



Analyse de défaillance des transistors MOSFET Du boîtier, jusqu'à l'atome

Olivier Latry

06 avril 2021

LES RENDEZ-VOUS FIABILITE DU CFF



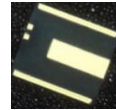
Composants de puissance en boîtier



Diode SiC



HEMT GaN RF



Power GaN



MOSFET SiC

✚ Principaux travaux sur les composants de puissance grand gap.

✚ Parc instrumental du laboratoire permettant :

- ✚ la caractérisation fine,
- ✚ la préparation d'échantillons,
- ✚ l'analyse non destructive,
- ✚ l'analyse destructive du MEB à la sonde atomique

✚ The main purpose is to explain the correlation between electrical characterisation and physical analysis with the instrumental platform of the laboratory.

The main purpose is to explain the correlation between electrical characterisation and physical analysis with the instrumental platform of the laboratory.

**Caractérisation
des Pièges**

**Modélisation
MOSFET - AFM**

Banc Step Stress

Vieillessement

**Analyse SPEM –
EBIC – EBAC**

**Caractérisation
électrique et RF**

**Interférométrie
Speckle**

**Analyse FIB -
TEM - SAT**

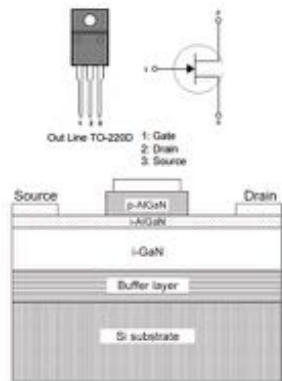
**Alimentation
de découpe**

Cathodoluminescence

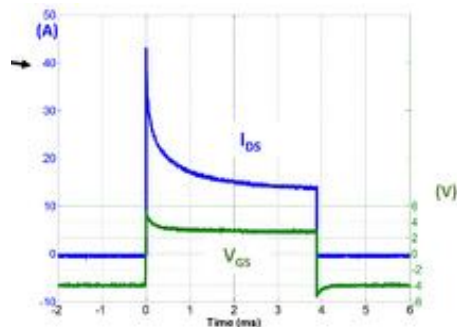
EMOCAVI (2016-2020) (collaboration GPM+IRSEEM)

European research program for SiC MOSFET transistor reliability at high temperature.

Evolution des MODèles des Composants de puissance grand gAp au cours du Vieillessement

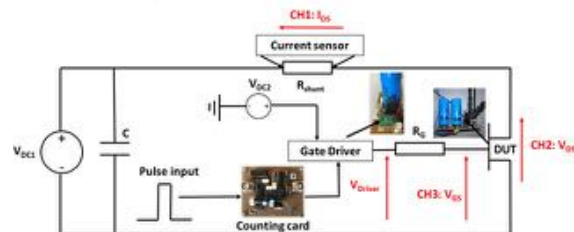


✓ Normally on -> Normally off



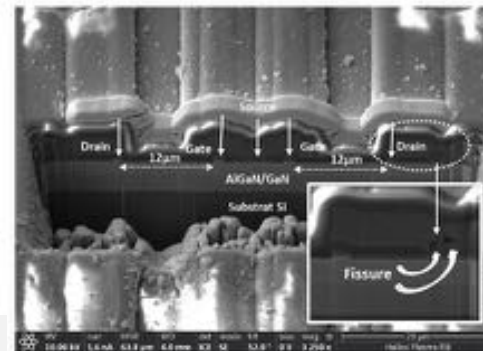
$T_{sc}=4ms, V_{DS}=35V, T=1s, 80^{\circ}C$

➤ Synoptique du banc de test



- $V_{DS}=V_{DC1}$
- Pulse répétitif -> Commutation répétitive
- $T_{sc} \rightarrow I_{DS} \rightarrow V_{DS} * I_{DS} * T_{on} = E$ (énergie dissipée) -> L'élévation de température
- Une dégradation -> Suivi des paramètres électriques

➤ Analyse microstructurales en MEB



Vue de la découpe par PFIB pour le composant à l'état dégradé (PAC#2)

- Le défaut est clairement montré dans la zone de drain, ce qui se traduit par **des fissures** dans le métal d'Al.
- La conséquence du champ électrique drain-source et l'élévation de température.

Aussi observé pour le PAC#4 (28000 pulses, 4ms)

PHC TOUBKAL (2017-2019)

34k€ Université Abdelmalek ESSAADI Tétouan ENSA Tanger

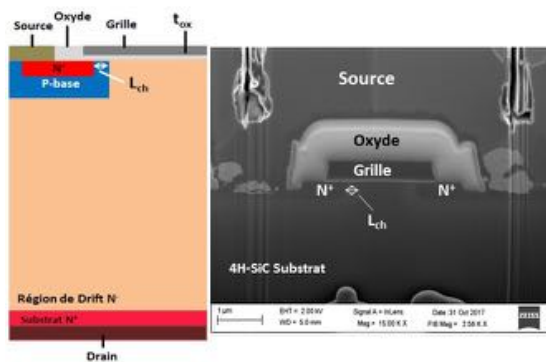
Université Abdelmalek. ESSAADI Tétouan ENSA Tanger

Fiabilité des composants électroniques de puissance: Impact sur les performances des systèmes de conversion d'énergie



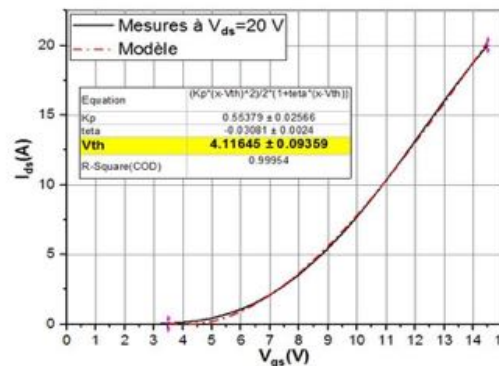
• Contrainte d'intégration

Implémentation de la structure :

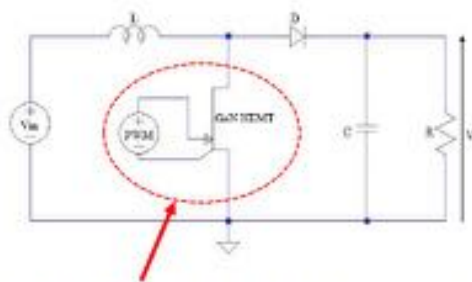


Structure du VD-MOSFET simulé

Méthodes d'extraction de la tension de seuil V_{th} : Nouvelle méthode d'optimisation de Levenberg-Marquardt (OLM)

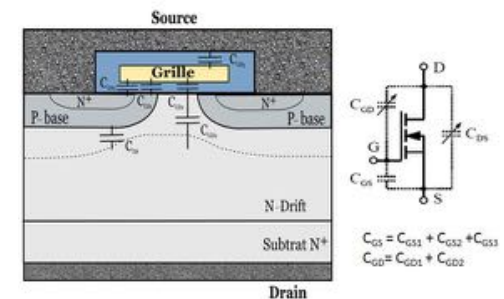


Extraction de V_{th} par la méthode OLM dans le régime de saturation ($V_{ds} = 20V$)



Modèle du transistor GaN vieilli dans un convertisseur DC Boost

Mesure des caractéristiques C-V:



Capacités parasites du MOSFET-SiC

Effects of aging on power

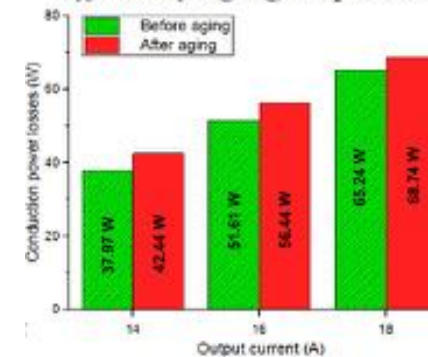


Fig. 3: Conduction power losses of DC-DC boost converter before and after aging

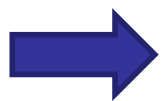
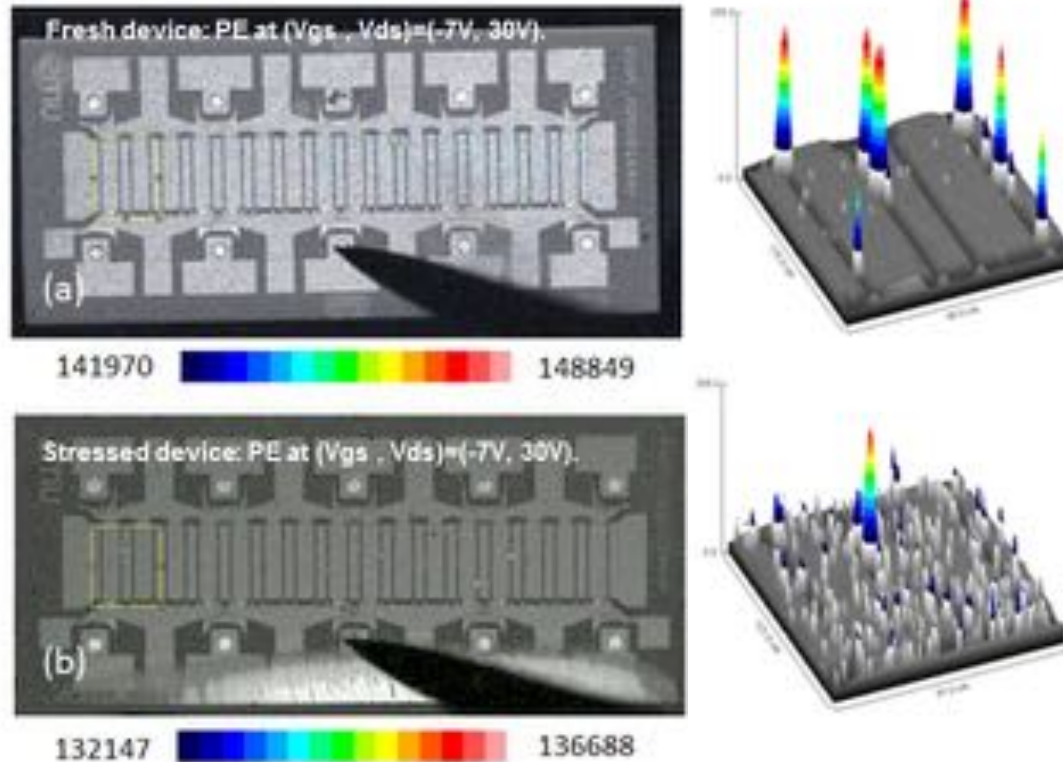
W. Jouha, "Etude et modélisation des dégradations des composants de puissance grand gap soumis à des contraintes thermiques et électriques," 2019.

- Projet FUI 16 FIRST-MFP

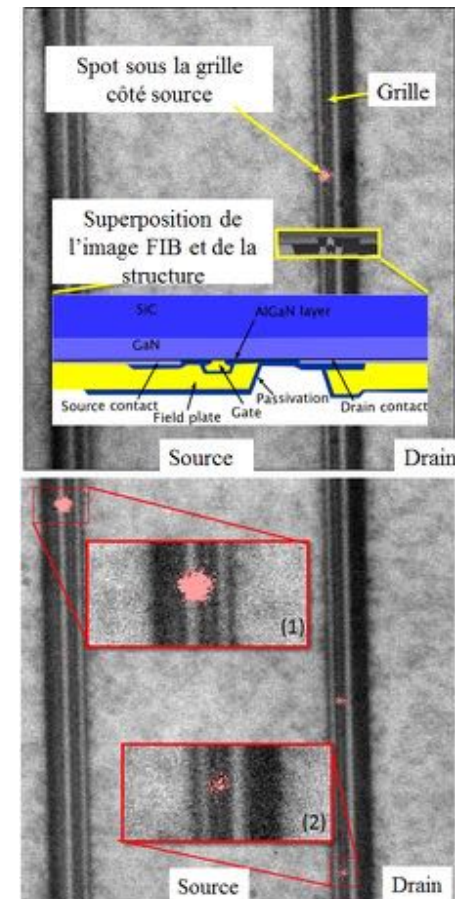
Label MOVEO, ASTEC, NAE, (2014-2017)

Improving the reliability and resistance of high-power mechatronic systems

Failure analysis in spectral photoemission microscopy.



Test de vieillissement RF (RF-HTOL *)
 Baisse du courant de fuite
 Baisse de l'intensité de PE

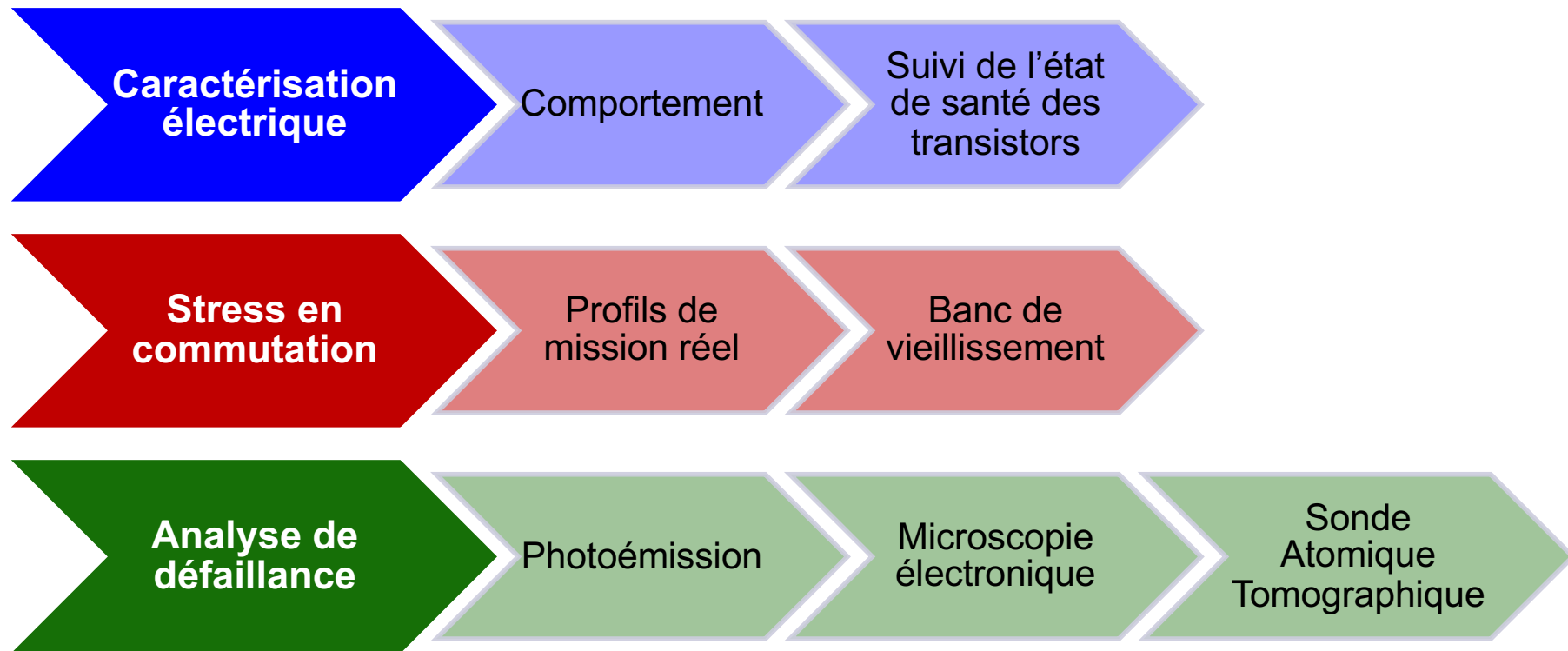


=> Identification de 3 différents types de spots

N. Moultof, "Analyse de défaillance dans les transistors de puissance grand gap par électroluminescence spectrale," 2017.

* RF-HTOL: Radio frequency high temperature operating life

Démarche pour les composants de puissance

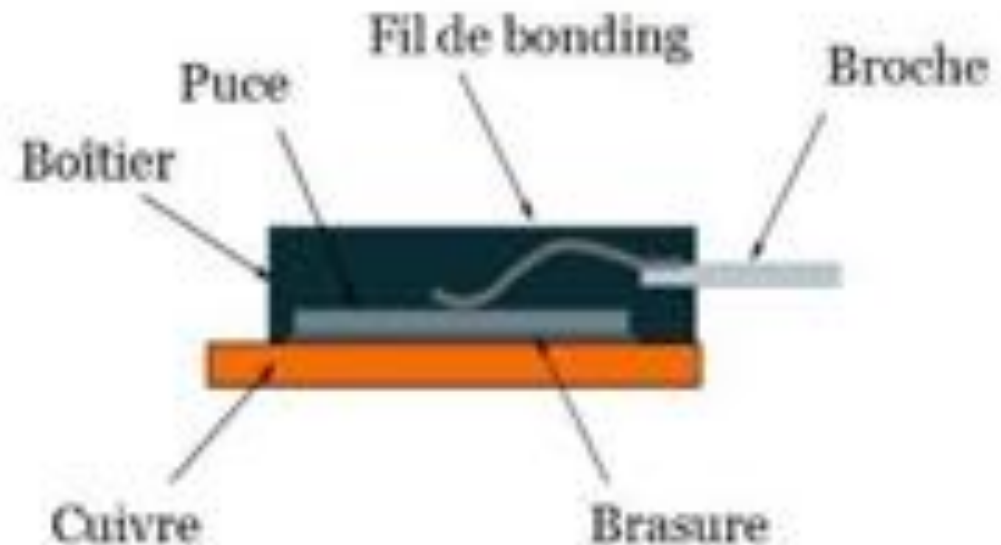


Analyse de défaillance des composants MOSFET

Generation	Ref.	$I_{ds}(max)$	$V_{ds}(max)$	$T_c(max)$
Gen2L	C2M0280120D	10 A	1200 V	150°C
Gen2H	C2M0160120D	19A	1200V	150°C
Gen3L	C3M0280090D	11,5 A	900V	150°C
Gen3H	C3M0120090D	23 A	900V	150°C



Boîtier TO 247

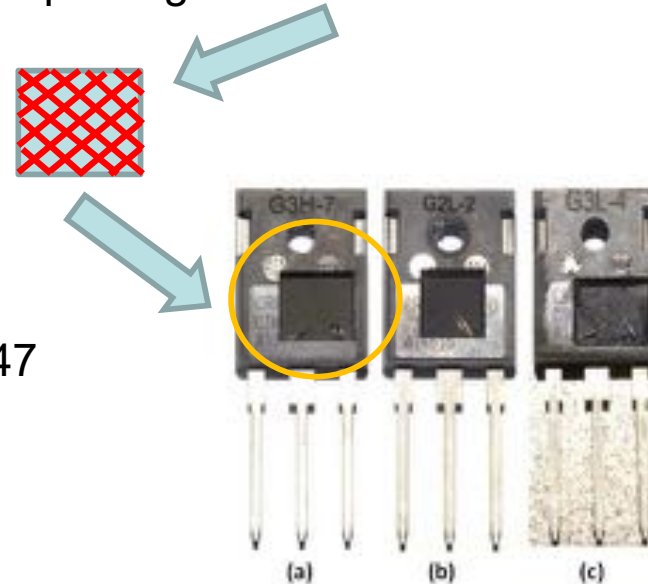


Préparation : Ablation laser



Utilisation d'un laser de 20W pulsé
Laser à fibre Ytterbium de 1mJ de
1064nm

Réalisation d'une géométrie et plusieurs
passages suivant des motifs choisis



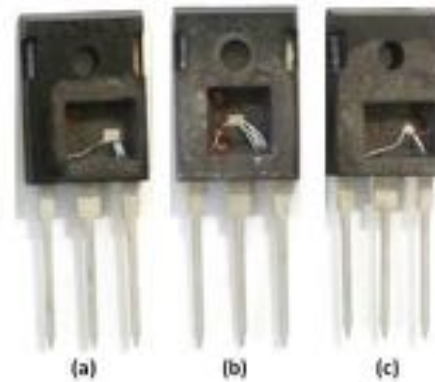
Ablation laser sur boîtier TO247
Sur 3 échantillons MOSFET
Forte et moyenne puissance

Préparation : Attaque chimique



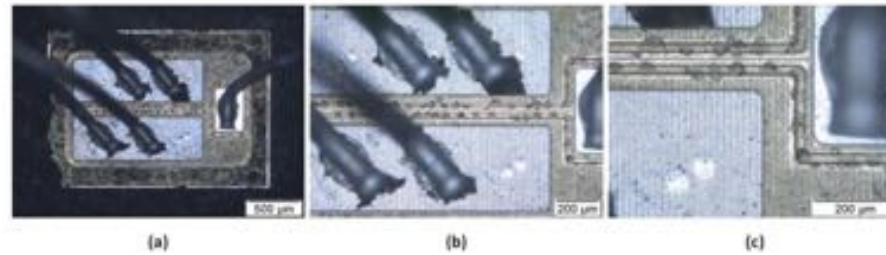
Sous hôte aspirante, avec acide sulfurique ou nitrique fumant sous une température de 80°C à 100°C contrôlée.

Dissoudre la résine sans toucher aux métaux.
Fils aluminium, couche de passivation

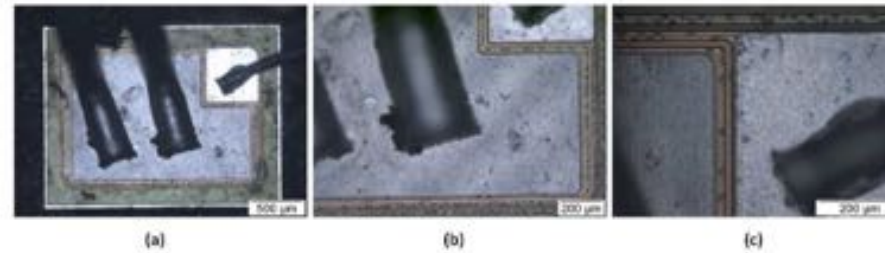


Préparation : Observation optique

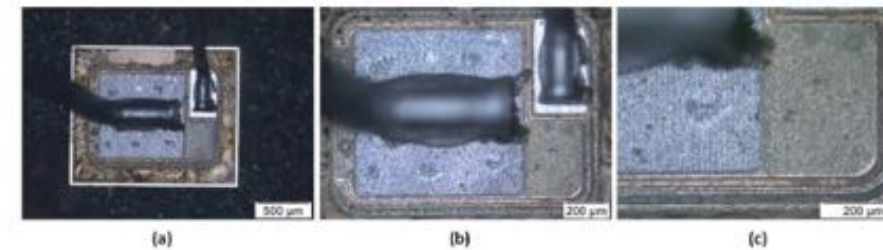
Gen2L



Gen3H

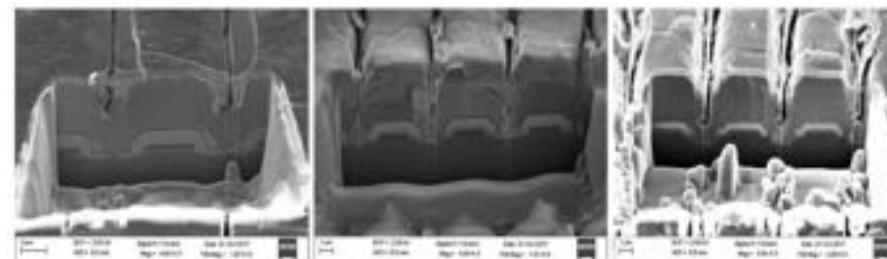
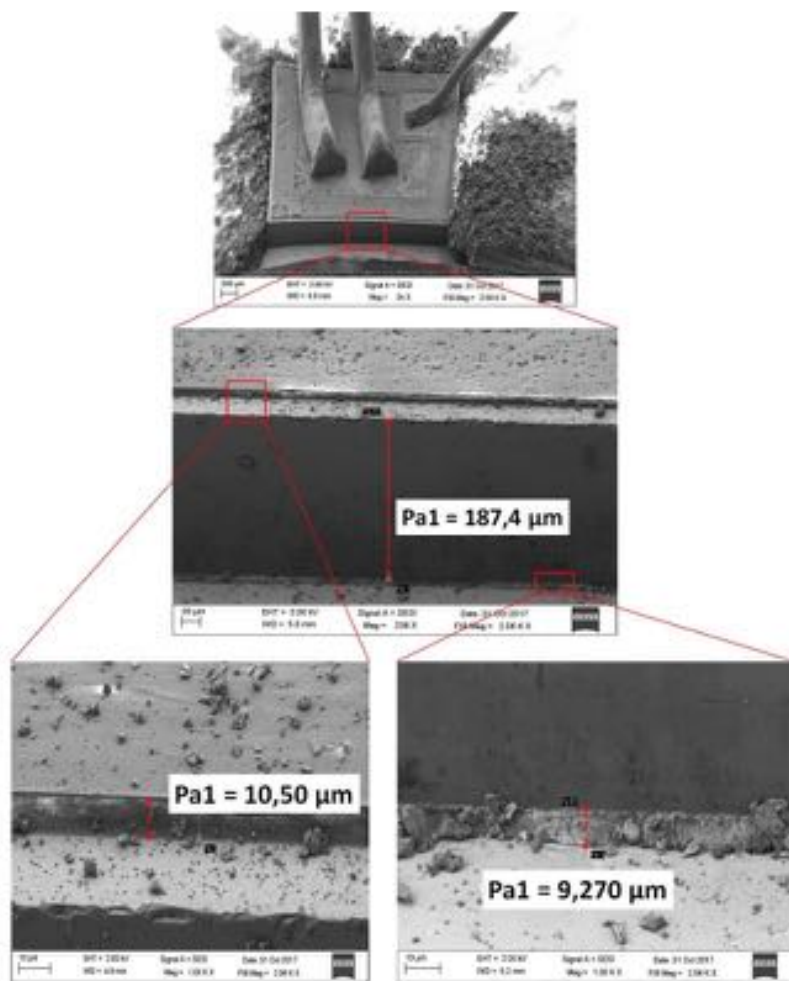


Gen3L



Agrandissement (a) 5x, (b) 10x, (c) 20x

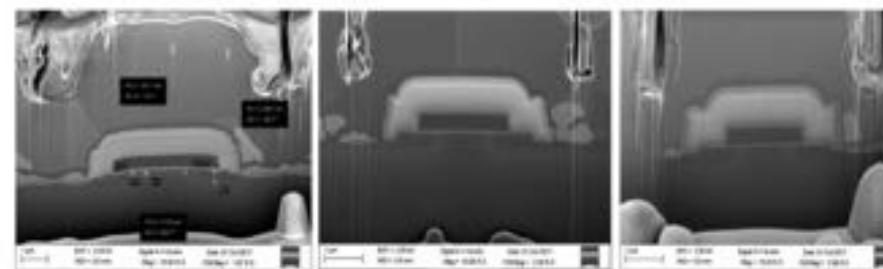
Observation au microscope électronique à balayage



Gen2L

Gen3H

Gen3L



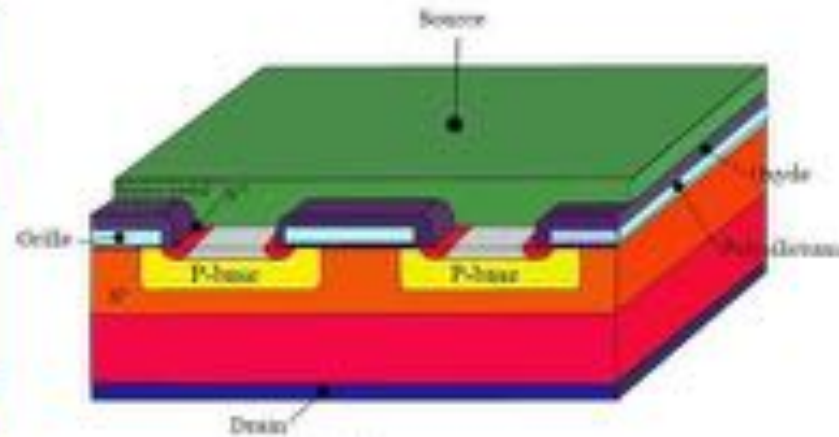
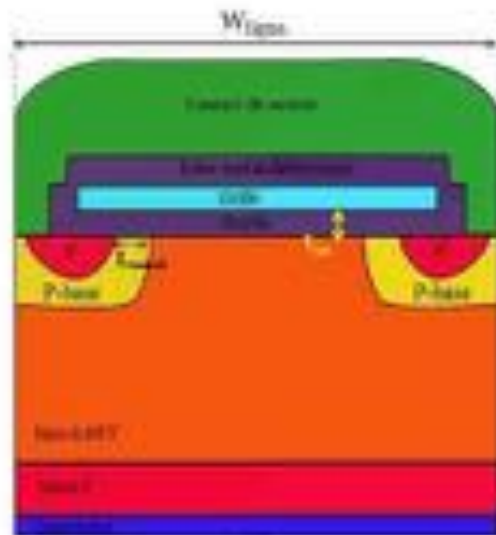
(a)

(b)

(c)

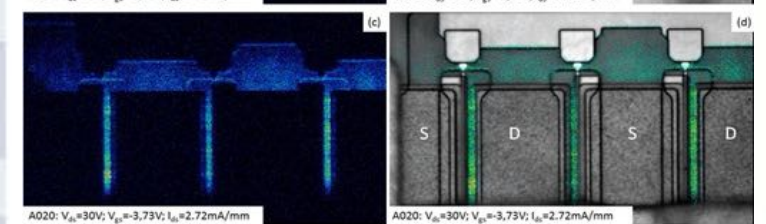
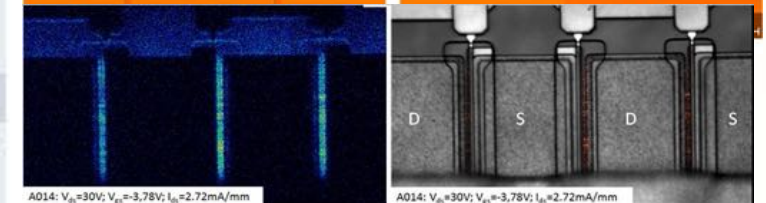
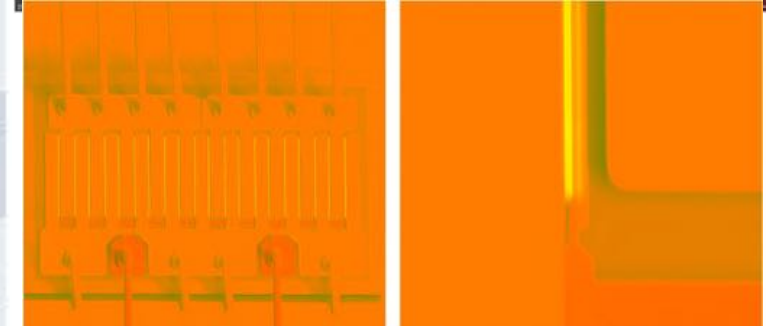
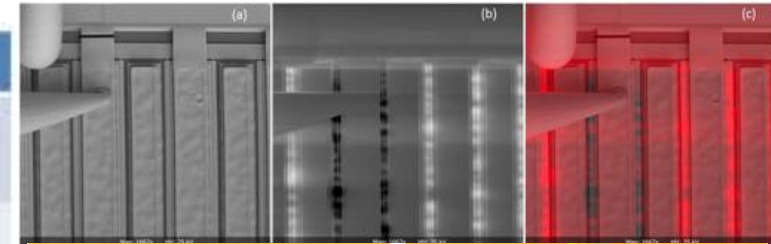
Observation générale

	Taille de la puce ($\mu m \times \mu m$)	Nombre de ligne	Largeur de la ligne(μm)	Largeur du canal (nm)	Épaisseur d'oxyde (nm)
G2L	1447 x 2105	186	9,3	550	50
G3H	1763 x 2236	316	5,9	320	30
G3L	1342 x 1605	197	6,1	290	30

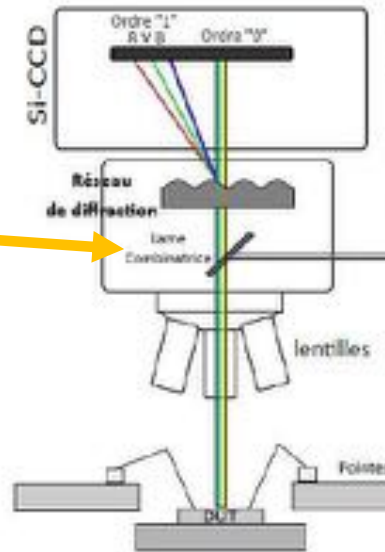
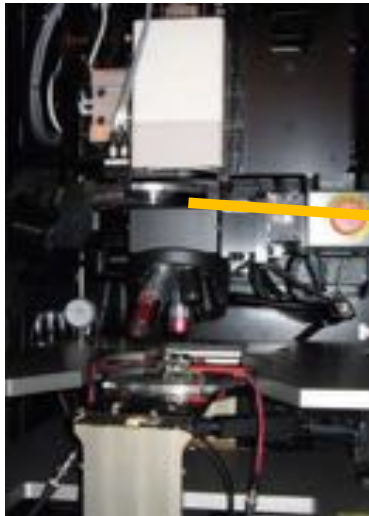


Technique de localisation de défauts

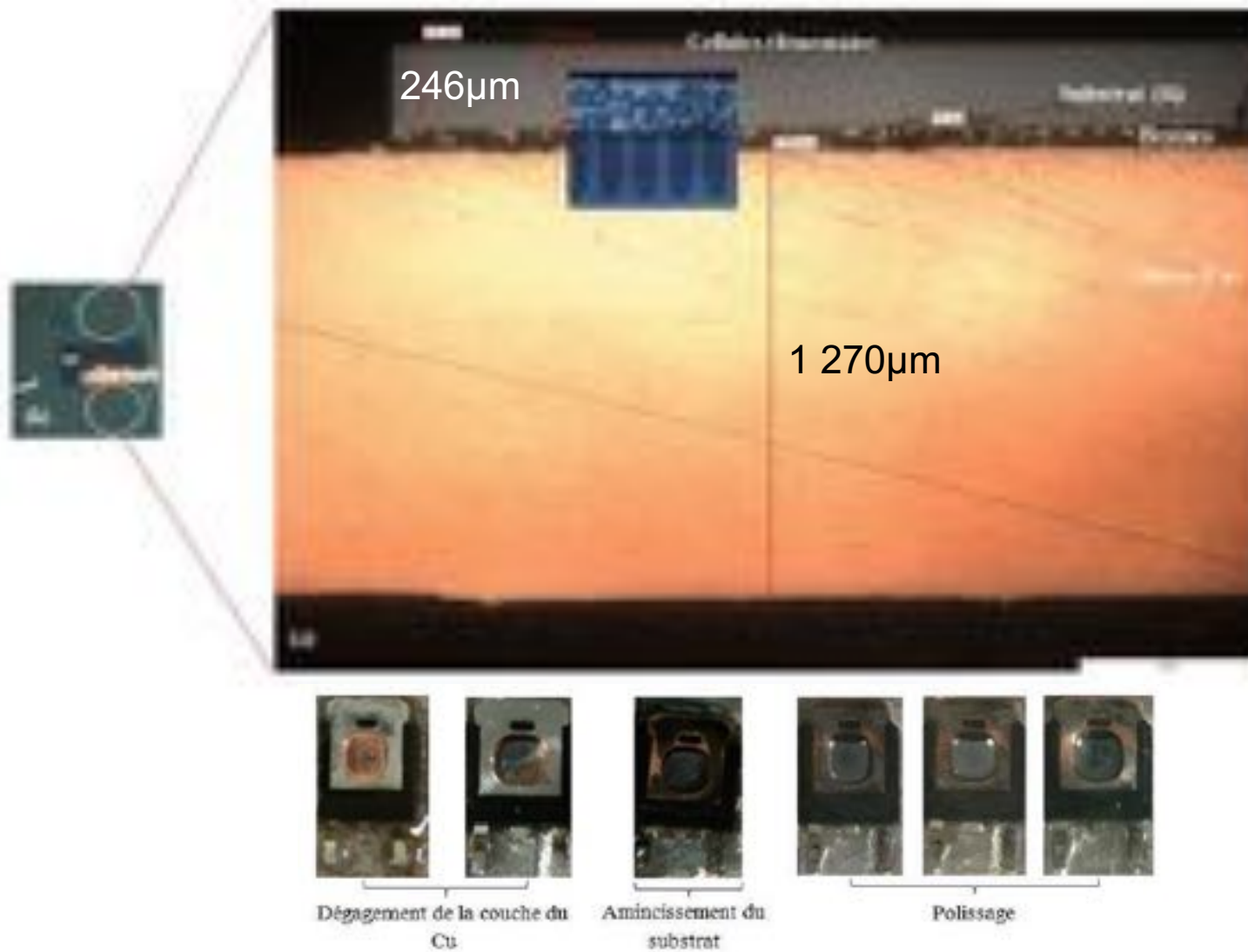
Technique	Type des défauts localisés	Limitations
CIVA	<ul style="list-style-type: none"> • Interconnexions ouvertes • Défaut d'oxyde 	<ul style="list-style-type: none"> • La présence de couches épaisses de passivation nécessite une forte énergie du faisceau d'électrons pour atteindre le conducteur ce 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



Modification d'un microscope : SPEM

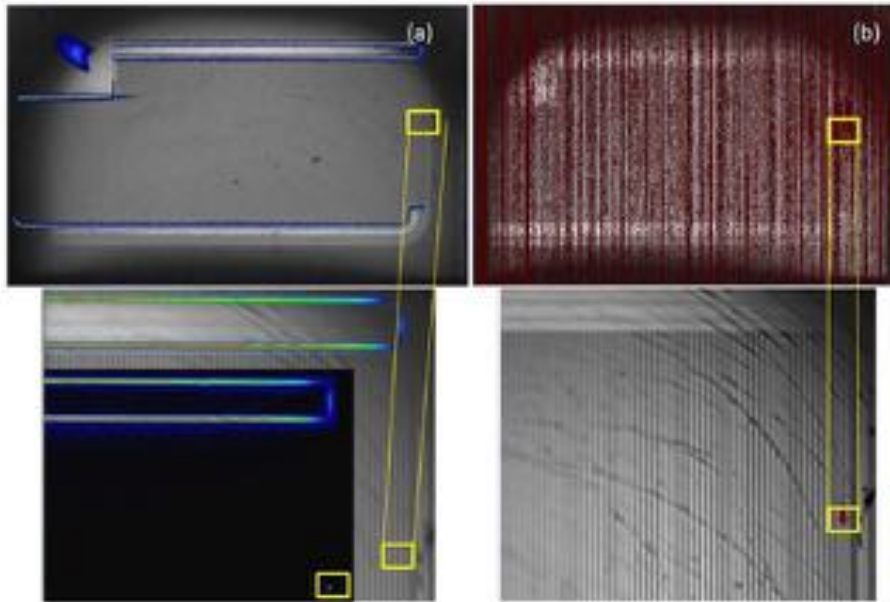


Préparation face arrière



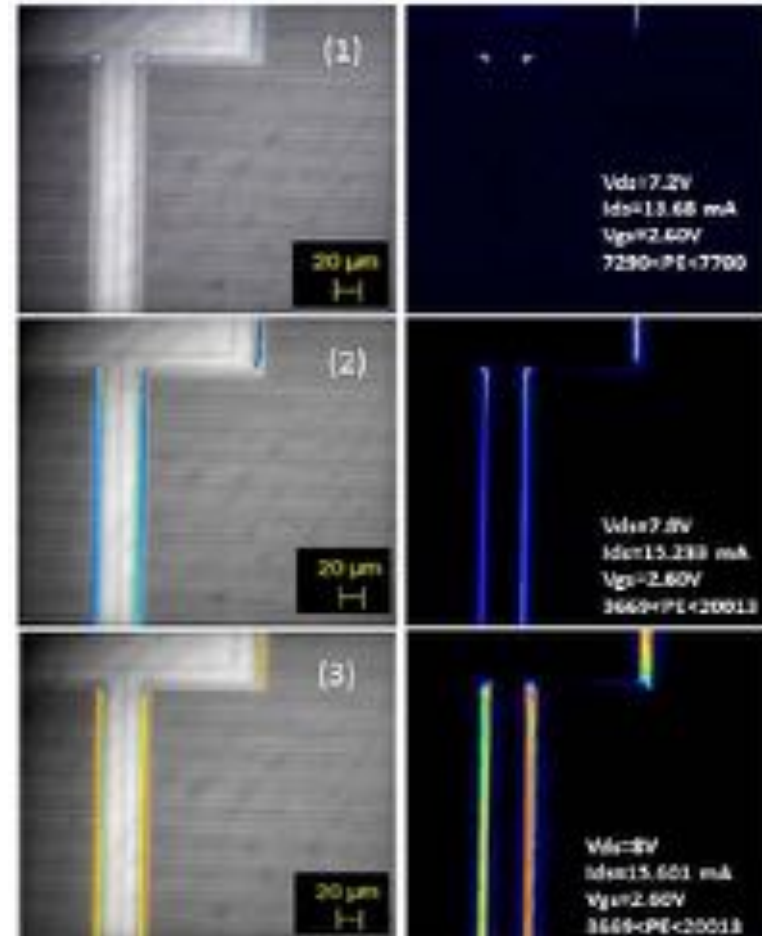
Localisation de défauts sur un MOSFET

Localisation d'un défaut ponctuel sur un MOSFET stressé par ESD (HBM 15kV)



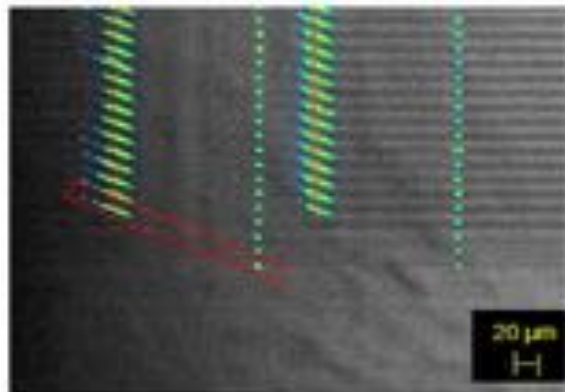
Microscope à
émission de photons

OBIRCH



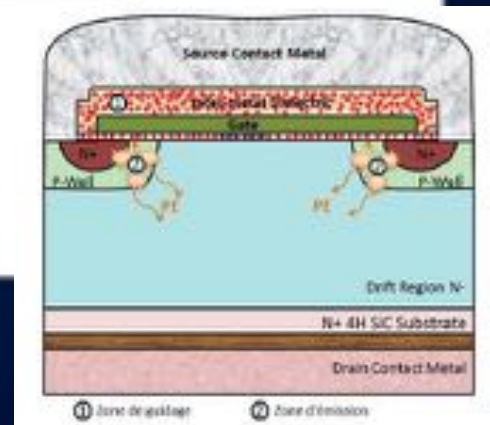
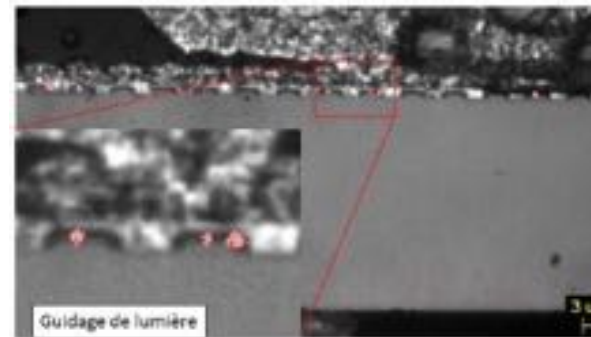
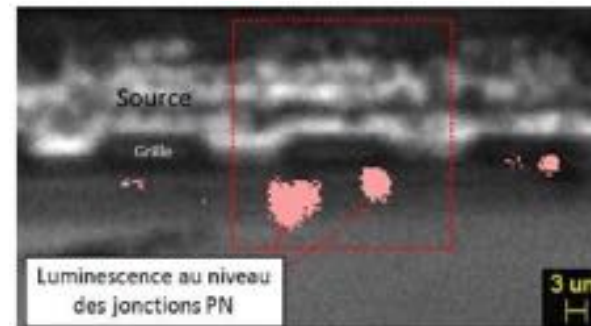
Localisation de défauts sur un MOSFET

Face arrière

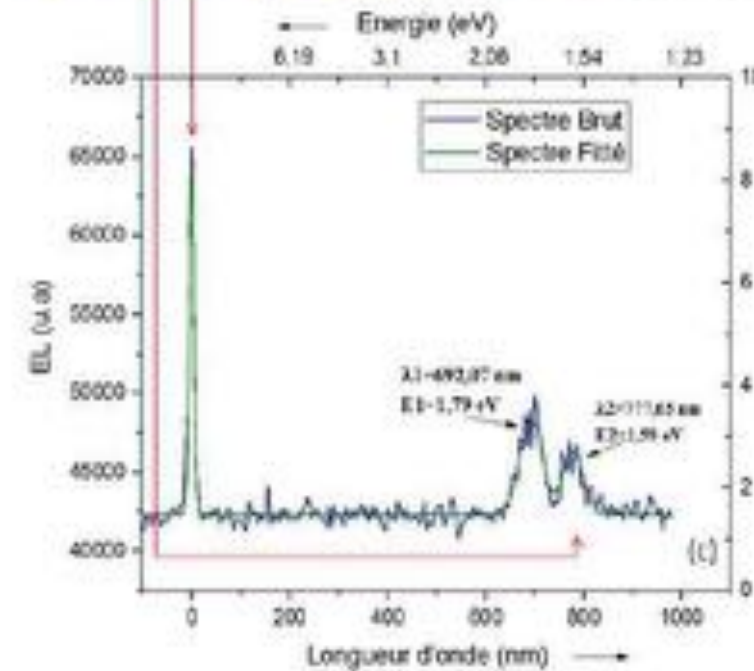
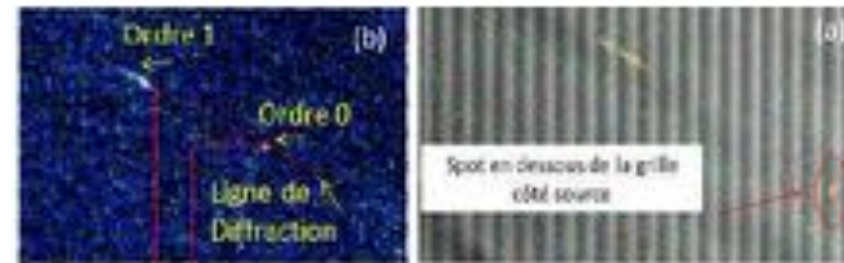
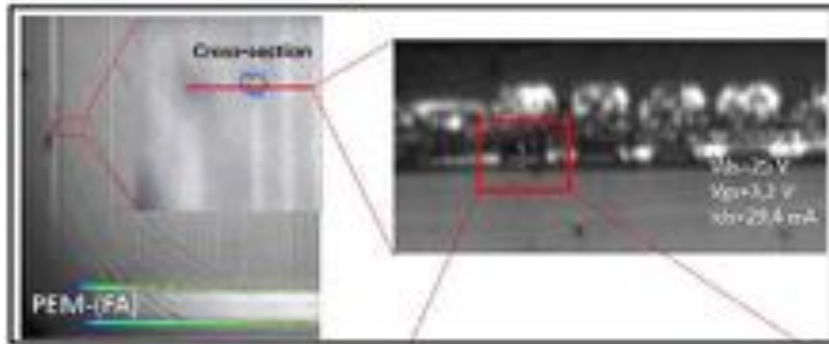
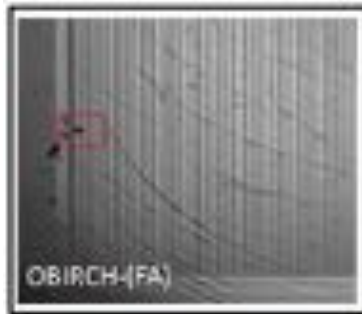


Original EMMI spot	Spectral mapping	Description
		Peak near spot = Diode in forward
		Comet like = MOS in saturation or thermal
		Flat shape = NMOS in intermediate state

Section droite

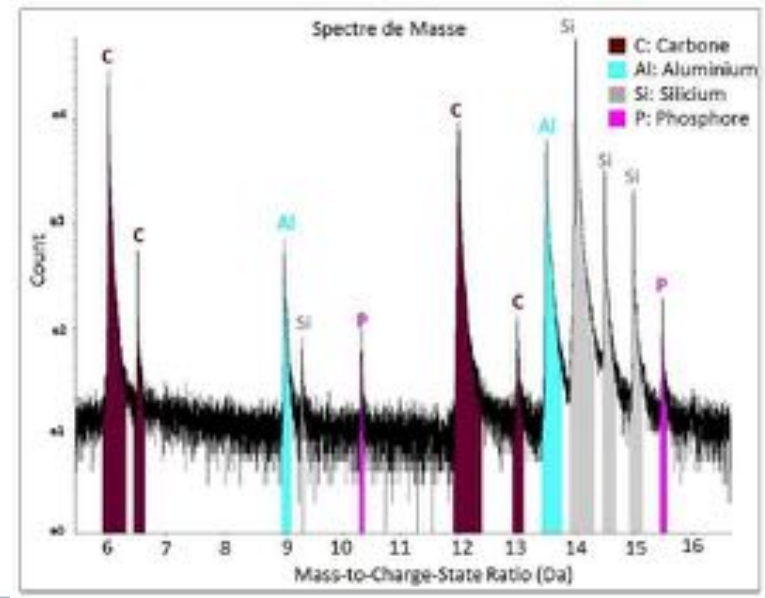
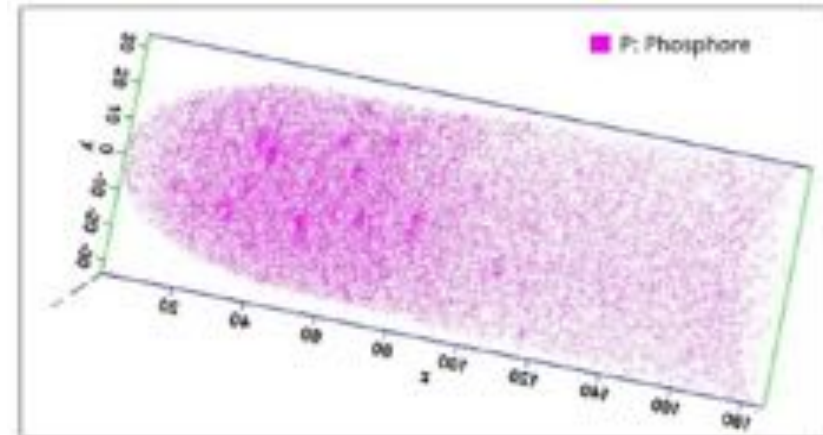
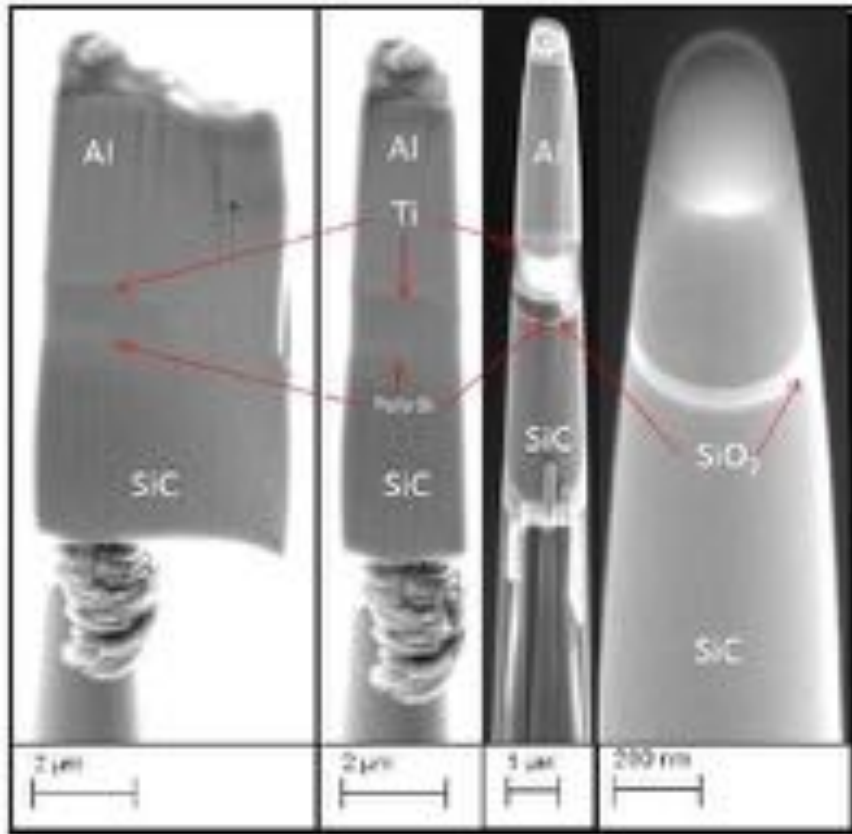


Localisation de défauts sur un MOSFET



Localisation de défauts sur un MOSFET

Mise en évidence du phosphore dans les caissons N+



Rapport des échelles

Stade de France

1 000 m

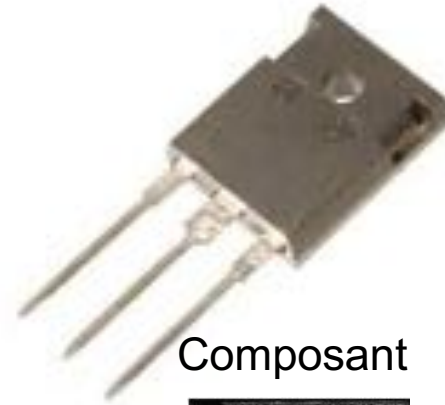


Pelouse

119 m



Boîtier TO 247



20 mm

Composant



2,38 mm

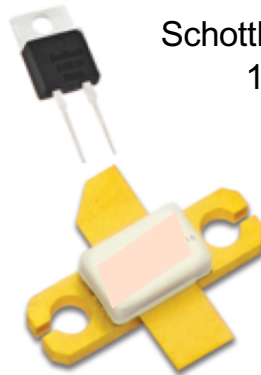
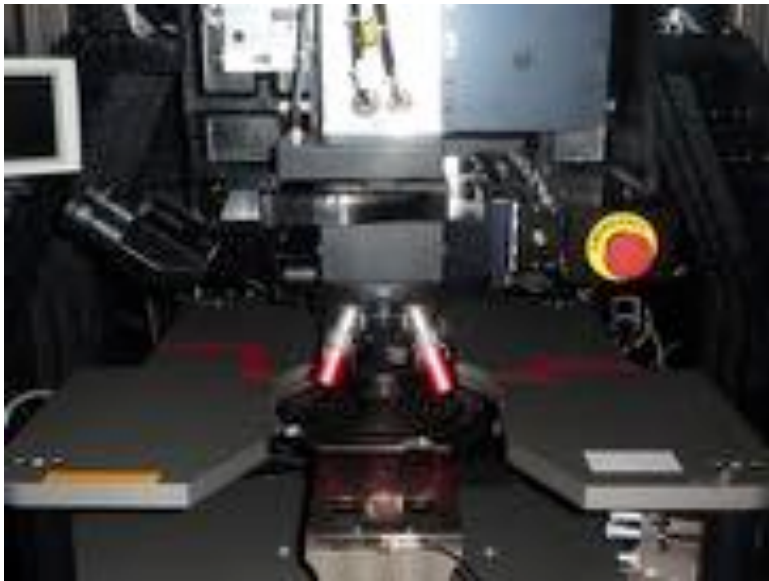
63 m



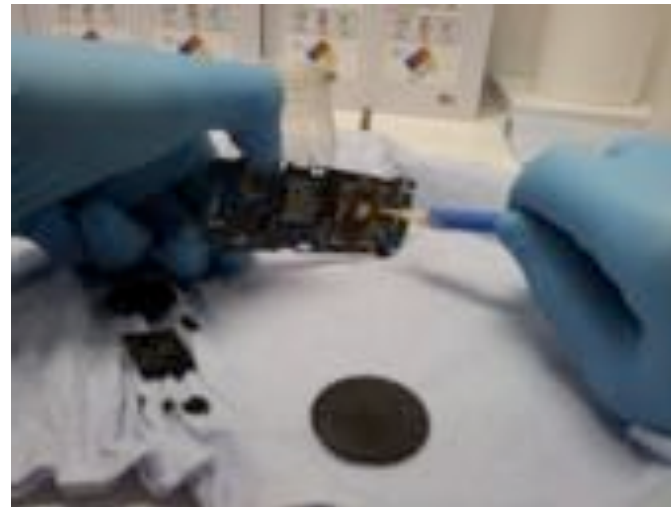
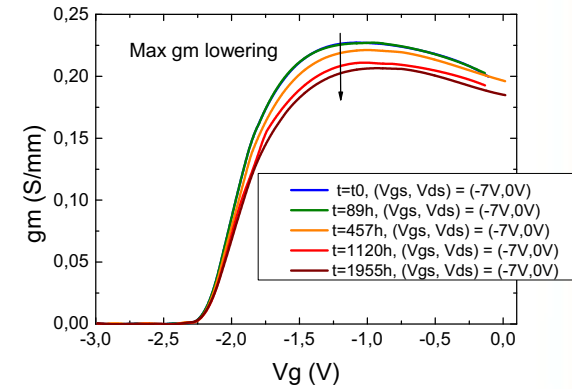
SiC
246 µm

Cuivre
1 270 µm

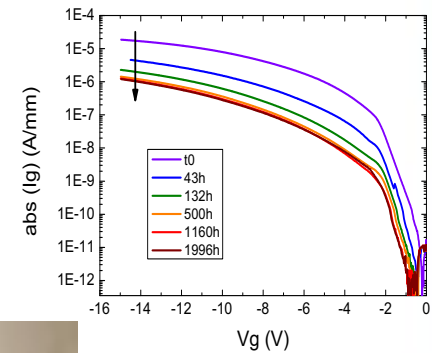
Thank you for your attention
 Merci pour votre attention



Schottky Diodes SiC
 1200V/5A



Mobile phone
 GSM



- [1] N. Moulitif, "Analyse de défaillance dans les transistors de puissance grand gap par électroluminescence spectrale," 2017.
- [2] N. Moulitif, E. Joubert, and O. Latry, "Reliability Study of Mechatronic Power Components Using Spectral Photon Emission Microscopy," *Adv Electromagn*, vol. 5, no. 3, pp. 20–24, 2016, doi: 10.7716/aem.v5i3.380.
- [3] N. Moulitif, E. Joubert, M. Masmoudi, and O. Latry, "Characterization of ESD Stress Effects on SiC MOSFETs Using Photon Emission Spectral Signatures," *2017 Annu Reliab Maintainab Symposium Rams*, pp. 1–7, 2017, doi: 10.1109/ram.2017.7889732.
- [4] N. Moulitif, A. Divay, E. Joubert, and O. Latry, "Reliability of High-Power Mechatronic Systems 2," pp. 241–271, 2017, doi: 10.1016/b978-1-78548-261-8.50008-5.
- [5] N. Moulitif, M. Masmoudi, E. Joubert, and O. Latry, "Reliability of High-Power Mechatronic Systems 2," pp. 155–197, 2017, doi: 10.1016/b978-1-78548-261-8.50005-x.
- [6] N. Moulitif, E. Joubert, M. Masmoudi, and O. Latry, "Characterization of HTRB stress effects on SiC MOSFETs using photon emission spectral signatures," *Microelectron Reliab*, vol. 76, pp. 243–248, 2017, doi: 10.1016/j.microrel.2017.07.013.
- [7] N. Moulitif, E. Joubert, and O. Latry, "SiC MOSFET robustness to ESD study: Correlation between electrical and spectral photo-emission characterizations," *2018 19th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)*, pp. 260–264, 2018, doi: 10.1109/melcon.2018.8379104.
- [8] W. Jouha, "Etude et modélisation des dégradations des composants de puissance grand gap soumis à des contraintes thermiques et électriques," 2019.
- [9] W. Jouha, P. Dherbecourt, E. Joubert, and A. E. Oualkadi, "Static Behavior Analysis of Silicon Carbide Power MOSFET for Temperature Variations," *2016 Int Conf Electr Information Technologies Iceit*, pp. 276–280, 2016, doi: 10.1109/eitech.2016.7519605.
- [10] W. Jouha, A. E. Oualkadi, P. Dherbecourt, E. Joubert, and M. Masmoudi, "A New Extraction Method of SiC Power MOSFET Threshold Voltage Using a Physical Approach," *2017 Int Conf Electr Information Technologies Iceit*, pp. 1–6, 2017, doi: 10.1109/eitech.2017.8255289.
- [11] W. Jouha, A. E. Oualkadi, P. Dherbcourt, E. Joubert, and M. Masmoudi, "Silicon Carbide Power MOSFET Model: An Accurate Parameter Extraction Method Based on the Levenberg Marquardt Algorithm," *IEEE T Power Electr*, vol. 33, no. 11, pp. 9130–9133, 2018, doi: 10.1109/tpel.2018.2822939.
- [12] P. Dherbecourt *et al.*, "New Technologies of Power Transistors for Efficiency Increase of Power Converters: The Reliability Consideration," 2019, doi: 10.4108/eai.24-4-2019.2284211.
- [13] W. Jouha, A. E. Oualkadi, P. Dherbecourt, M. Masmoudi, and E. Joubert, "In-depth analysis of the static behaviour of a SiC MOSFET and of its associated parameters using both compact modelling and physical simulation," *IET Circuits Devices Syst*, vol. 14, no. 2, pp. 222–228, 2020, doi: 10.1049/iet-cds.2018.5509.
- [14] W. Jouha, M. Masmoudi, A. E. Oualkadi, E. Joubert, and P. Dherbecourt, "Physical Study of SiC Power MOSFETs Towards HTRB Stress Based on C-V Characteristics," *IEEE T Device Mat Re*, vol. 20, no. 3, pp. 506–511, 2020, doi: 10.1109/tdmr.2020.2999029.
- [15] S. Mbarek, "Fiabilité et analyse physique des défaillances des composants électroniques sous contraintes électro-thermiques pour des applications en mécatronique.," 2017.
- [16] S. Mbarek, F. Fouquet, P. Dherbecourt, M. Masmoudi, and O. Latry, "Gate oxide degradation of SiC MOSFET under short-circuit aging tests," *Microelectron Reliab*, vol. 64, pp. 415–418, 2016, doi: 10.1016/j.microrel.2016.07.132.
- [17] S. Mbarek, P. Dherbecourt, O. Latry, and F. Fouquet, "Short-circuit robustness test and in depth microstructural analysis study of SiC MOSFET," *Microelectron Reliab*, vol. 76, pp. 527–531, 2017, doi: 10.1016/j.microrel.2017.07.002.
- [18] J.S. Duguay, A. Echeverri, C. Castro, and O. Latry, "Evidence of Mg segregation to threading dislocation in normally-off GaN-HEMT," *IEEE Transactions on Nanotechnology*, pp. 1–1, 2019, doi: 10.1109/tnano.2019.2942400.