, and M. McManus. Transmission line pulse picosecond imaging circuit analysis methodology for evaluation of ESD and latchup. In *41st Annual In Reliability Physics Symposium*, pages 99–104, May 2003.
- [94] F. Stellari, P. Song, and A. J. Weger. Applications and Techniques for 2D Picosecond Imaging for Circuit Analysis. In *ISTFA 2014 : Conference Proceedings from the 40th International Symposium for Testing and Failure Analysis*, pages 312+. ASM International., November 2014.
- [95] D. Vallett. Picosecond imaging circuit analysis–PICA. In *Microelectronics Failure Analysis Desk Reference*, pages 292–300, 2004.
- [96] M. K. Mc Manus, J. A. Kash, S. E. Steen, S. Polonsky, J. C. Tsang, D. R. Knebel, and W. Huott. PICA : Backside failure analysis of CMOS circuits using Picosecond Imaging Circuit Analysis. *Microelectronics Reliability*, 40(8-10) :1353–1358, August 2000.
- [97] Philippe Perdu, Jérôme DiBattista, Sylvain Dudit, and Tomonori Nakamura. VLSI functional analysis by dynamic emission microscopy. *Microelectronics Reliability*, 50(9-11) :1431–1435, September 2010.
- [98] S. C. Binari, K. Ikossi, J. A. Roussos, W. Kruppa, Doewon Park, H. B. Dietrich, D. D. Koleske, A. E. Wickenden, and R. L. Henry. Trapping effects and microwave

- power performance in algan/gan hemts. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 48(3) :465–471, Mar 2001.
- [99] Alexis Divay, Mohamed Masmoudi, Olivier Latry, C. Duperrier, and Farid Temcamani. An athermal measurement technique for long time constants traps characterization in gan HEMT transistors. *Microelectronics Reliability*, 55(9-10) :1703–1707, 2015.
- [100] Guillaume Bascoul. *Applications de la cartographie en émission de lumière dynamique (Time Resolved Imaging) pour l'analyse de défaillance des composants VLSI*. PhD thesis, Université Bordeaux 1, 2013.
- [101] F. Stellari, A. Tosi, and P. Song. Switching time extraction of cmos gates using time-resolved emission (tre). In *2006 IEEE International Reliability Physics Symposium Proceedings*, pages 566–573, March 2006.
- [102] Mahmoud S. Rasras, Ingrid De Wolf, Guido Groeseneken, and Herman E. Maes. Spectroscopic identification of light emitted from defects in silicon devices. *Journal of Applied Physics*, 89(1) :249–258, jan 2001.
- [103] R. A. Wick. Grabbing images at very low light levels. *Photonics Spectra*, pages 133–136, May 1985.
- [104] N. Moulitif, E. Joubert, and O. Latry. Reliability Study of Mechatronic Power Components Using Spectral Photon Emission Microscopy. *Advanced Electromagnetics*, 5(3) :20–24, 2016.
- [105] H. Ivey. Electroluminescence and semiconductor lasers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2(11) :713–726, Nov 1966.
- [106] N. Hélène Ngô Christian. *Physique des semi-conducteurs*. Dunod, 4th edition, 2012.
- [107] J. I. Pankove, editor. *Electroluminescence*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1977.
- [108] R. Visocekas G. Hitier, D. Curie. Emission de bandes larges dans ZnSe : cathodoluminescence, thermoluminescence, transitions dues aux centres profonds. *J. Physique*, 42 :479–491, 1981.

- [109] Francis Lévy. *Physique et technologie des semiconducteurs*. Presses polytechniques et universitaires Romandes, 1995.
- [110] G. Shade. Physical Mechanisms for Light Emission Microscopy. In *Int Symp Testing & Failure Analysis (ISTFA)*, pages 121–128, 1990.
- [111] R. Gaddi, G. Meneghesso, M. Pavesi, M. Peroni, C. Canali, and E. Zanoni. Electroluminescence analysis of hfet’s breakdown. *IEEE Electron Device Letters*, 20(7) :372–374, July 1999.
- [112] F. Aniel, P. Boucaud, A. Sylvestre, P. Crozat, F. H. Julien, and R. Adde. Electroluminescence spectroscopy of AlGaAs/InGaAs and AlGaAs/GaAs high electron mobility transistors. *Journal of Applied Physics*, 77(5) :2184+, 1995.
- [113] G. Meneghesso, T. Grave, M. Manfredi, M. Pavesi, C. Canali, and E. Zanoni. Analysis of hot carrier transport in algaas/ingaas pseudomorphic hemts by means of electroluminescence. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 47(1) :2–10, Jan 2000.
- [114] N. Shigekawa, T. Enoki, T. Furuta, and H. Ito. Electroluminescence of inala_s/ingaas hemts lattice-matched to inp substrates. *IEEE Electron Device Letters*, 16(11) :515–517, Nov 1995.
- [115] J. C. H. Phang, D. S. H. Chan, S. L. Tan, W. B. Len, K. H. Yim, L. S. Koh, C. M. Chua, and L. J. Balk. A review of near infrared photon emission microscopy and spectroscopy. In *Proceedings of the 12th International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits, 2005. IPFA 2005.*, pages 275–281, June 2005.
- [116] S. M. Mansfield and G. S. Kino. Solid immersion microscope. *Applied Physics Letters*, 57(24) :2615+, 1990.
- [117] Salim Mimouni. *Enregistrement de disques optiques haute densité en champ proche*. PhD thesis, Université Joseph Fourier (Grenoble), 2007.
- [118] S. B. Ippolito, B. B. Goldberg, and M. S. Ünlü. High spatial resolution subsurface microscopy. *Applied Physics Letters*, 78(26), 2001.

- [119] Keith A. Serrels, Euan Ramsay, Paul A. Dalgarno, Brian D. Gerardot, John A. O'Connor, Robert H. Hadfield, Richard J. Warburton, , and Derryck. Solid immersion lens applications for nanophotonic devices. *Journal of Nanophotonics*, 2, December 2008.
- [120] T. Amandine Auber. *Analyse de défaillance de nouvelles technologies microélectroniques : nouvelles approches dans la méthodologie de préparation d'échantillon*. PhD thesis, Université de Bordeaux 1, 2012.
- [121] C. Boit. From IC debug to hardware security risk : The power of backside access and optical interaction. In *2016 IEEE 23rd International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA)*, pages 365–369, 2016.
- [122] Jianlei Tao, Peiyuan Fang, and Jiaji Wang. Backside IR Photon Emission Microscopy (IR-PEM) Observation in Failure Analysis of the Packaged Devices. In *2007 8th International Conference on Electronic Packaging Technology*, pages 1–4. IEEE, August 2007.
- [123] Y. Y. Liu, J. M. Tao, D. S. H. Chan, J. C. H. Phang, and W. K. Chim. A new spectroscopic photon emission microscope system for semiconductor device analysis. In *Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits, 1995., Proceedings of the 1995 5th International Symposium on the*, pages 60–65. IEEE, November 1995.
- [124] J. Kölzer, C. Boit, A. Dallmann, G. Deboy, J. Otto, and D. Weinmann. Quantitative emission microscopy. *Journal of Applied Physics*, 71(11) :R23–R41, June 1992.
- [125] Félix Beaudoin. *Localisation de défaut par la face arrière des circuits intégrés*. PhD thesis, Université de Bordeaux 1, 2002.
- [126] A. Glowacki, P. Laskowski, C. Boit, Ponky Ivo, Eldad Bahat-Treidel, Reza Pazi-randeh, Richard Lossy, Joachim Würfl, and Günther Tränkle. Characterization of stress degradation effects and thermal properties of AlGaN/GaN HEMTs with photon emission spectral signatures. *Microelectronics Reliability*, 49(9-11) :1211–1215, September 2009.
- [127] D. S. H. Chan, J. C. H. Phang, W. K. Chim, Y. Y. Liu, and J. M. Tao. Design and performance of a new spectroscopic photon emission microscope system for

- the physical analysis of semiconductor devices. *Review of Scientific Instruments*, 67(7) :2576+, 1996.
- [128] K. de Kort and Damink. The spectroscopic signature of light emitted by integrated circuits. In *ESREF*, pages 45+, 1990.
- [129] Kees de Kort, Paul Damink, and Henk Boots. Spectrum emitted by hot electrons in p-i-n cold cathodes. *Phys. Rev. B*, 48, 1993.
- [130] Ingrid De Wolf and Mahmoud Rasras. Spectroscopic photon emission microscopy : a unique tool for failure analysis of microelectronics devices. *Microelectronics Reliability*, 41(8) :1161–1169, August 2001.
- [131] P. Scholz, A. Glowacki, U. Kerst, C. Boit, P. Ivo, R. Lossy, H. J. Würfl, and Y. Yokoyama. Single image spectral electroluminescence (photon emission) of gan hemts. In *2013 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS)*, pages CD.3.1–CD.3.7, April 2013.
- [132] Glowacki A., Boit C., Perdu P., and Iwaki Y. Backside spectroscopic photon emission microscopy using intensified silicon CCD. *Microelectronics Reliability*, 54(9-10) :2105–2108, September 2014.
- [133] *Light Emission Spectral Analysis : The Connection between Electric Field and the Spectrum*, 1999.
- [134] S. Rusu, S. Seidel, G. Woods, D. Grannes, H. Muljono, J. Rowlette, and K. Petrosky. Backside infrared probing for static voltage drop and dynamic timing measurements. In *2001 IEEE International Solid-State Circuits Conference. Digest of Technical Papers. ISSCC (Cat. No.01CH37177)*, pages 276–277, Feb 2001.
- [135] T. Parrassin and D.Sylvain. Introduction of spectral mapping through transmission grating, derivative technique of photon emission. In *Int Symp Testing & Failure Analysis (ISTFA)*, 2014.
- [136] María L. Calvo and Vasudevan Lakshminarayanan. *Optical Waveguides : From Theory to Applied Technologies*. 2007.
- [137] E. Aristidi. Cours d’optique ondulatoire, Université de Nice . [http ://sites.unice.fr/site/aristidi/optique/](http://sites.unice.fr/site/aristidi/optique/).

- [138] Maxime Fontaine. *Mesure de la température de semi-conducteurs par interférométrie optique*. PhD thesis, Rouen 2010.
- [139] Pierre Brosselard. *Conception, réalisation et caractérisation d'interrupteurs (thyristors et JFETs) haute tension (5kV) en carbure de silicium*. PhD thesis, 2004.
- [140] Xiang-Lei Han. *Réalisation et caractérisation de dispositifs MOSFET nanométriques à base de réseaux denses de nanofils verticaux en silicium*. PhD thesis, 2011.
- [141] Dhouha Othman. *Etude d'interrupteurs en carbure de silicium et potentiel d'utilisation dans des applications aéronautiques*. PhD thesis, Université Paris-Saclay, December 2015.
- [142] B. Jayant Baliga. *advanced Power MOSFET Concepts*. Springer, 2010.
- [143] Pravin Sinha. *Contribution to failure mechanism driven qualification of electronic power devices and design guidelines for high temperature automotive applications*. PhD thesis, Télécom Bretagne, 2009.
- [144] Thierry Di Gilio. *Etude de la fiabilité porteurs chauds et des performances des technologies CMOS 0.13 μm - 2nm*. PhD thesis, L'université de Provence, 2006.
- [145] H. Tanoue, A. Tanaka, Y. Oodate, T. Nakahagi, D. Sugiyama, C. Ma, H. J. Mattausch, and M. Miura-Mattausch. Compact modeling of dynamic mosfet degradation due to hot-electrons. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 17(1) :52–58, March 2017.
- [146] Umesh K. Mishra and Jasprit Singh. *Semiconductor Device Physics and Design*. Springer Netherlands, 2008.
- [147] Simon Tam, Ping-Keung Ko, and Chenming Hu. Lucky-electron model of channel hot-electron injection in mosfet's. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 31(9) :1116–1125, Sep 1984.
- [148] Edward S. Yang. *Microelectronic Devices*. New York, Mcgraw Hill Series in Electrical and Computer Engineering, 1988.
- [149] El Moukthari Issam. *Elaboration de nouvelles méthodologies d'évaluation de la fiabilité de circuits nanoélectroniques*. Theses, Université Sciences et Technologies - Bordeaux I, November 2012.

- [150] Hichame Maanane. *Etude de la fiabilité des transistors hyperfréquences de puissance dans une application RADAR en bande S*. PhD thesis, Université de Rouen, 2005.
- [151] Electronics Renesas. Rev.2.50. *Semiconductor Reliability Handbook*, January 2017.
- [152] Panasonic. T04007BE-3 2009.4 3-44 . *Failure Mechanism of Semiconductor Devices*, 2009.
- [153] J. W. McPherson. *Reliability Physics and Engineering*. Springer New York Dordrecht Heidelberg London, 2010.
- [154] Christophe Banc. *Application de la microscopie d'émission de photons à la caractérisation de composants en carbure de silicium (SiC)*. PhD thesis, Grenoble, INPG, 2001.
- [155] N. Moulif, E. Joubert, M. Masmoudi, and O. Latry. Characterization of ESD Stress Effects on SiC MOSFETs Using Photon Emission Spectral Signatures. In *Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, jan 2017.
- [156] I. H. Malitson. Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica*,†. *J. Opt. Soc. Am.*, 55(10) :1205–1209, Oct 1965.
- [157] L. G. Van Uitert S. Singh, J. R. Potopowicz and S. H. Wemple. Nonlinear Optical Properties of Hexagonal Silicon Carbide. *Applied Physics Letters*, 19(3), 1971.
- [158] Kevin M. McPeak, Sriharsha V. Jayanti, Stephan J. P. Kress, Stefan Meyer, Stelio Iotti, Aurelio Rossinelli, and David J. Norris. Plasmonic Films Can Easily Be Better : Rules and Recipes. *ACS Photonics*, 2(3) :326–333, 2015.
- [159] J. R. DeVore. Refractive indices of rutile and sphalerite. *J. Opt. Soc. Am.*, 41(6) :416–419, Jun 1951.
- [160] U. Scheuermann J. Lutz, H. Schlangenotto and R. De Doncker. *Semiconductor Power Devices Physics, Characteristics, Reliability*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
- [161] W. D. Greason. Electrostatic discharge : a charge driven phenomenon - Science-Direct. *Journal of Electrostatics*, 28 :199–218, 1992.

- [162] ESD STM5.1-2001. Standard Test Method for Electrostatic discharge Sensitivity Testing- Human Body Model (HBM) Component Level. *ESD Association WG 5.1*, 2001.
- [163] ESD STM5.2-1999. Standard Test Method for Electrostatic discharge Sensitivity Testing- Machine Model. *ESD Association WG 5.2*, 1999.
- [164] ESD STM5.3.1-1999. Standard Test Method for Electrostatic discharge Sensitivity Testing- Charged Device Model (CDM) Component Level. *ESD Association*, 1999.
- [165] Vagneur JL. Décharges électrostatiques- Application à l'industrie électronique. *Techniques de l'Ingénieur*, 2011.
- [166] O. Yuan GA. *Stratégies de modélisation et protection vis à vis des décharges électrostatiques (ESD) adaptées aux exigences de la norme du composant chargé (CDM)*. PhD thesis, Université de Toulouse, 2009.
- [167] Meng Miao, Yuanzhong Zhou, Javier A. Salcedo, Jean-Jacques Hajjar, and Juin J. Liou. Compact failure modeling for devices subject to electrostatic discharge stresses – A review pertinent to CMOS reliability simulation. *Microelectronics Reliability*, 55(1) :15–23, January 2015.
- [168] Infinition. Preventing ESD Induced Failures in Small Signal MOSFETs, 2013.
- [169] A. Rivière. *Protection des Circuits Intégrés CMOS Profondément Submicroniques contre les Décharges Electrostatiques*. PhD thesis, Université Montpellier II, 2008.
- [170] H. Sarbishaei. *Electrostatic Discharge Protection Circuit for High-Speed Mixed-Signal Circuits*. PhD thesis, Université de Waterloo, 2007.
- [171] W. Boxleitner, P. Richman, and G. Weil. Characterizing the stress applied to ics by different esd tester circuits. In *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pages 258–264, Aug 1990.
- [172] H. Hyatt. ESD : Standards, threats and system hardness fallacies. In *2002 Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium*, pages 178–185, Oct 2002.
- [173] N. Lacrampe. *Méthodologie de modélisation et de caractérisation de l'immunité des cartes électroniques vis-à-vis des décharges électrostatiques (ESD)*. PhD thesis, INSA de Toulouse, 2008.

- [174] NF EN 61000-4-1. Compatibilité électromagnétique (CEM) - Partie 4-1 : techniques d'essai et de mesure - Vue d'ensemble de la série CEI 61000-4. *afnor*, 2007.
- [175] Adelmo Ortiz-Conde, Francisco J. García-Sánchez, Juan Muci, Alberto Terán Barrios, Juin J. Liou, and Ching-Sung Ho. Revisiting MOSFET threshold voltage extraction methods. *Microelectronics Reliability*, 53(1) :90 – 104, 2013. Reliability of Micro-Interconnects in 3D IC Packages.
- [176] S.M. Sze and Kwok K. Ng. *Physics of Semiconductor Devices*. Hoboken, N.J. : Wiley-Interscience, 2007.
- [177] Servane Blanqué. *Optimisation de l'implantation ionique et du recuit thermique pour SiC*. PhD thesis, Université Montpellier 2 et autonoma de Barcelona, 2004.
- [178] D. Blavette. De la physique à la technologie La sonde atomique tomographique, 1998. <http://www.cnrs.fr/publications/imagesdelaphysique/couv-PDF/imagephys97/103-110.pdf>.
- [179] Laurent Arnoldi. *Interaction laser-nanotip under high electric field : atom probe application*. Theses, Université de Rouen, December 2014.
- [180] I. Ben Akkez, A. Cros, C. Fenouillet-Beranger, F. Boeuf, Q. Rafhay, F. Balestra, and G. Ghibaudo. New parameter extraction method based on split C-V for FD-SOI MOSFETs. In *2012 Proceedings of the European Solid-State Device Research Conference (ESSDERC)*, pages 217–220. IEEE, 2012.
- [181] K. Chandrasekaran, Xing Zhou, Siau B. Chiah, Wangzuo Shanguan, Guan H. See, L. K. Bera, N. Balasubramanian, and S. C. Rustagi. Extraction of physical parameters of strained silicon MOSFETs from C-V measurement. In *Proceedings of 35th European Solid-State Device Research Conference, 2005. ESSDERC 2005.*, pages 521–524. IEEE, 2005.
- [182] Miron J. Cristea and Florin Babarada. C-V parameter extraction technique for characterisation the diffused junctions of semiconductor devices. In *2008 International Semiconductor Conference*, volume 2, pages 335–338. IEEE, October 2008.
- [183] Ouahiba Tebbi. *Estimation of mechanical reliability by the accelerated life testing models*. Theses, Université d'Angers, March 2005.

- [184] L. Yang and A. Castellazzi. High temperature gate-bias and reverse-bias tests on SiC MOSFETs. *Microelectronics Reliability*, 53(9-11) :1771–1773, September 2013.
- [185] Lelis A. Green R. and Habersat D. Application of reliability test standards to SiC Power MOSFETs. In *Reliability Physics Symposium (IRPS), 2011 IEEE International*, pages EX.2.1–EX.2.9. IEEE, April 2011.
- [186] Shoichi Onda, Hiroki Watanabe, Yasuo Kito, Hiroyuki Kondo, Hideyuki Uehigashi, Norikazu Hosokawa, Yoshiyuki Hisada, Kenji Shiraishi, and Hiroyasu Saka. Transmission electron microscope study of a threading dislocation with and its effect on leakage in a 4H-SiC MOSFET. *Philosophical Magazine Letters*, 93(8) :439–447, 2013.
- [187] Kosuke Uchida, Toru Hiyoshi, Taro Nishiguchi, Hirofumi Yamamoto, Masaki Furumai, Takashi Tsuno, and Yasuki Mikamura. Lifetime estimation of sic mosfets under high temperature reverse bias test. *Microelectronics Reliability*, 64 :425 – 428, 2016.
- [188] Nadine Abboud and Roland Habchi. Determination of defects concentration from c-v and g-v curves in a mosfet structure. *MRS Proceedings*, 1195, 2009.
- [189] M. Asif Khan, A. Bhattarai, J. N. Kuznia, and D. T. Olson. High electron mobility transistor based on a $GaN - Al_xGa_{1-x}N$ heterojunction. *Applied Physics Letters*, 63(9) :1214–1215, 1993.
- [190] D. Delagebeaudeuf, P. Delescluse, P. Etienne, M. Laviron, J. Chaplart, and N. T. Linh. Two-dimensional electron Gas m.e.s.f.e.t. structure. *Electronics Letters*, 16(17) :667–668, August 1980.
- [191] N. Malbert, N. Labat, A. Curutchet, C. Sury, V. Hoel, J.-C. de Jaeger, N. Defrance, Y. Douvry, C. Dua, M. Oualli, C. Bru-Chevallier, J.-M. Bluet, and W. Chikhaoui. Characterisation and modelling of parasitic effects and failure mechanisms in al-gan/gan hemts. *Microelectronics Reliability*, 49(9) :1216 – 1221, 2009.
- [192] B. M. Paine, S. R. Polmanter, V. T. Ng, N. T. Kubota, and C. R. Ignacio. Life-testing gan hemts with multiple degradation mechanisms. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 15(4) :486–494, Dec 2015.

- [193] J K Kaushik, V R Balakrishnan, B S Panwar, and R Muralidharan. Inverse temperature dependence of reverse gate leakage current in AlGa_N/Ga_N HEMT. *Semiconductor Science and Technology*, 28(1) :015026, 2013.
- [194] B. M. Paine, V. T. Ng, S. R. Polmanter, N. T. Kubota, and C. R. Ignacio. Degradation rate for surface pitting in gan hemt. In *2015 IEEE International Reliability Physics Symposium*, pages CD.1.1–CD.1.7, April 2015.
- [195] J. B. Fonder, L. Chevalier, C. Genevois, O. Latry, C. Duperrier, F. Temcamani, and H. Maanane. Physical analysis of Schottky contact on power AlGa_N/Ga_N HEMT after pulsed-RF life test. *Microelectronics Reliability*, 52(9-10) :2205–2209, September 2012.
- [196] F. Temcamani, J. B. Fonder, O. Latry, and C. Duperrier. Electrical and Physical Analysis of Thermal Degradations of AlGa_N/Ga_N HEMT Under Radar-Type Operating Life. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 64(3) :756–766, March 2016.
- [197] J. A. del Alamo and J. Joh. Ga_N HEMT reliability. *Microelectronics Reliability*, 49(9-11) :1200–1206, September 2009.
- [198] Jungwoo Joh and J. A. del Alamo. Impact of electrical degradation on trapping characteristics of Ga_N high electron mobility transistors. In *Electron Devices Meeting, 2008. IEDM 2008. IEEE International*, pages 1–4. IEEE, December 2008.
- [199] D. Bisi, M. Meneghini, C. de Santi, A. Chini, M. Dammann, P. Brückner, M. Mikulla, G. Meneghesso, and E. Zanoni. Deep-level characterization in gan hemts-part i : Advantages and limitations of drain current transient measurements. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 60(10) :3166–3175, Oct 2013.
- [200] O. Jardel, F. De Groote, C. Charbonniaud, T. Reveyard, J. P. Teyssier, R. Quere, and D. Floriot. A drain-lag model for algan/gan power hemts. In *2007 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium*, pages 601–604, June 2007.
- [201] L. Brunel, B. Lambert, D. Carisetti, Nathalie Malbert, A. Curutchet, and N. Labat. Electrical Runaway in AlGa_N/Ga_N HEMTs : Physical Mechanisms and Impact on Reliability. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 64(4) :1548–1553, April 2017.

- [202] E. A. Douglas, L. Liu, C. F. Lo, B. P. Gila, F. Ren, and Stephen J. Pearton. *Reliability Issues in AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors*, pages 431–453. Springer New York, New York, NY, 2013.
- [203] G. Meneghesso, G. Verzellesi, F. Danesin, F. Rampazzo, F. Zanon, A. Tazzoli, M. Meneghini, and E. Zanoni. Reliability of GaN High-Electron-Mobility Transistors : State of the Art and Perspectives. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 8(2) :332–343, June 2008.
- [204] M. Meneghini, A. Stocco, N. Ronchi, F. Rossi, G. Salviati, G. Meneghesso, and E. Zanoni. Extensive analysis of the luminescence properties of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors : Applied Physics Letters : Vol 97, No 6. *Applied Physics Letters*, 97(6), 2010.
- [205] Shigekawa Naoteru, Shiojima Kenji, and Suemitsu Tetsuya. Optical study of high-biased AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors. *Journal of Applied Physics*, 92(1), 2002.
- [206] Tommaso Brazzini, Huarui Sun, Francesco Sarti, James W Pomeroy, Chris Hodges, Massimo Gurioli, Anna Vinattieri, Michael J Uren, and Martin Kuball. Mechanism of hot electron electroluminescence in GaN-based transistors. *Journal of Physics D : Applied Physics*, 49(43) :435101, 2016.
- [207] Enrico Zanoni, Gaudenzio Meneghesso, Matteo Meneghini, Antonio Stocco, Stefano Dalcanale, Fabiana Rampazzo, Carlo De Santi, and Isabella Rossetto. Reliability of Gallium Nitride microwave transistors. In *2016 21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications (MIKON)*, pages 1–6. IEEE, May 2016.
- [208] Martin Kuball, Milan Ćapajna, Richard J.T. Simms, Mustapha Faqir, and Umesh K. Mishra. AlGaIn/GaN HEMT device reliability and degradation evolution : Importance of diffusion processes. *Microelectronics Reliability*, 51(2) :195 – 200, 2011. 2010 Reliability of Compound Semiconductors (ROCS) Workshop Prognostics and Health Management.
- [209] N. Killat, M. Tapajna, M. Faqir, T. Palacios, and M. Kuball. Evidence for impact ionisation in AlGaIn/GaN HEMTs with InGaIn back-barrier. *Electronics Letters*, 47(6) :405–406, March 2011.

- [210] C. Hodges, N. Killat, S. W. Kaun, M. H. Wong, F. Gao, T. Palacios, U. K. Mishra, J. S. Speck, D. Wolverson, and M. Kuball. Optical investigation of degradation mechanisms in AlGa_N/Ga_N high electron mobility transistors : Generation of non-radiative recombination centers. *Applied Physics Letters*, 100(11) :112106+, March 2012.
- [211] P. Marko, M. Meneghini, S. Bychikhin, D. Marcon, G. Meneghesso, E. Zanoni, and D. Pogany. IV, noise and electroluminescence analysis of stress-induced percolation paths in AlGa_N/Ga_N high electron mobility transistors. *Microelectronics Reliability*, 52(9-10) :2194–2199, September 2012.
- [212] Milan Ćapajna, Nicole Killat, Uttiya Chowdhury, Jose L. Jimenez, and Martin Kuball. The role of surface barrier oxidation on AlGa_N/Ga_N HEMTs reliability. *Microelectronics Reliability*, 52(1) :29 – 32, 2012. 2011 Reliability of Compound Semiconductors (ROCS) Workshop.
- [213] A. Divay. *Etude de la fiabilité à long terme des transistors HEMT à base de GaN*. PhD thesis, Université de Rouen Normandie, 2015.
- [214] Poornakarthik Nakkala. *Pulsed I-V and RF characterization and modeling of Al-GaN HEMTs and Graphene FETs*. Theses, Université de Limoges, June 2015.
- [215] L. Brunel, B. Lambert, P. Mezenge, J. Bataille, D. Floriot, J. Grünenpütt, H. Blanck, D. Carisetti, Y. Gourdel, N. Malbert, A. Curutchet, and N. Labat. Analysis of Schottky gate degradation evolution in AlGa_N/Ga_N HEMTs during HTRB stress. *Microelectronics Reliability*, 53(9) :1450 – 1455, 2013.
- [216] E. Zanoni, F. Danesin, M. Meneghini, A. Cetronio, C. Lanzieri, M. Peroni, and G. Meneghesso. Localized Damage in AlGa_N/Ga_N HEMTs Induced by Reverse-Bias Testing. *IEEE Electron Device Letters*, 30(5) :427–429, May 2009.
- [217] Matteo Meneghini, Antonio Stocco, Marco Bertin, Denis Marcon, Alessandro Chini, Gaudenzio Meneghesso, and Enrico Zanoni. Time-dependent degradation of AlGa_N/Ga_N high electron mobility transistors under reverse bias. *Applied Physics Letters*, 100(3) :033505+, jan 2012.
- [218] Montes M. Bajo, H. Sun, M. J. Uren, and M. Kuball. Time evolution of off-state degradation of AlGa_N/Ga_N high electron mobility transistors. *Applied Physics Letters*, 104(22) :223506+, June 2014.

- [219] J. W. Pomeroya, M. Kuball, M. J. Uren, K. P. Hilton, R. S. Balmer, and T. Martin. Insights into electroluminescent emission from AlGa_N/Ga_N field effect transistors using micro-Raman thermal analysis. *Appl. Phys. Lett.*, 88(2), January 2006.
- [220] Ophélie Lancry. *Micro-Raman characterization of materials and microelectronic devices containing wide band gap III-V semiconductors*. Theses, Université des Sciences et Technologie de Lille - Lille I, December 2009.
- [221] M. Armstrong. *Investigation of deep level defects in GaN :C, GaN :Mg AND Pseudomorphic AlGa_N/Ga_N Films*. PhD thesis, Université d'Ohio, 2006.
- [222] A. Armstrong, A. R. Arehart, B. Moran, S. P. DenBaars, U. K. Mishra, J. S. Speck, and S. A. Ringel. Impact of carbon on trap states in n-type Ga_N grown by metalorganic chemical vapor deposition : Applied Physics Letters : Vol 84, No 3. *Applied Physics Letters*, 84(3).
- [223] Meneghini Matteo, Meneghesso Gaudenzio, and Zanoni Enrico. *Power Ga_N Devices*. Springer International Publishing Switzerland, 2017.
- [224] Gan Feng, Jun Suda, and Tsunenobu Kimoto. Characterization of major in-grown stacking faults in 4H-SiC epilayers. *Physica B : Condensed Matter*, 404(23-24) :4745–4748, December 2009.
- [225] Engin Arslan, Şemsettin Altındal, Süleyman Özçelik, and Ekmel Ozbay. Dislocation-governed current-transport mechanism in (Ni/Au)–AlGa_N/AlN/Ga_N heterostructures. *Journal of Applied Physics*, 105(2) :023705+, January 2009.

Résumé/Abstract

Analyse de défaillance dans les transistors de puissance grand Gap par électroluminescence spectrale

La microscopie à émission de photons spectrale (SPEM) est une technique non destructive utilisée comme outil de localisation des défauts et comme indicateur des mécanismes de défaillance. Cette thèse présente un nouveau système de SPEM développé pour étudier la fiabilité des dispositifs de puissance à large bande interdite, notamment les MOSFET SiC et les HEMTs AlGa_N/Ga_N. Un aperçu des différents aspects fondamentaux de l'émission de lumière dans les dispositifs à semi-conducteurs est présenté. L'analyse spectrale en électroluminescence des MOSFET SiC à haute puissance et des HEMTs AlGa_N/Ga_N est rapportée et corrélée avec les analyses électriques et micro-structurales pour localiser les défaillances et identifier l'origine physique de la dérive des performances de ces composants.

Mots clés : Analyse de défaillance, Électroluminescence, Photoémission Spectrale, Réseau de diffraction, MOSFETs SiC, HEMTs AlGa_N/Ga_N, HTRB, ESD, RF-HTOL, caractérisations électriques, analyses micro-structurale.

Failure analysis in wide band Gap power transistors by spectral electroluminescence

Spectroscopic photon emission microscopy (SPEM) is a non-destructive technique used as a defect localizing tool and as an indicator of the failure mechanisms. This thesis presents a new system of SPEM developed to study the reliability of wide band Gap power devices notably SiC MOSFETs and AlGa_N/Ga_N HEMTs. An overview of different fundamental aspects of the light emission defects on semiconductors devices is presented. The electroluminescence spectral analysis of high power stressed SiC MOSFETs and AlGa_N/Ga_N HEMTs is reported and correlated with electrical and micro-structural analysis to localize the failures and identify the physical origin of the performance drift of these components.

Key Words : Failure Analysis, Electroluminescence, Spectral Photoemission, Diffraction Grating, MOSFETs SiC, HEMTs AlGa_N/Ga_N, HTRB, ESD, RF-HTOL, electrical characterizations, micro-structural analysis.