

life.augmented



Le MEB et l' Analyse de Construction de dispositifs semiconducteurs de puissance. Jeux de contrastes.

03/12/2024

Philippe MARTINEZ

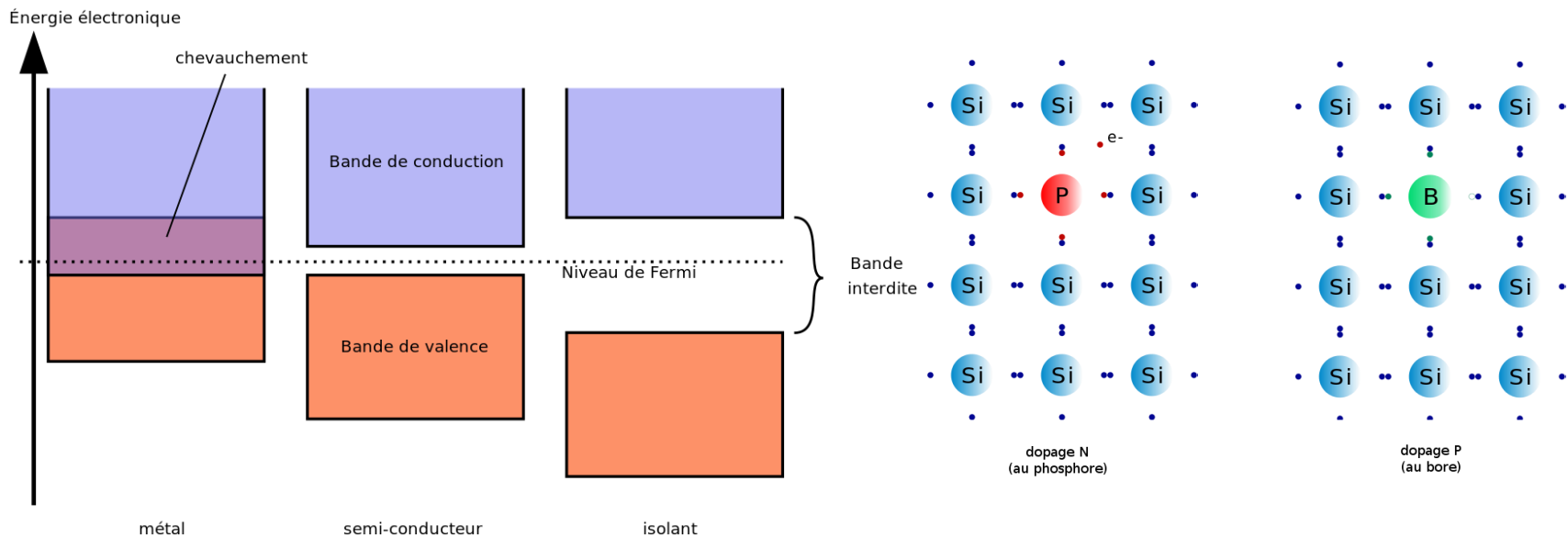


présentation journées pédagogiques du GNMEBA

Un semi-conducteur (SC) c'est quoi ?

1

- ❑ Un semi-conducteur est un matériau qui a les caractéristiques électriques d'un isolant, mais pour lequel la probabilité qu'un électron puisse contribuer à un courant électrique, quoique faible, est suffisamment importante. Les SC classiques sont le Si, Ge et les composés III-V du tableau périodique comme le GaN par exemple.

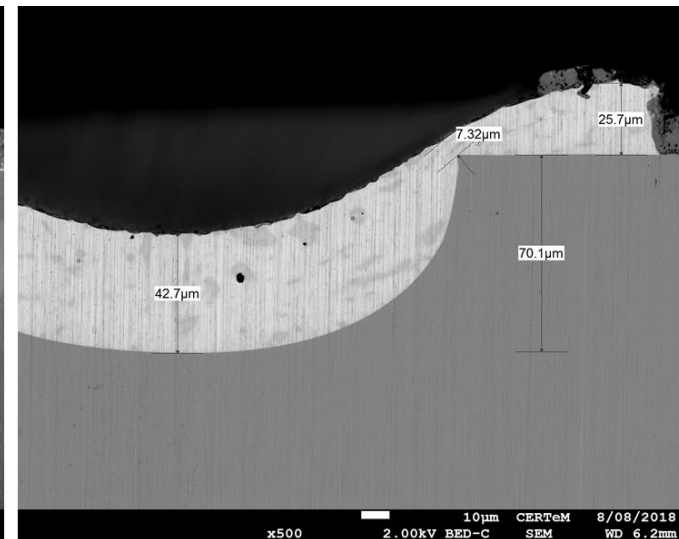
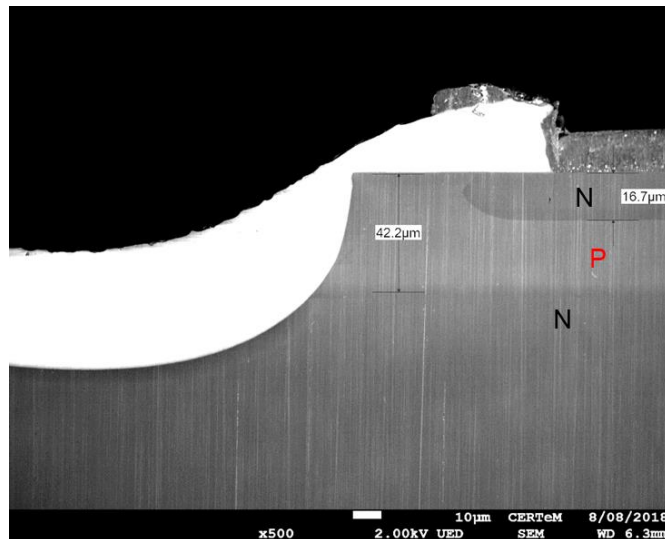
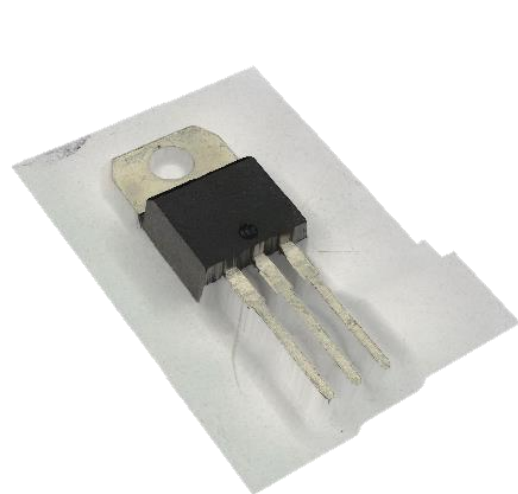


- ❑ Des matériaux isolants peuvent devenir SC par dopage. Ex : Diamant dopé B

Contexte

3

- ❑ Observation au MEB de dispositifs semiconducteurs de puissance: Analyse Physique (brique process) et Analyse de Construction (dispositif complet).
- ❑ Types de matériaux observés (cristallin ou pas): silicium dopé P ou N, poly silicium, couches de passivation minérales (SiO_2 , Si_3N_4 , Verre, Sipos..), passivations organiques BCB, LCT etc.. et couches de métallisation (Al, Pt, Cu, Ti, Ni, Ag, Au, W etc..)
- ❑ Préparation des échantillons et optimisation des observations au Microscope Electronique à balayage (Jeux de contrastes)



principe de fabrication d'un dispositif semiconducteur (diode bipolaire « circuit intégré »)

4

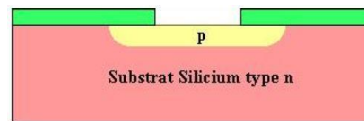
- Alternance d'étapes de dépôt de couches minces et d'étapes de photolithographie (et quelques opérations d'implantation ionique ou diffusion)



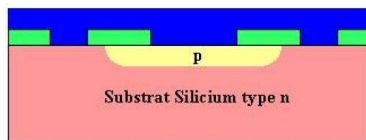
1) Oxydation du Silicium



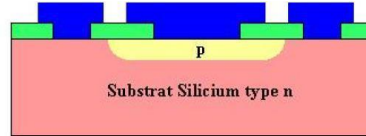
2) Etape de photogravure de la couche d'oxyde



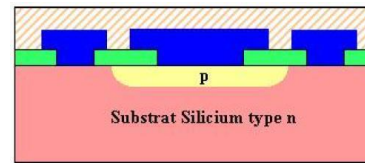
3) Implantation ionique + recuit d'activation



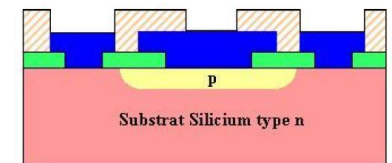
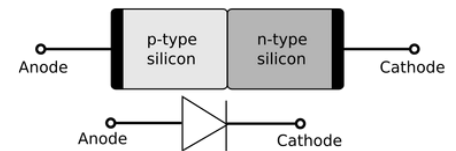
4) Dépôt d'aluminium



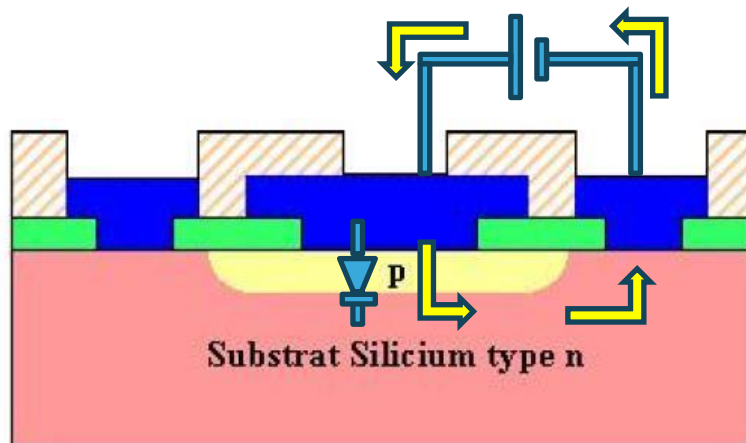
5) Etape de photogravure de la couche d'Aluminium



6) dépôt d'une passivation



7) Etape de photogravure de la couche de passivation



circuit intégré: Conduction du courant latérale en surface du substrat (quelques microns).

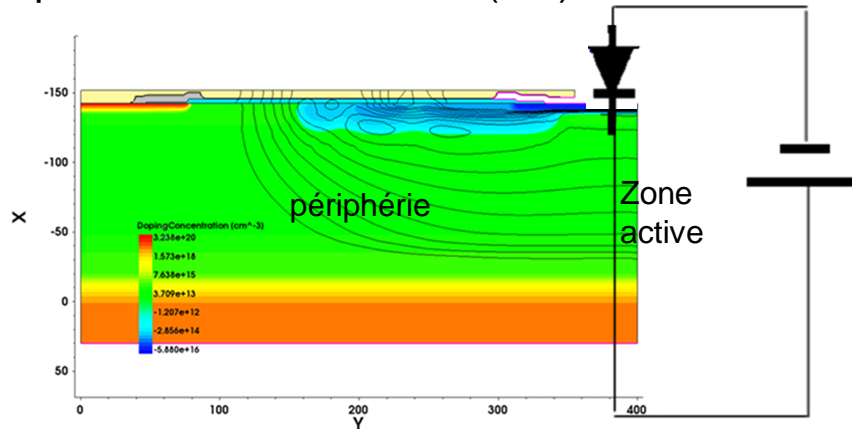
caractéristiques d'un composant de puissance

5

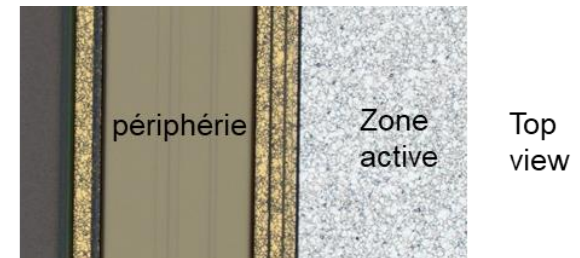
Caractéristiques d'un **composant de puissance deux couches** (Redresseur, Transil, etc.) :

- **Tenir des tensions inverses fortes** d'environ 1000 volts et des courants en direct importants
- **Conduction transversale, de la face avant vers la face arrière de la puce, courant circulant dans presque tout le volume de la puce.**
- Structure présentant une « **périphérie** » et une « **zone active** »
- La périphérie (large d'environ 400µm sur le pourtour de la puce) a pour but d'isoler, de protéger le dispositif et d'étaler les lignes de champ en surface afin d'atteindre les tensions blocables requises tout en limitant les courants de fuite (en inverse).

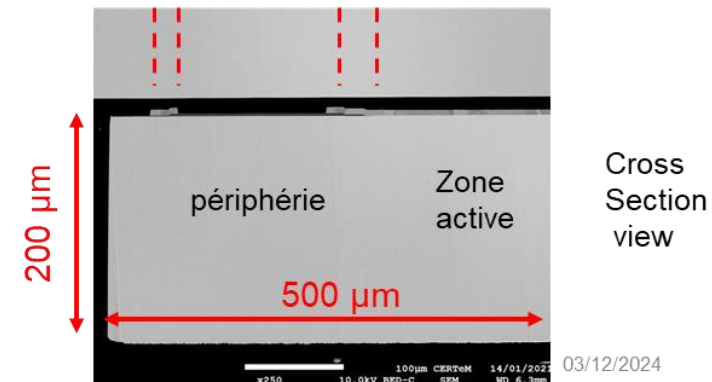
Composant à deux couches (PN) diode de redressement



Simulation de l'extension des lignes de champ en polarisation inverse d'un redresseur (vue en cross section)



Top view

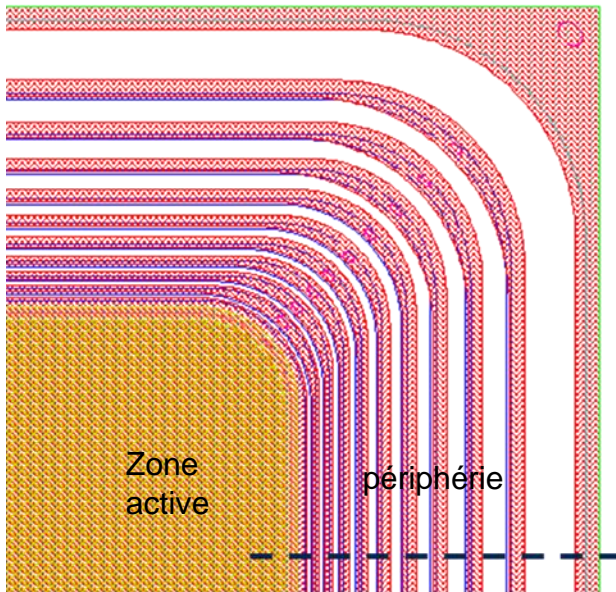


Cross Section view

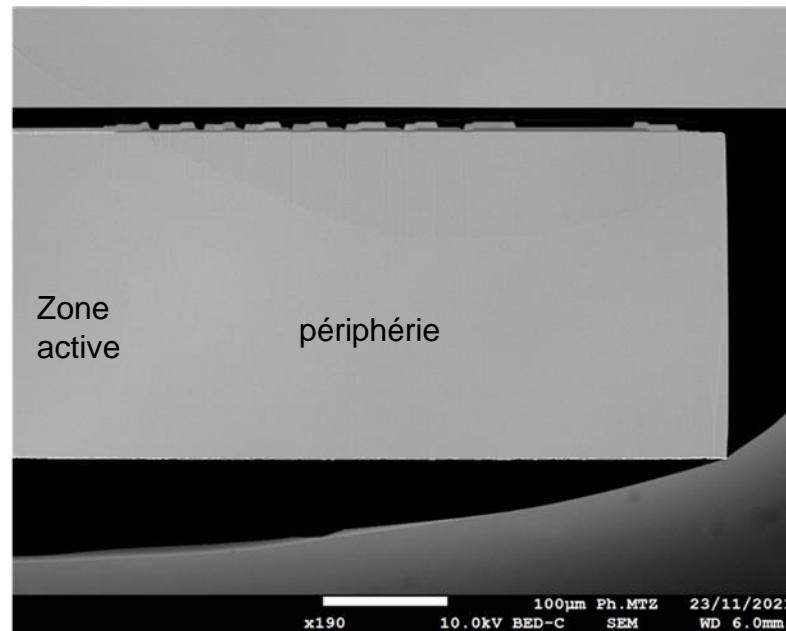
caractéristiques d'un composant de puissance

6

BiB cross section



Top view



Cross Section view

Caractéristiques d'un **composant de puissance 4 couches** (NPNP):

Les composants à quatre couches (thyristor triac trisil et autres) ont les mêmes caractéristiques que celles citées précédemment avec en plus **des niveaux de photolithographie sur la face avant et sur la face arrière** ainsi que **des jonctions profondes** (caissons traversants) en périphérie (jonctions allant jusqu'à 130 µm de profondeur avec des process de diffusion longs et à haute température 1280°C)

Pour effectuer une analyse de construction complète de tous ces dispositifs on procède à une observation top view mais aussi , et c'est le plus important, à une **observation en cross section de la totalité de la périphérie et d'une partie de la zone active** du composant. Ceci afin d'analyser l'empilement des couches minces, les pentes de ces couches au niveau des ouvertures (photolithographie), les interfaces et les passages de marche. Ceci sur les deux faces de la puce. Nous sommes également intéressés par la visualisation en 2D des zones de diffusion (zones dopées P et dopées N) ainsi que celles de défauts cristallins éventuels.

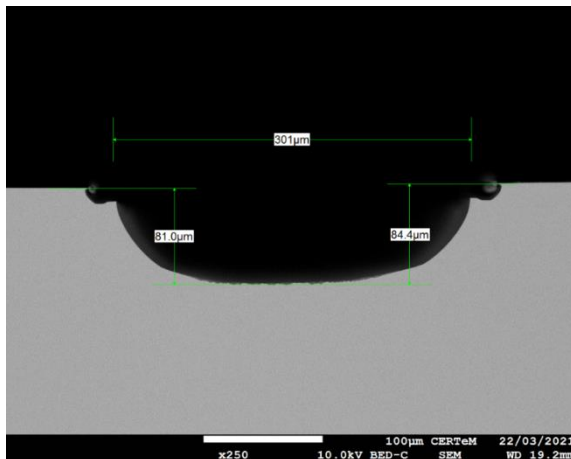
- **La zone à observer en cross section sera donc une surface d'environ 0.1 à 1 mm².**
- D'autres types de composants dits « de puissance » intègrent des composants passifs et (ou) des structures 3D. Les zones à observer en cross section pour ces composants représentent une surface qui reste du même ordre de grandeur (jusqu'à 1mm²).

Quatre solutions pour la préparation:

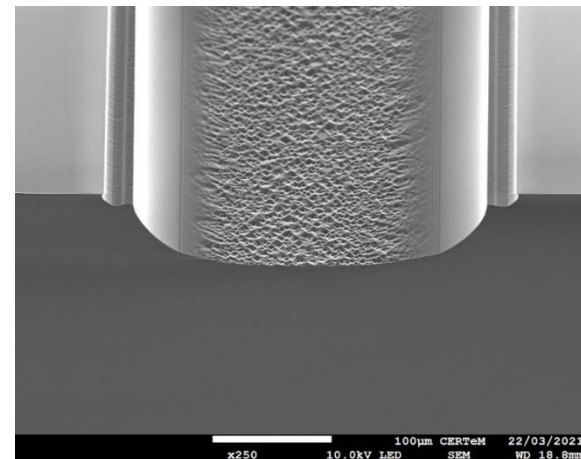
1. **Le clivage:**
2. **Le polissage mécanique**
3. **Le FIB (focus ion beam)**
4. **Le BiB (broad ion beam)**

❑ **Le clivage**

Le clivage s'effectue facilement selon la direction des plans cristallins du substrat lorsque on a peu de contraintes résiduelles dans la structure, ce qui est rarement le cas sur une structure complète : ci-dessous, un exemple de clivage facile sur une plaquette de silicium sillonnée, le silicium est à nu sans couches minces déposées (pas de contraintes résiduelles):



Cross section view



Tilted view

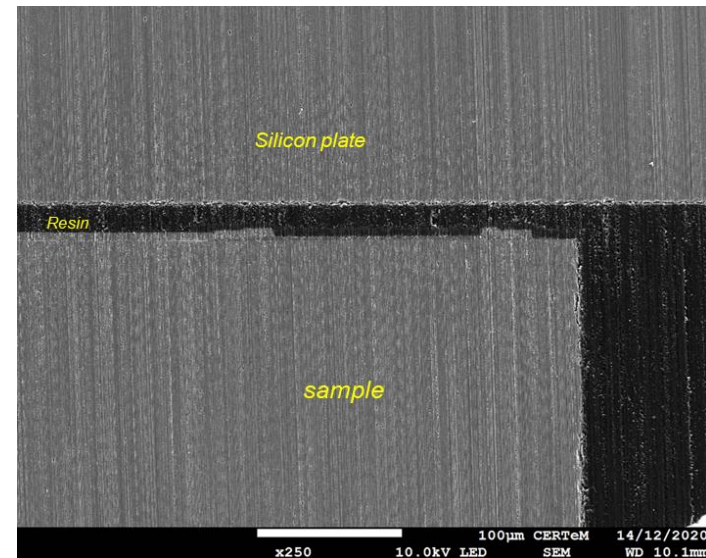
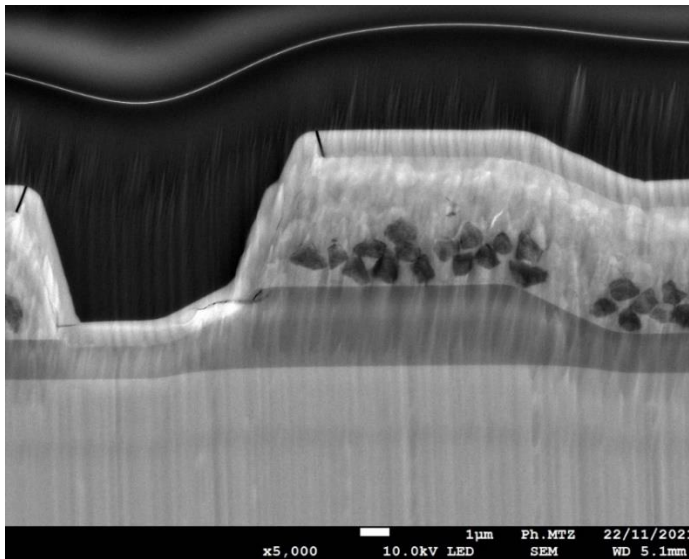
□ Le polissage mécanique

1. Avantages

- Grande section observable (totalité de la puce, quelques mm²)
- Préparation d'échantillon relativement facile mais longue (pour une finition « propre »)

1. Limitations

- Qualité de l'état de surface (rayures) limitant les observations à fort grossissement.
- Surface des matériaux ductiles écrouie (« beurrage » des métallisations)
- Contraintes mécaniques du polissage pouvant induire des défauts type « cracks » (fissures dans les matériaux « durs » type oxydes, passivations minérales et silicium).



Après polissage mécanique

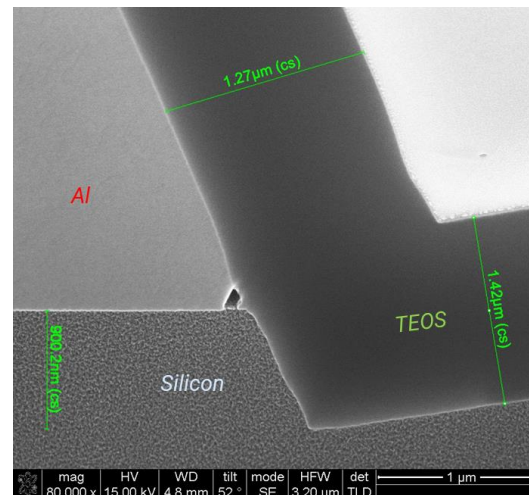
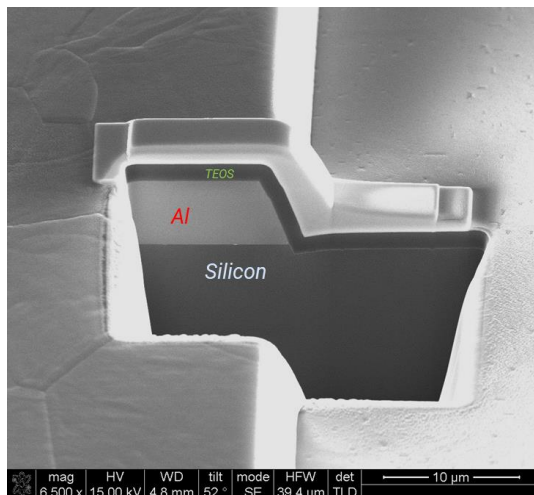
❑ Le FIB

1. Avantages

- Faisceau focalisé → localisation de la découpe précise, inférieure au micron
- Délinéation par gravure sélective in situ (injection localisée de gaz fluoré)
- Préparation d'échantillon facile et rapide
- Etat de surface de qualité finition ionique

1. Limitations

- Vitesse de gravure « lente », méthode bien adaptée à l'analyse de défaillance ***pour des coupes proches de la surface*** avec localisation précise de la zone de coupe
- ***Pas de possibilité de polir une grande section (1mm²) dans son ensemble.***
- Nécessité de graver une boîte, observation avec tilt 52°.
- Pas de possibilité de détecteur d'électrons rétrodiffusés sous la lentille objectif (à cause du tilt à 52°)
- Résolution EDX (mapping)



1. Le polissage mécanique + BiB (Broad Ion Beam)

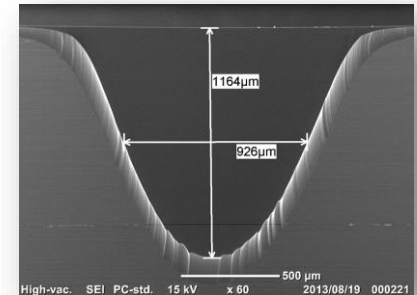
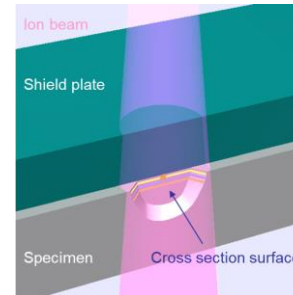
❑ **Description:** polissage ionique perpendiculaire à l'échantillon à l'aide d'un masque.

❑ Avantages

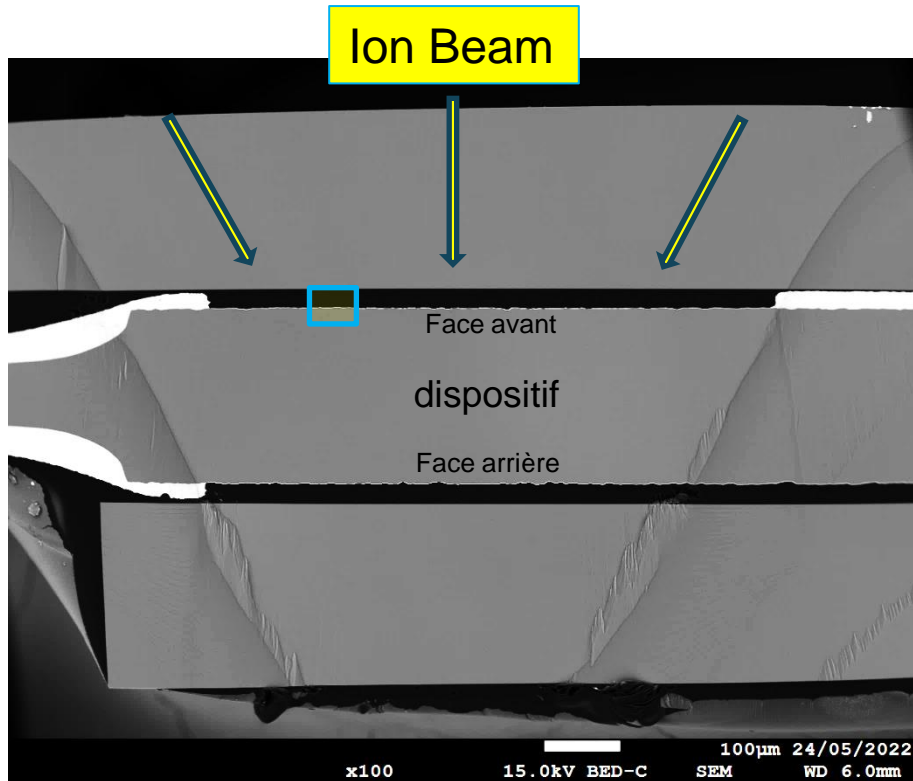
- Vitesse de gravure « rapide »
- Section de gravure large de l'ordre de quelques mm²
- Etat de surface de qualité finition ionique
- Zone de la section « ouverte » → détecteur rétrodiffusé sous la lentille avec possibilité de travailler à faible distance de travail. Mapping EDX sans pb de fluorescence X.
- Swing de l'échantillon supprimant le « curtaining »
- Pas de « faceting »
- Bonne reproductibilité
- Retrait d'environ 100µm de matière (suffisant pour supprimer tous les dommages du polissage)

❑ Limitations

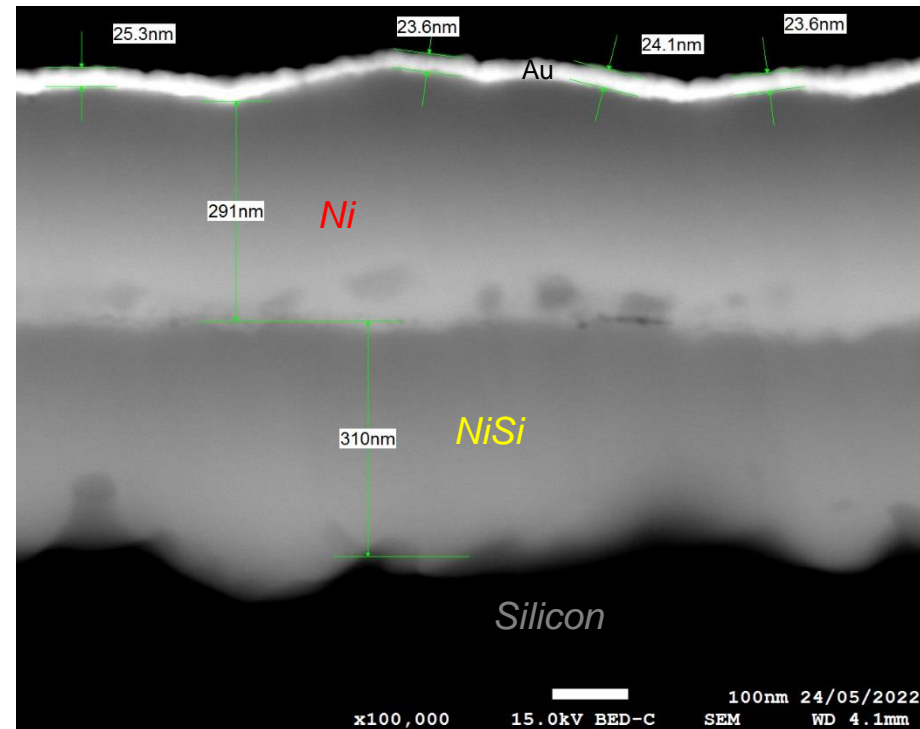
- Faisceau divergent → nécessité d'utiliser un masque → localisation de la zone découpe à 10 microns près (peu précise)
- Préparation d'échantillon nécessitant un polissage mécanique µsection puce initial.
- Nécessité d'encapsuler dans la plupart des cas (quand la surface de l'échantillon n'est pas plane)
- → préparation d'échantillon délicate



préparation des échantillons

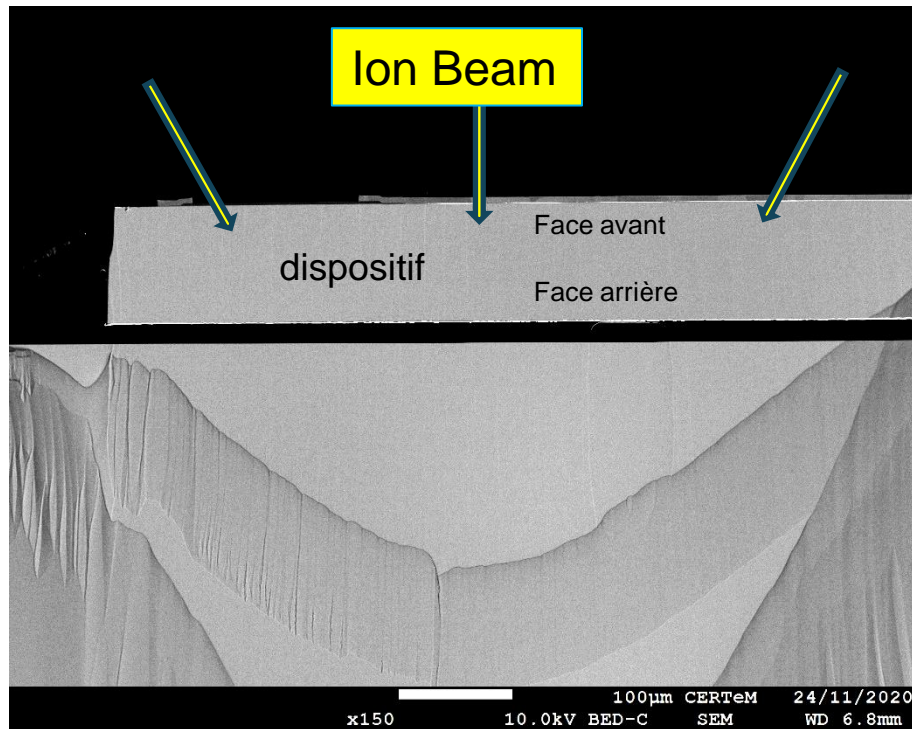


Dispositif « encapsulé » pour supprimer les effets de « curtaining »

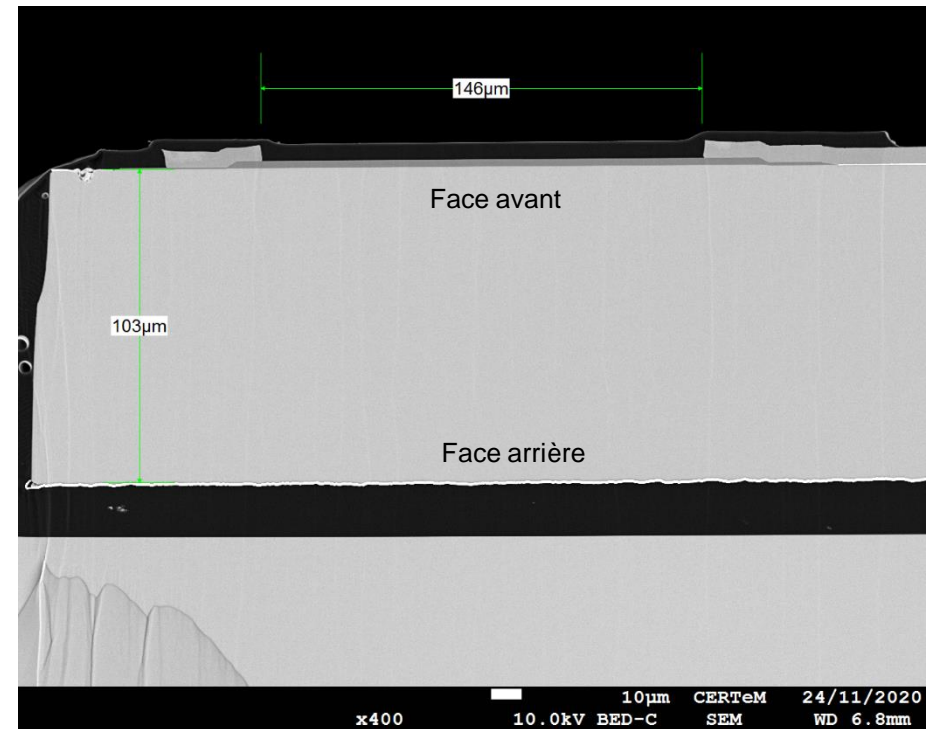


Qualité du polissage constante sur toute la large zone de découpe: ici un focus sur la métallisation de la face avant avec la visualisation d'une couche d'or fine (environ 20nm)

préparation des échantillons



Dispositif « non encapsulé »



Qualité du polissage constante sur toute la large zone de découpe.

préparation des échantillons

14

1. Le polissage mécanique + BiB (Broad Ion Beam)

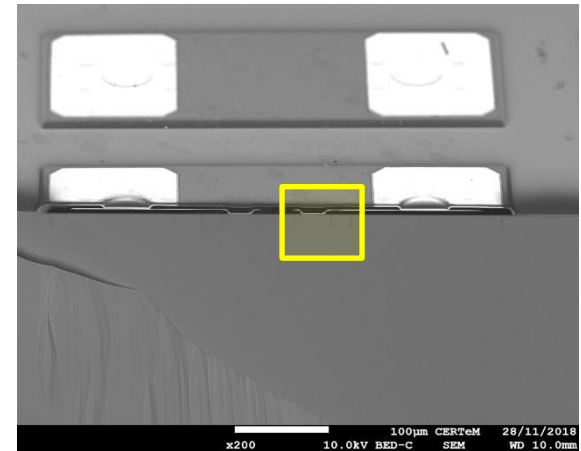
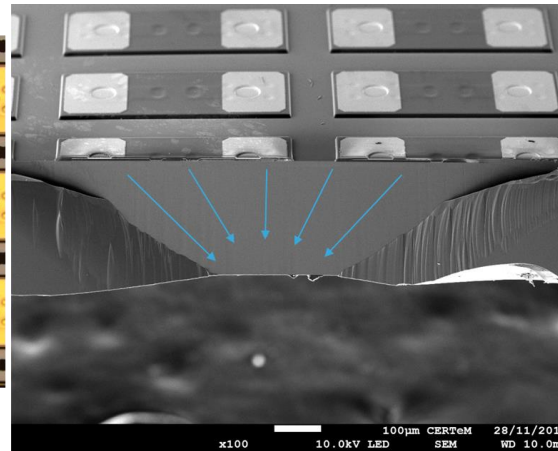
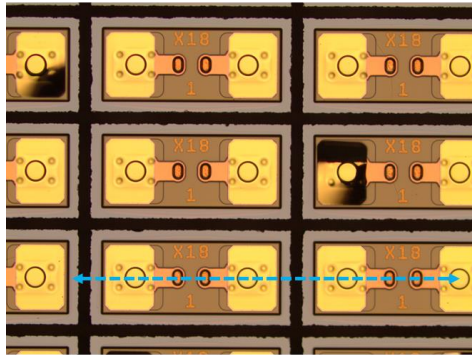


Image EDS en superposition 1

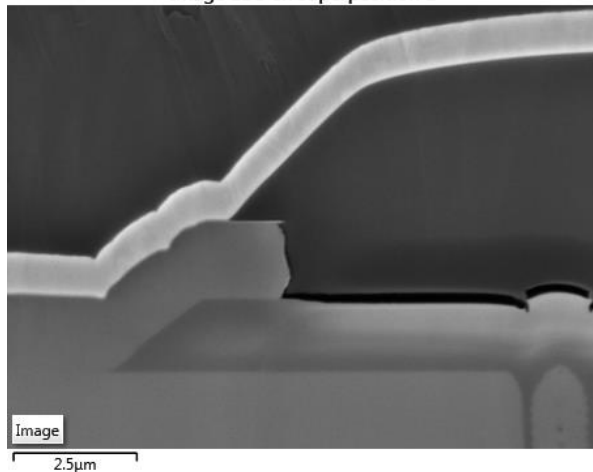
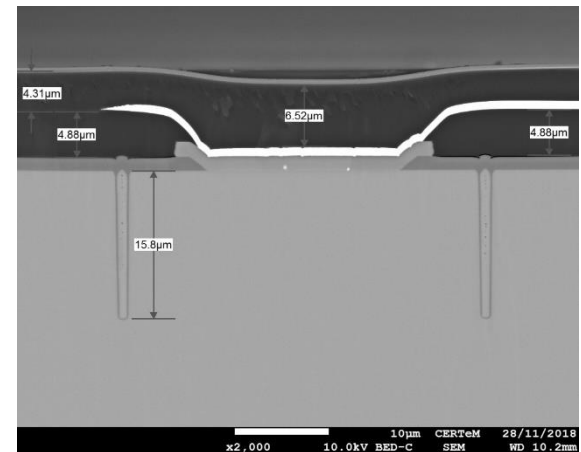
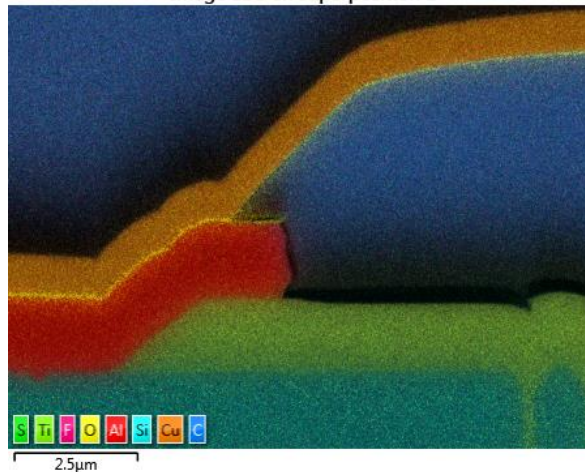


Image EDS en superposition 1



Echantillon plat « non encapsulé »

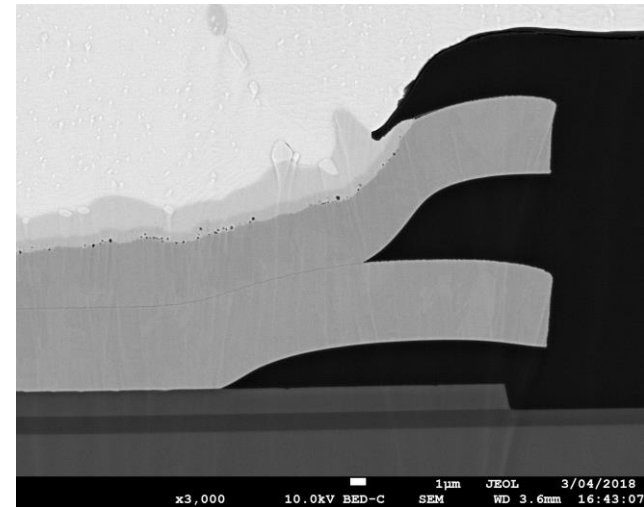
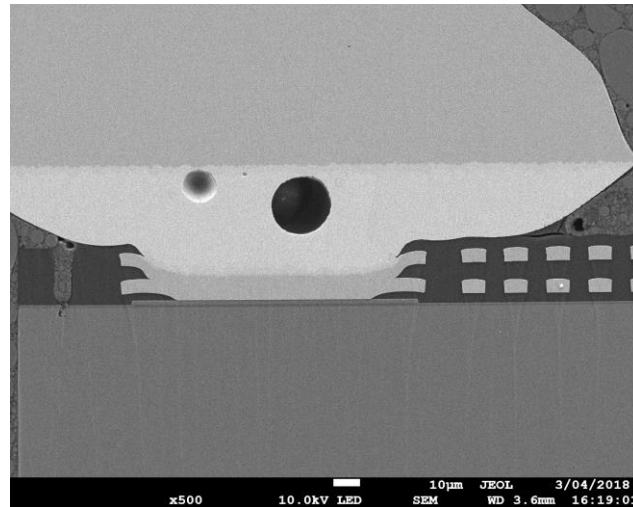
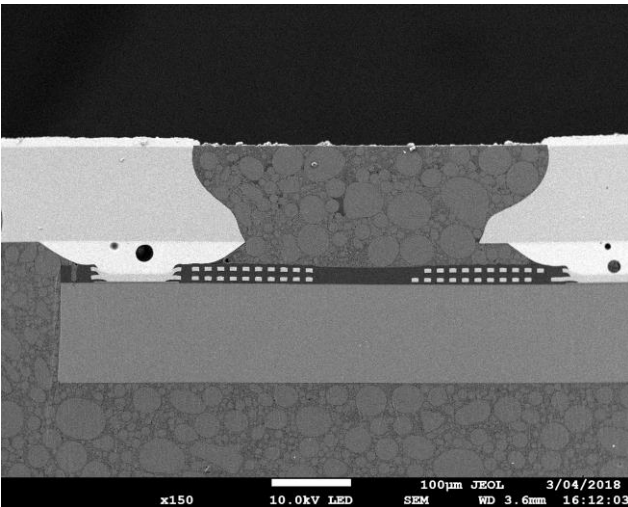


Image EDS en superposition 1

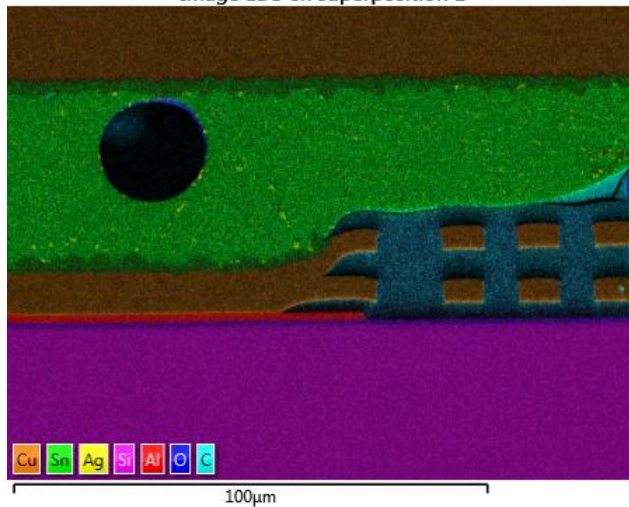
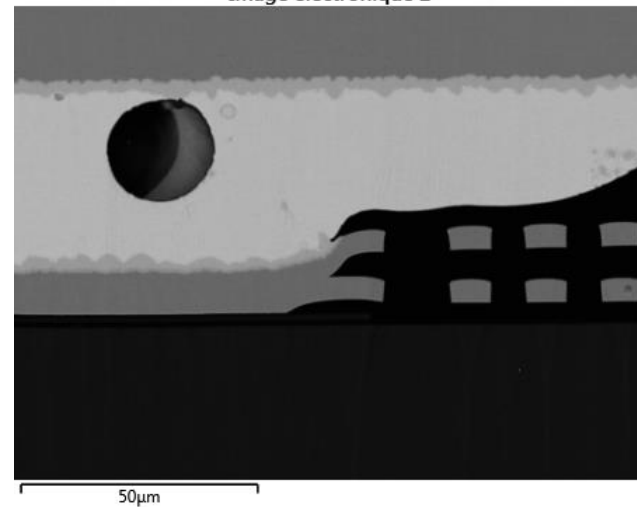


Image électronique 2

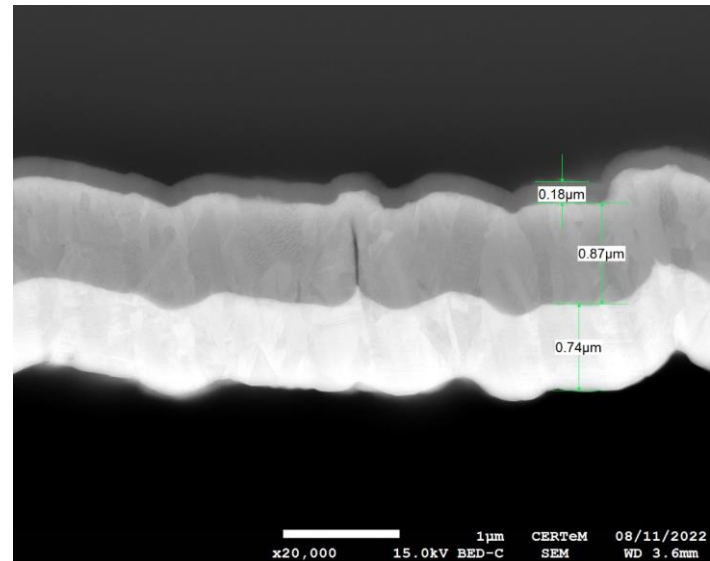
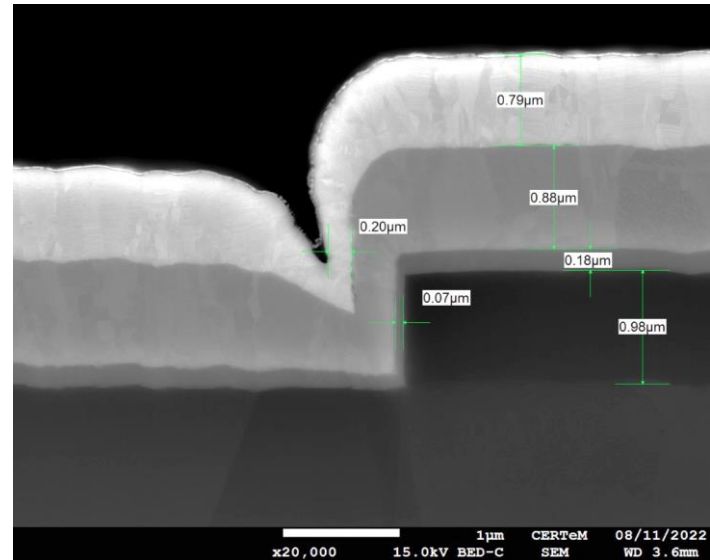
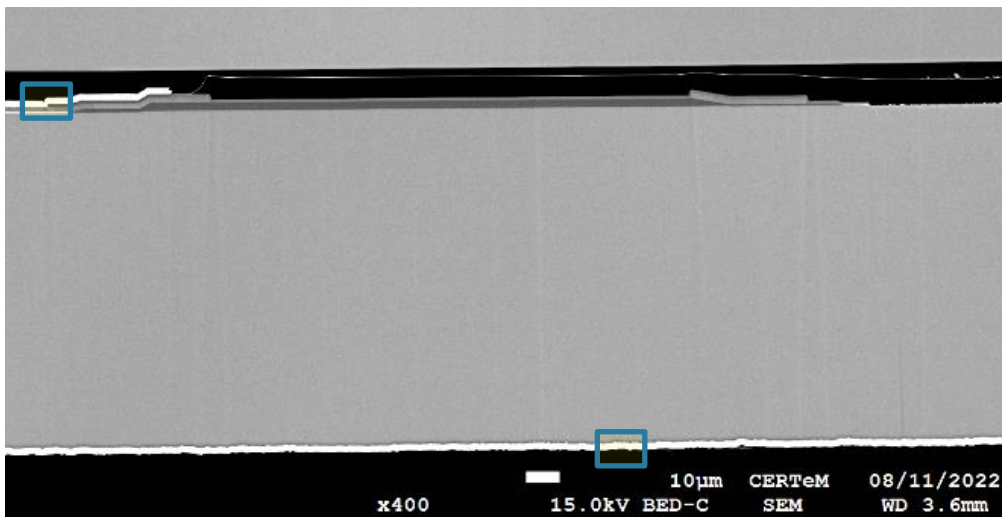


Dispositif coupé sans encapsulation (boîtier plat)

préparation des échantillons

16

- Imagerie BSE

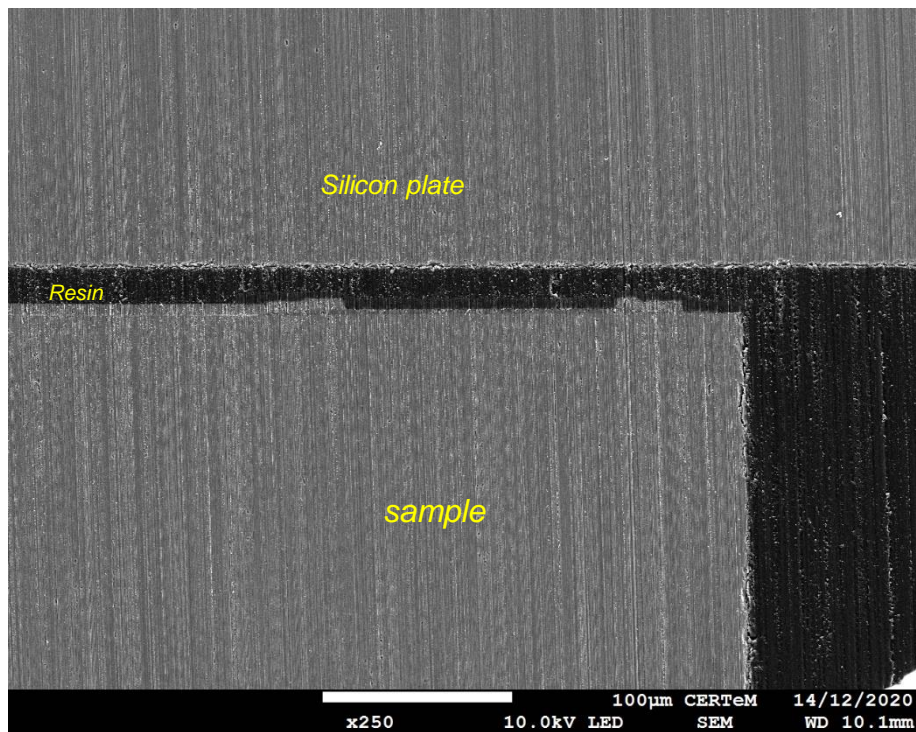


Qualité du polissage constante sur toute la large zone de découpe: ici un focus sur la métallisation de la face avant et la métallisation de la face arrière

préparation des échantillons

17

Après polissage ionique

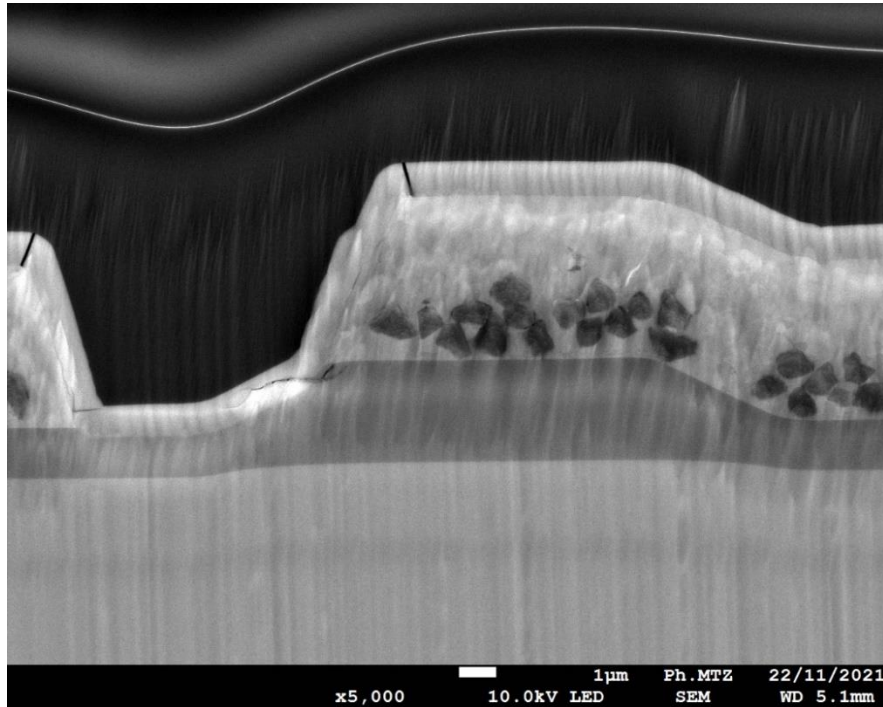


Après polissage mécanique

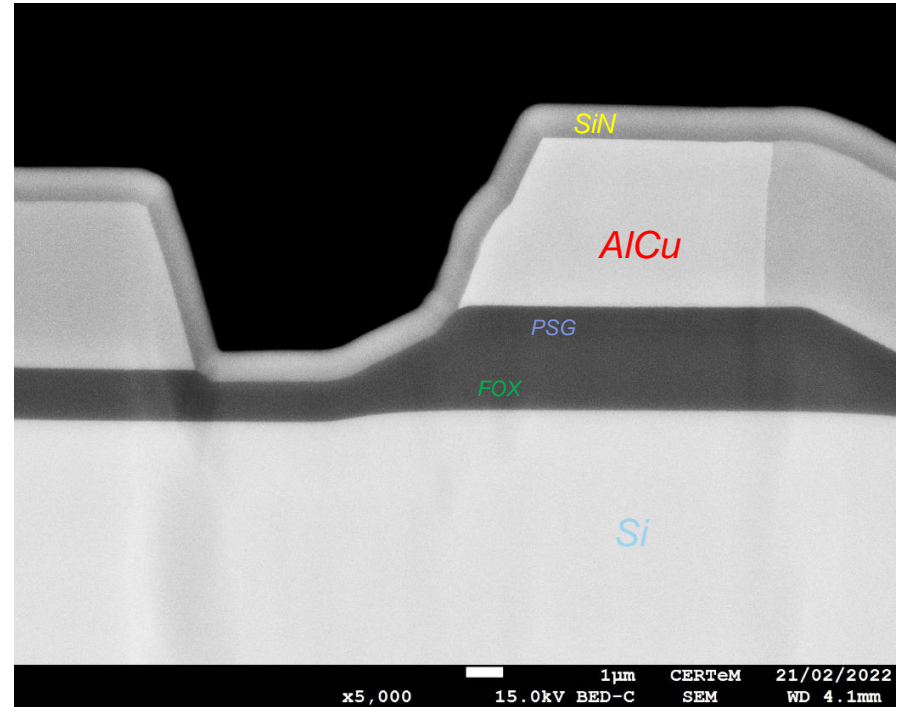


polissage mécanique + BiB (Broad Ion Beam)

Après polissage mécanique



après polissage BiB



- On constate après polissage mécanique des fissures sur les couches dures (SiN) empilées sur des couches de matériaux ductiles comme l'aluminium ainsi qu'un « beurrage » des matériaux ductiles (grains d'abrasif incrustés dans l'aluminium)
- ***Tous les défauts induits par le polissage mécanique disparaissent après polissage Ionique (BiB).***

préparation des échantillons

19

1. Le polissage mécanique + BiB (Broad Ion Beam)

Image EDS en superposition 3

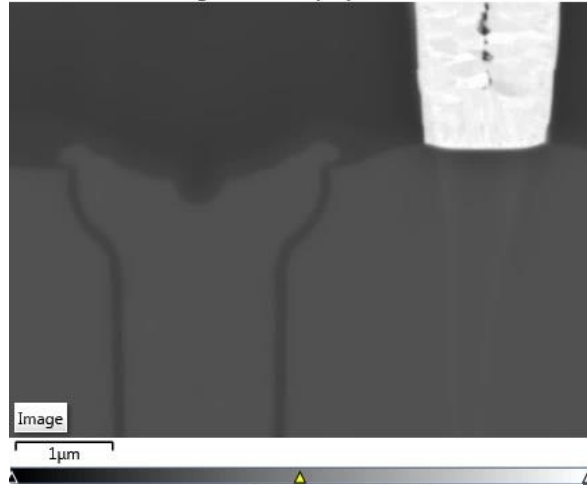


Image EDS en superposition 5

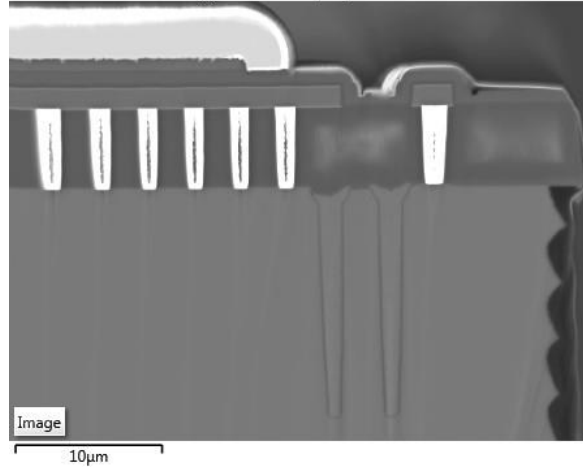
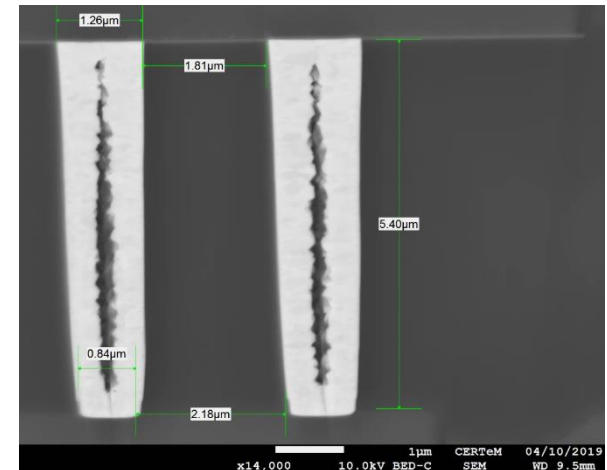
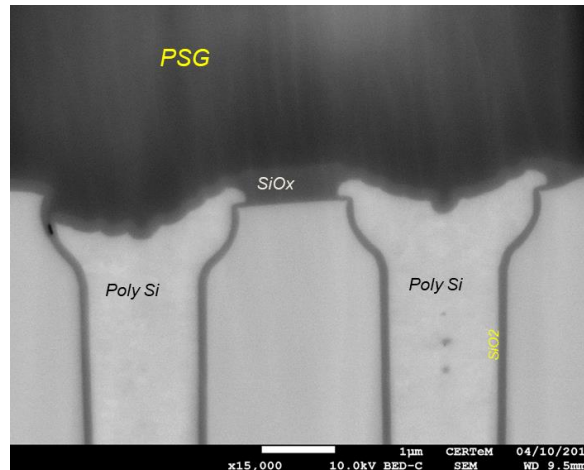
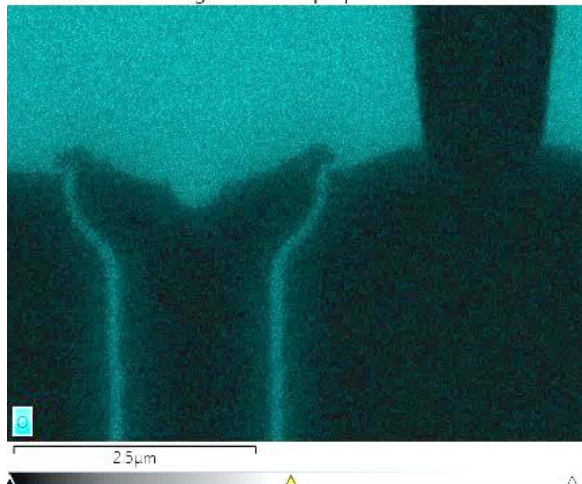


Image EDS en superposition 5

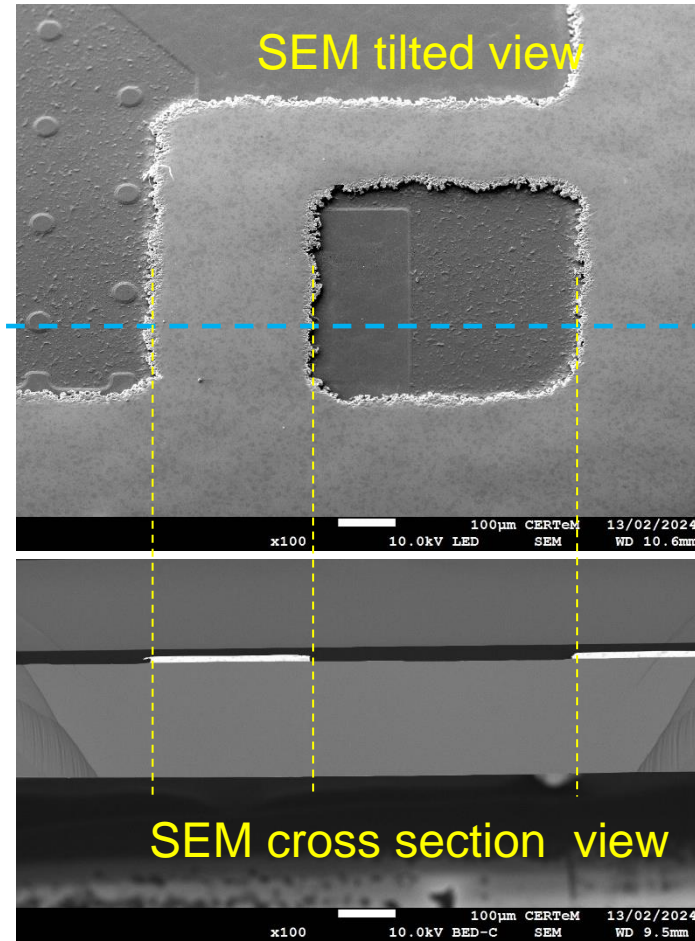
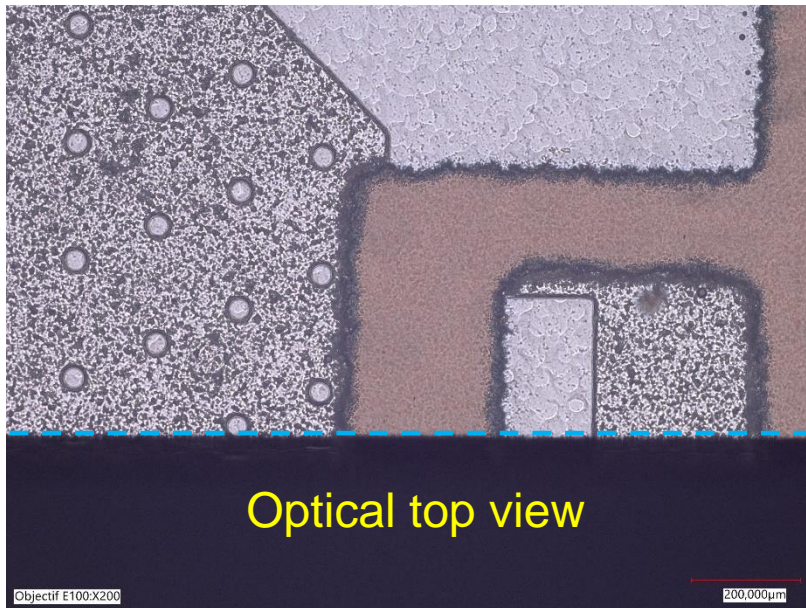


Image EDS en superposition 3



préparation des échantillons

20

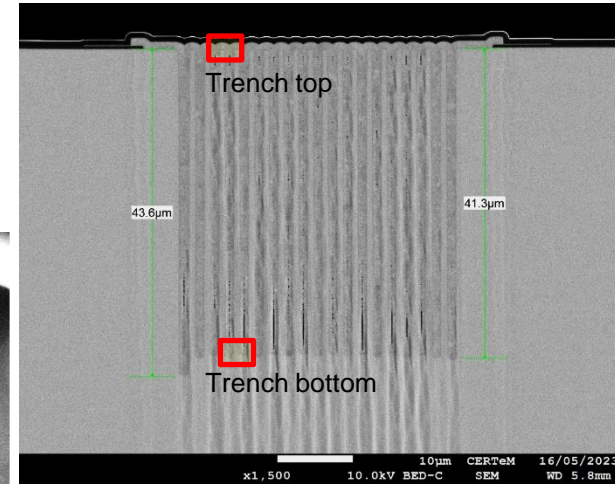
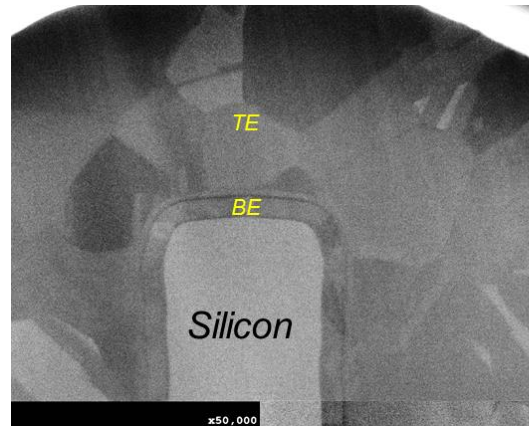


Cross
section
line

préparation des échantillons

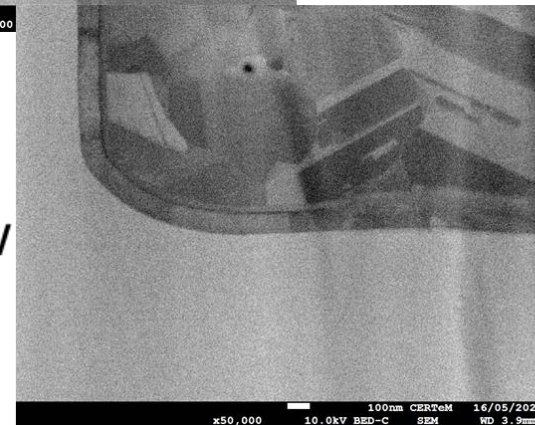
21

Top view



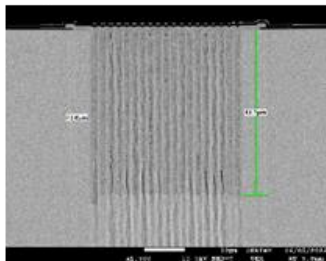
Trench top

Cross section view



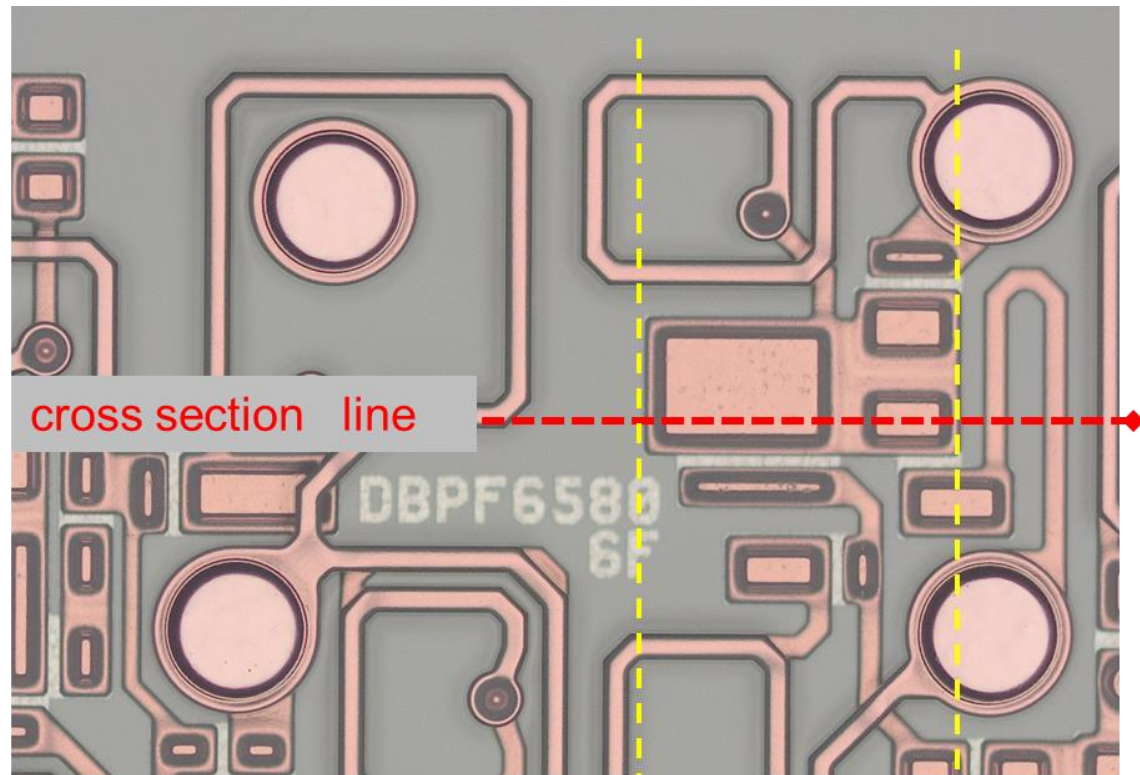
Trench bottom

linear capacitor

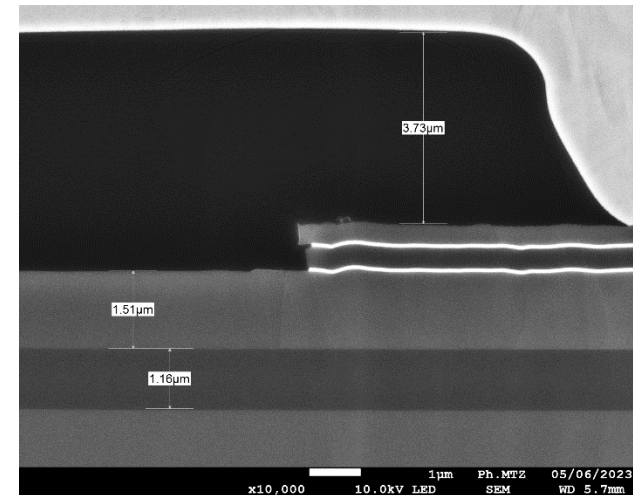
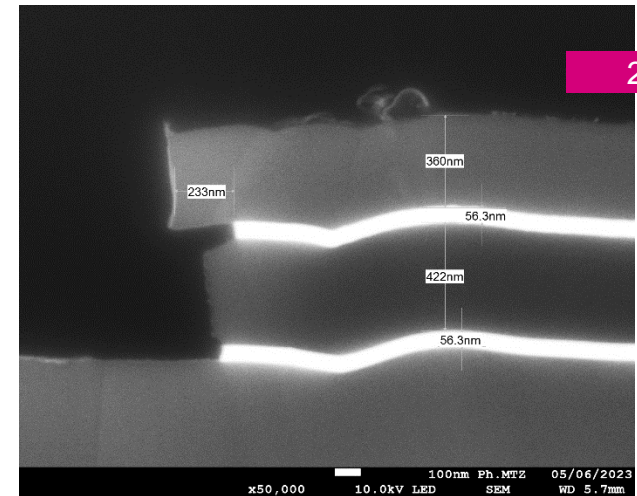
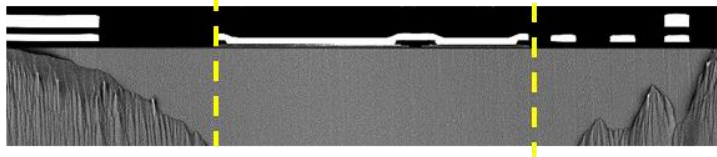


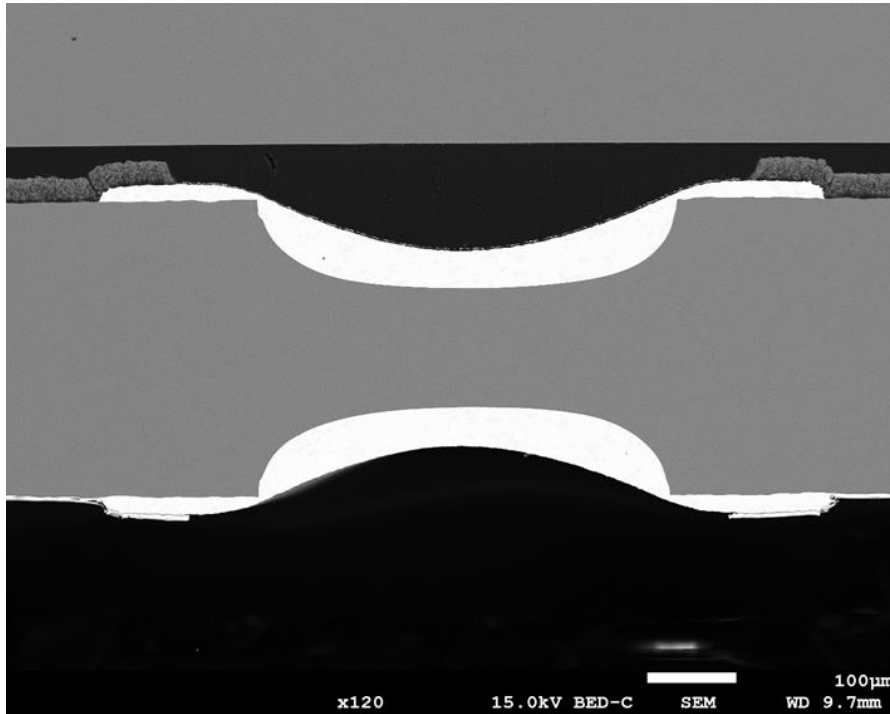
préparation des échantillons

22

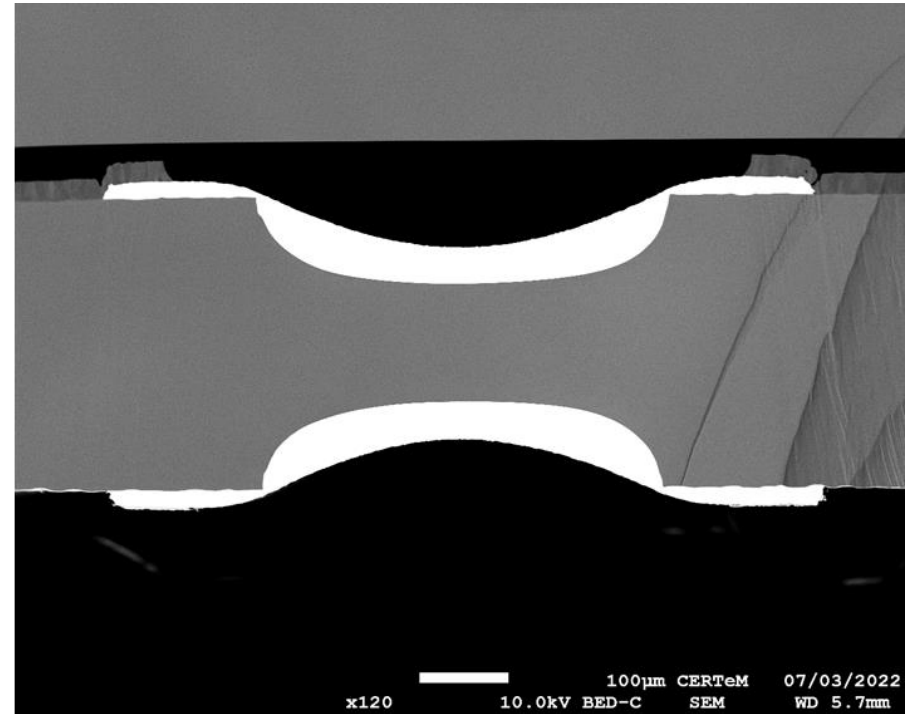


BiB cross section





After mechanical polishing

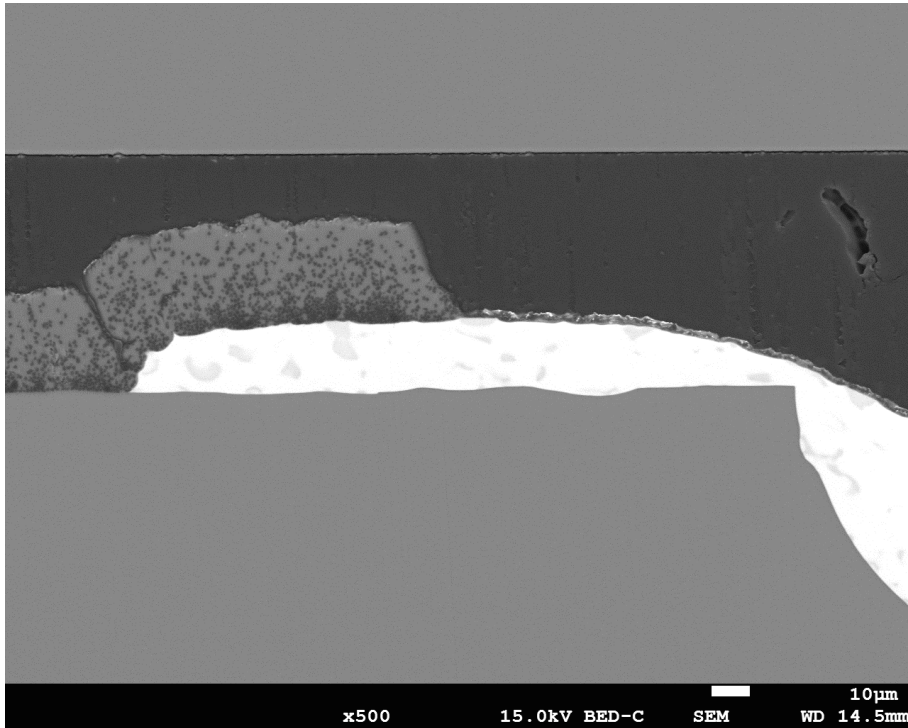


After mechanical + BIB polishing

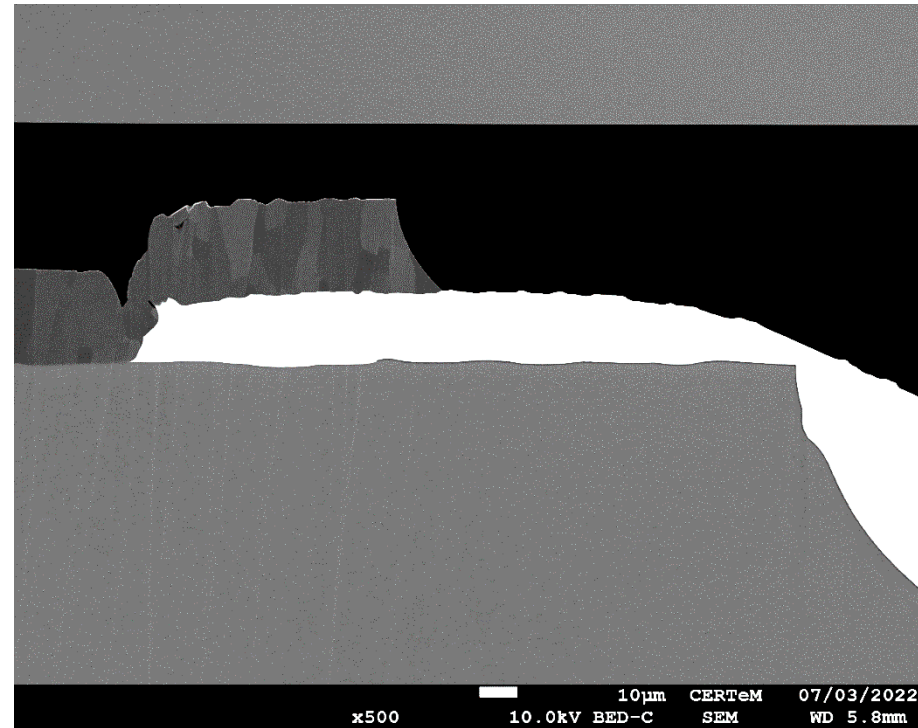
préparation des échantillons

24

1. Le polissage mécanique + BiB (Broad Ion Beam)



Après polissage mécanique



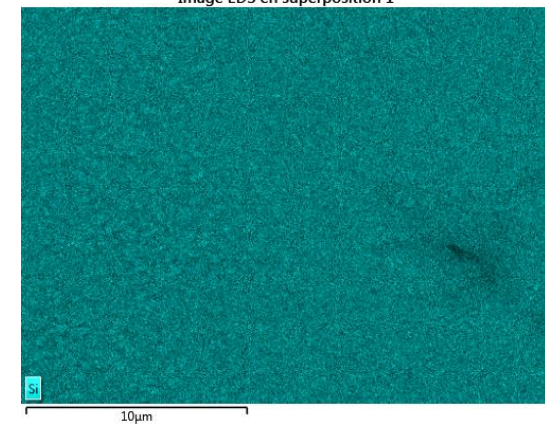
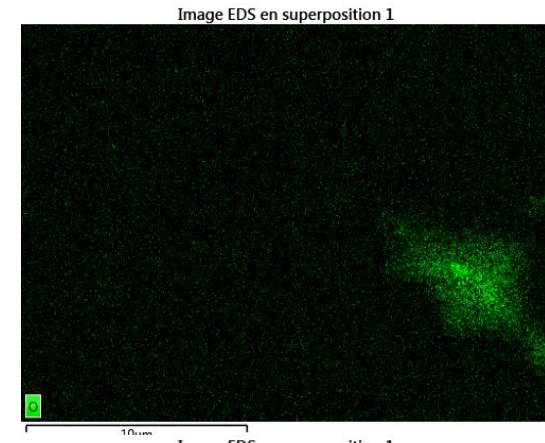
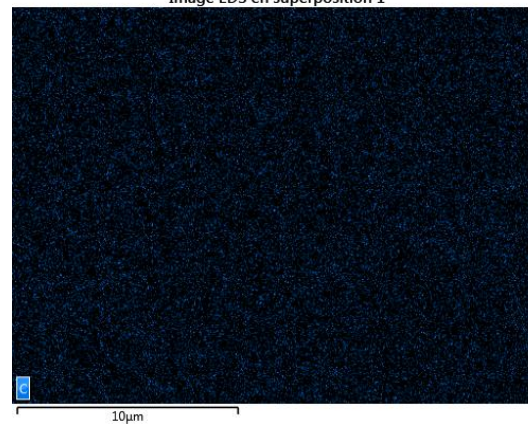
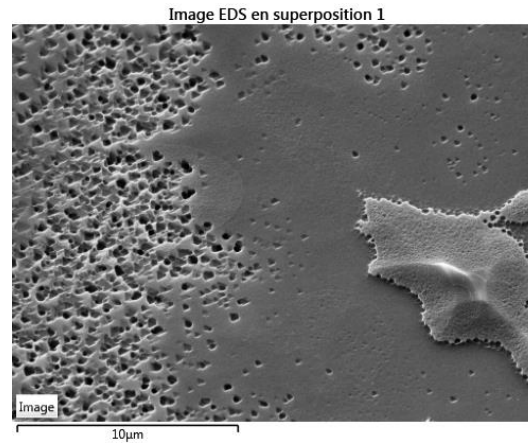
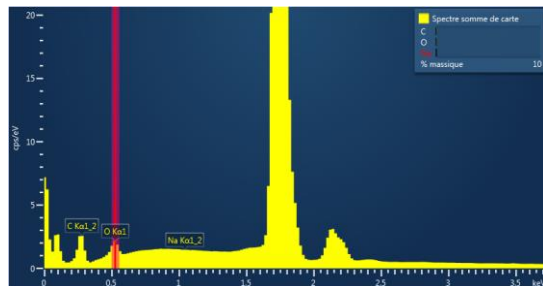
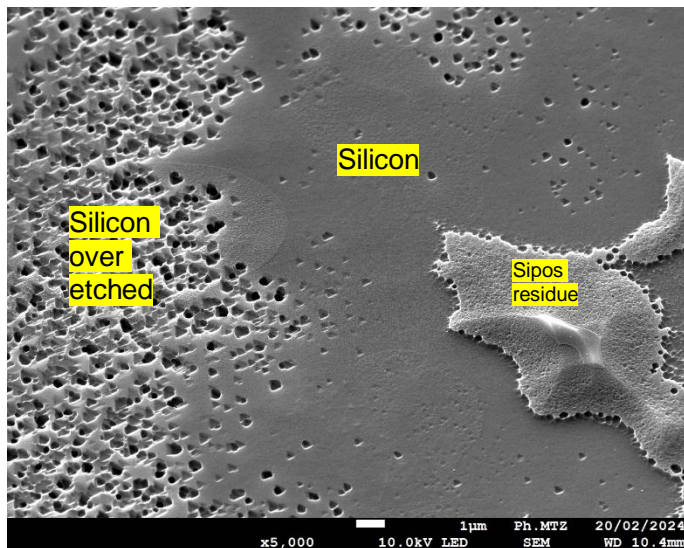
Après polissage ionique (suppression de tous les défauts générés par le polissage mécanique (la couche d'Al a retrouvé sa cristallinité))

- 4 types de contraste en imagerie SEM:
 - ❑ **Le contraste topologique**, celui qui est le plus fréquemment recherché en utilisant un détecteur d'électrons secondaires SE (électrons faiblement énergétiques en provenance de la proche surface de l'échantillon).
 - ❑ **Le contraste en Z** (fonction du numéro atomique Z des éléments constituant le matériau) est restitué en utilisant un détecteur d'électrons rétrodiffusés BSE (plus d'information en profondeur sur tout le volume de la poire d'émission, moins d'information de surface qu'en SE).
 - ❑ **Le contraste cristallin**, obtenu par effet de « channeling » des électrons dans le matériau si celui-ci est cristallin bien sûr. Ce contraste sera obtenu en utilisant un détecteur BSE et en jouant sur la tension d'accélération.
 - ❑ **Le contraste de potentiel** (dit SEPC), observé si certaines zones de l'échantillon se trouvent à des potentiels différents. **Il peut être indésirable... ou recherché.**
 - En analyse de construction, **l'observation en cross section étant la règle**, on observera donc la plupart du temps une **surface plane polie** (BIB) donc absente de topologie. Pour pouvoir différencier les couches minces empilées (isolantes et conductrices) **on recherchera donc un contraste en Z en utilisant un détecteur BSE**. Une imagerie en SE sera toujours moins contrastée dans ce cas.
 - La résolution d'un détecteur BSE étant en théorie moins bonne que celle d'un détecteur SE il conviendra d'utiliser un **détecteur performant placé sous la lentille objectif**. Par ailleurs les avantages de l'imagerie en BSE sont qu'elle masque les défauts générés par le polissage en surface (rayures , « curtaining » et qu'elle est moins sensible aux effets de charges en surface (**aucune section n'est métallisée sur les exemples à suivre**)).

Le choix du contraste

26

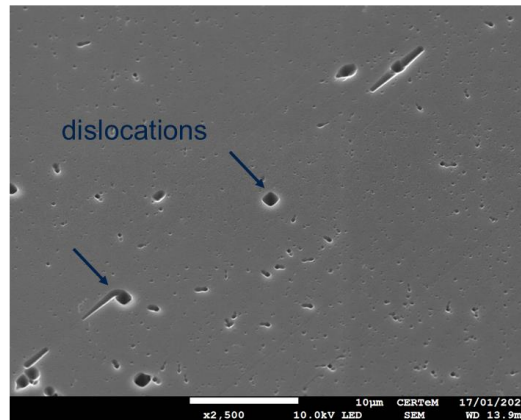
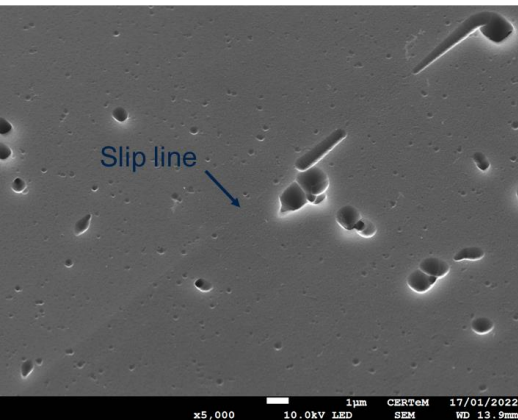
- Observation de défauts de surface en **SE (topologie)**



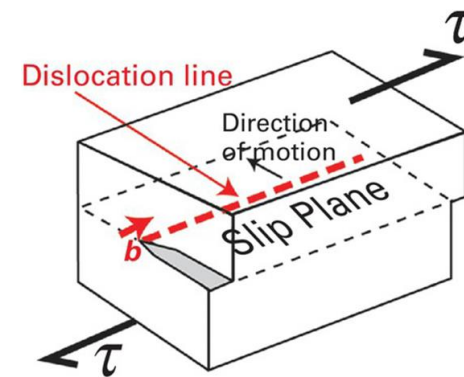
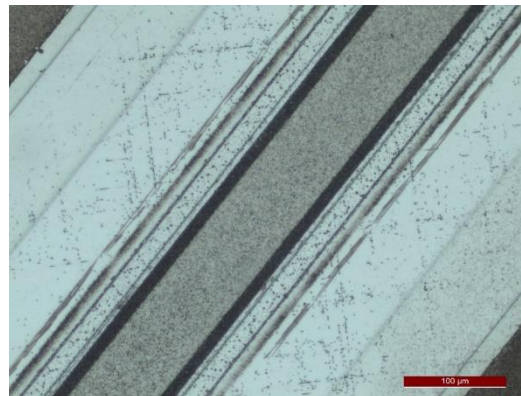
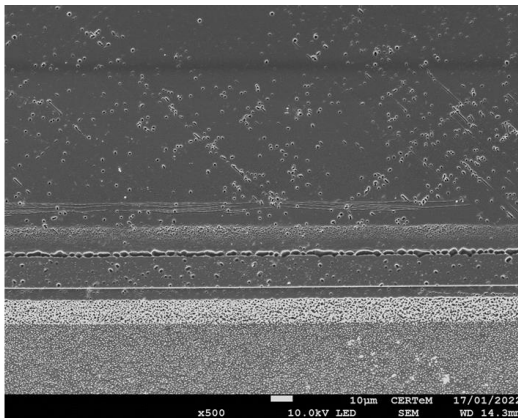
Le choix du contraste

27

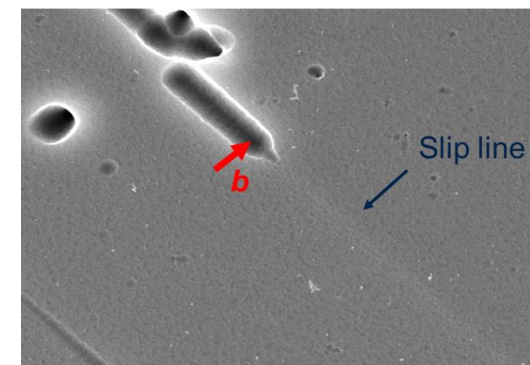
- Observation de défauts cristallins de surface **en SE (topologie)**
- After metallization removal + passivation removal + dash decoration



Slip lines & dislocations → slip lines [110] oriented clearly appear after Dash decoration.



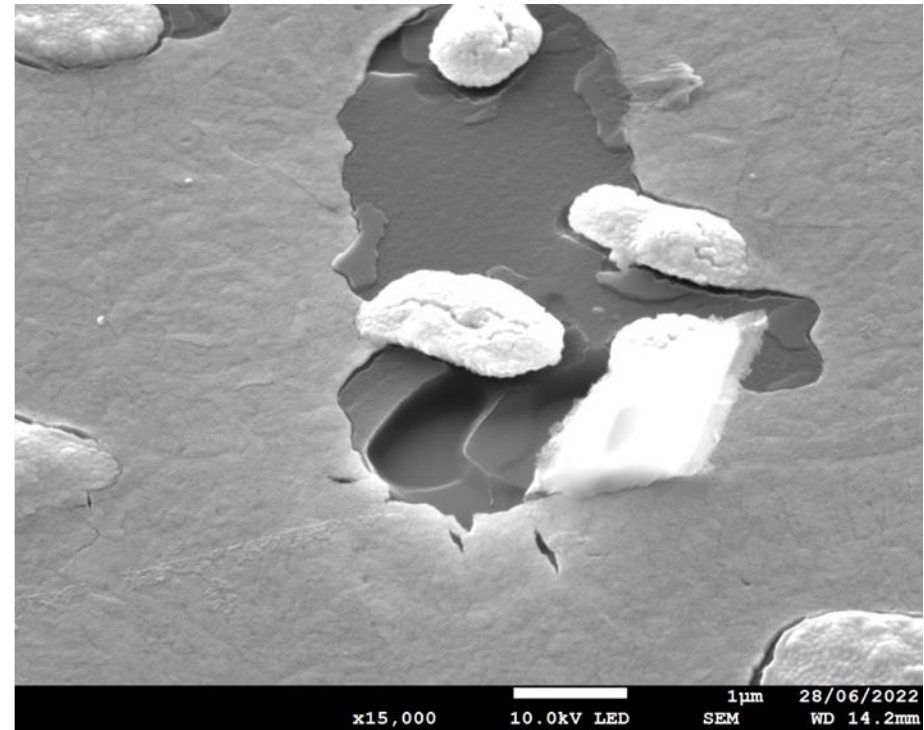
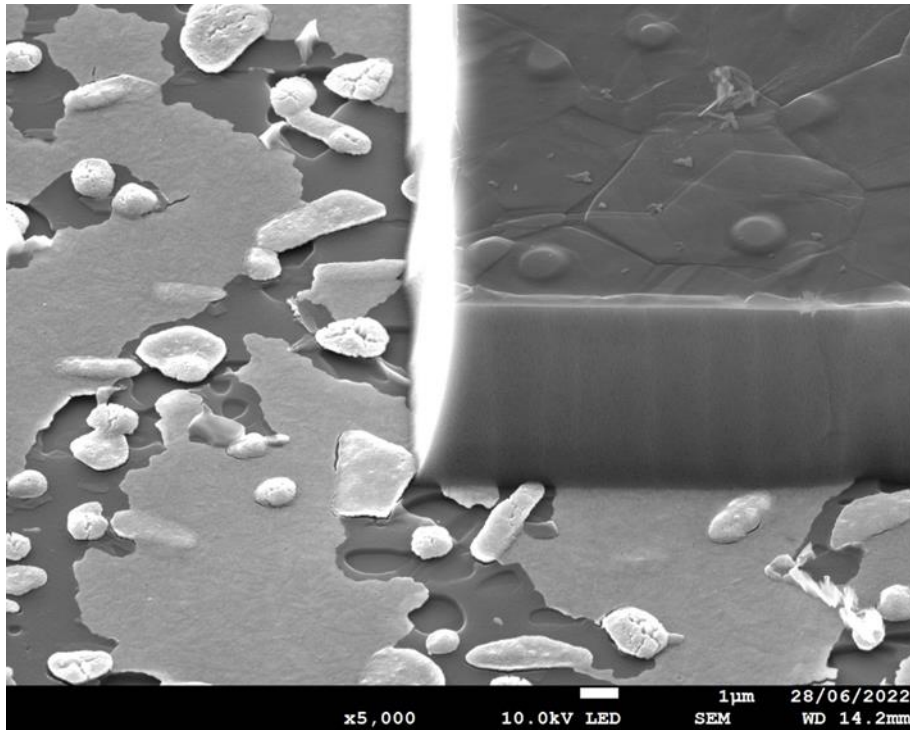
During slip of a screw dislocation



Le choix du contraste

28

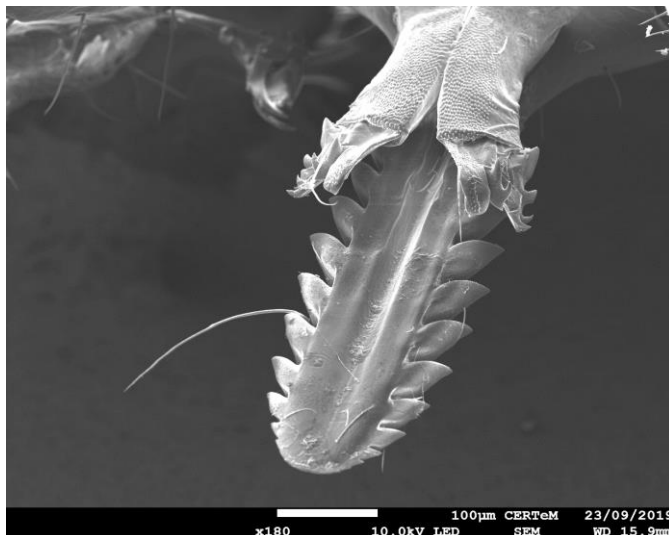
- Observation de défauts de surface en **SE (topologie)**



Le choix du contraste

29

- Observation de détails de surface en **SE (topologie)**

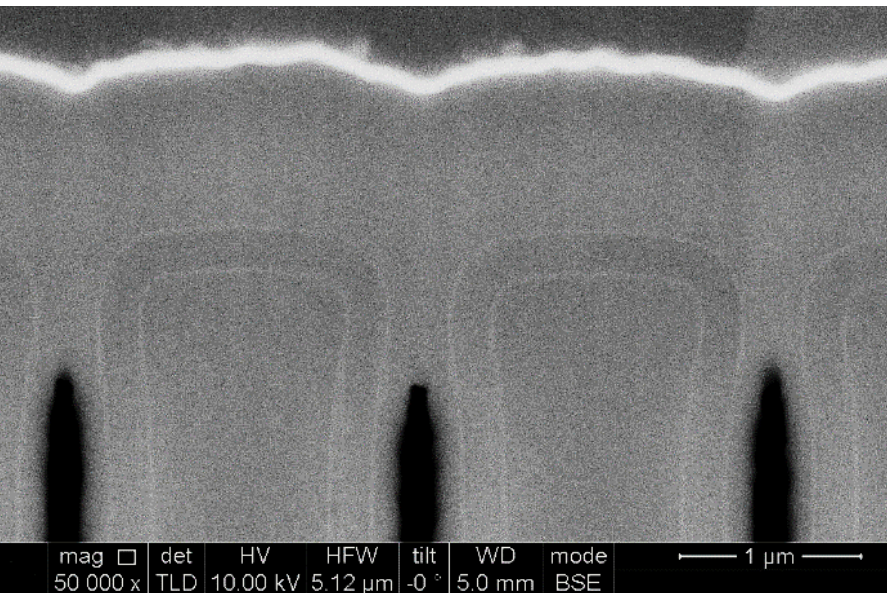


comparaison FIB et BiB

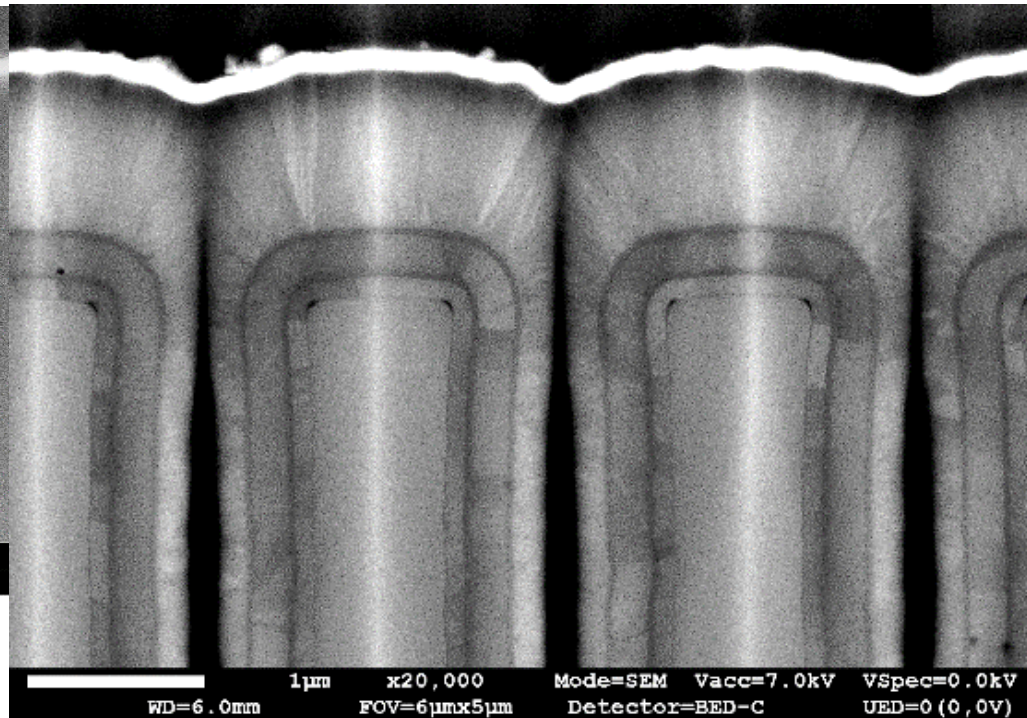
30

MEB (mode BSE) du FiB (dual beam)

BiB + MEB HR



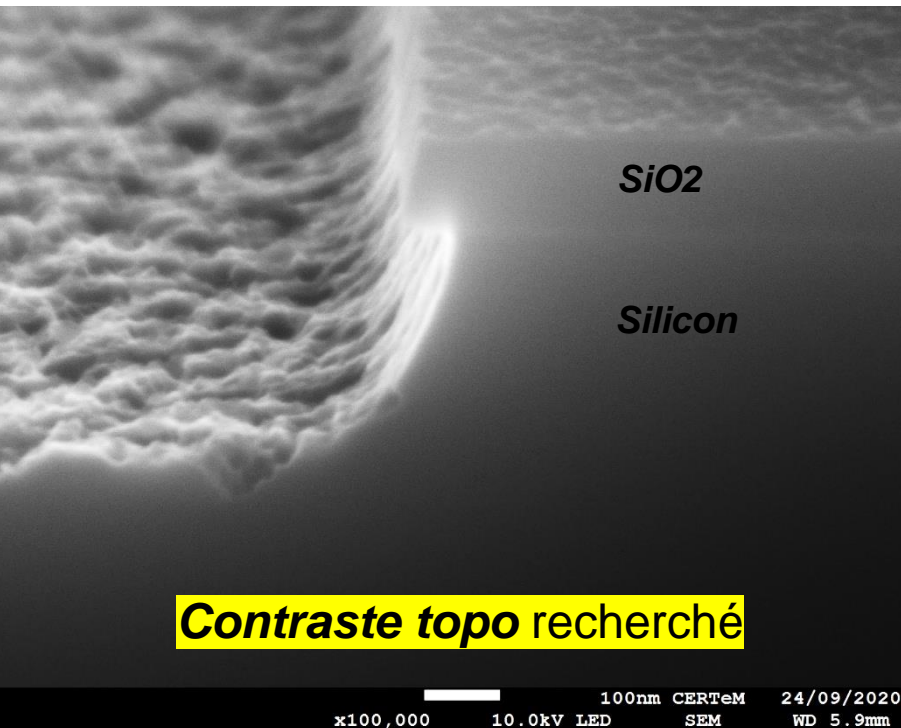
Détecteur « in lens » en mode BSE



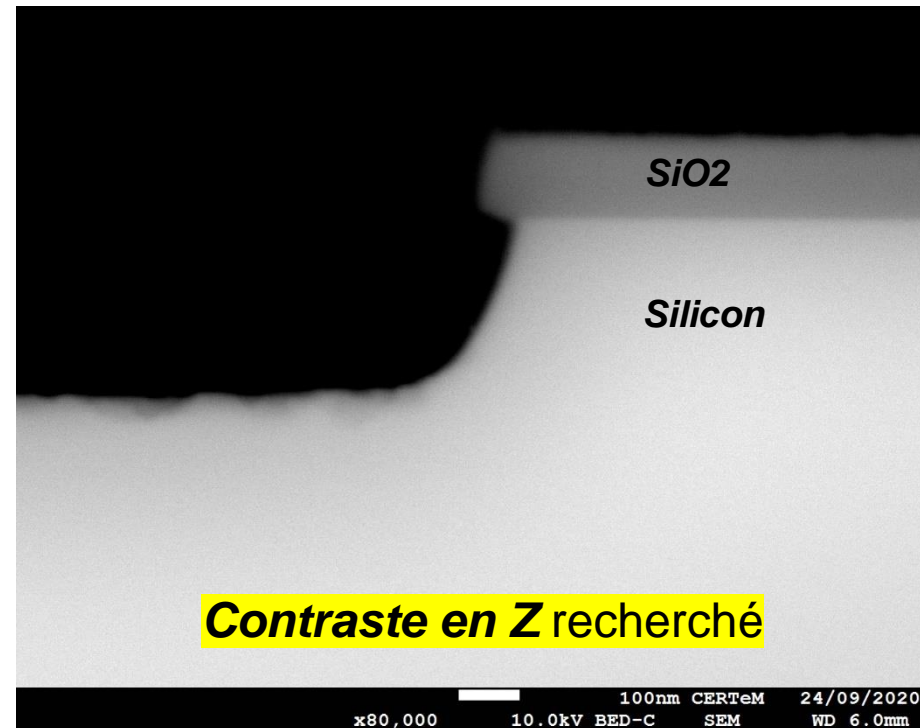
« Vrai » détecteur BSE
placé sous la lentille objectif

Le choix du contraste

31



Tilted cross section SE view



Cross section BSE view

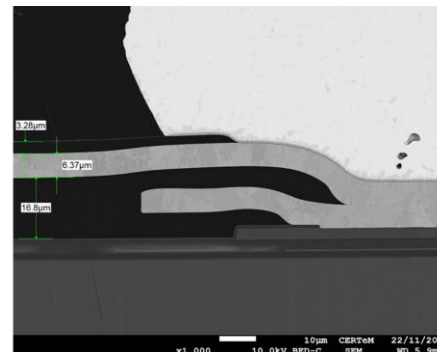
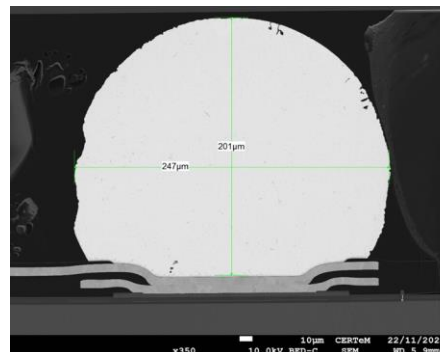
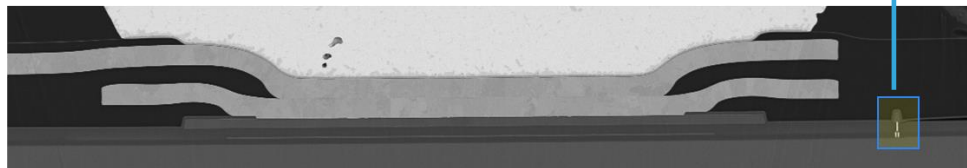
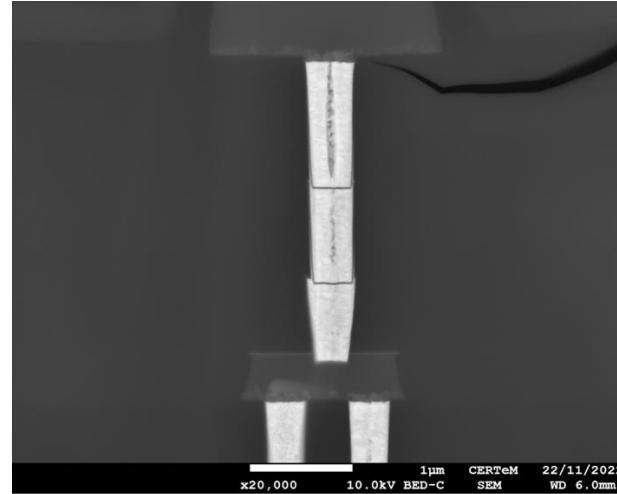
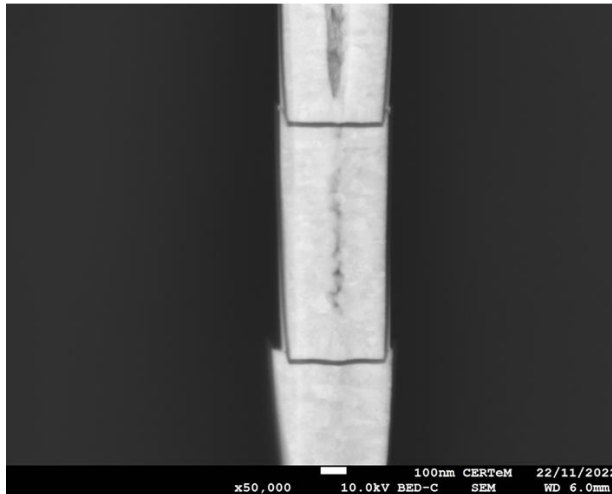
- Sur l'image de gauche, l'information recherchée est la rugosité du fond de gravure (recherche du contraste topologique) on choisira une observation en SE et une vue tiltée pour renforcer l'effet 3D.
- Sur l'image de droite on cherchera à mesurer la profondeur de gravure dans le silicium, l'épaisseur d'oxyde résiduel et la sur gravure latérale, nous aurons donc besoin de bien dissocier l'oxyde du silicium (il n'existe aucun contraste topologique sur la section) nous rechercherons donc le contraste en Z avec une observation en BSE (bonne délimitation du SiO₂ par rapport au Silicium favorisant la précision de la mesure de l'épaisseur de la couche).

Le choix du contraste

32

- **Contraste en Z** recherché, observation en **BSE**:

Focus sur des
« studs »

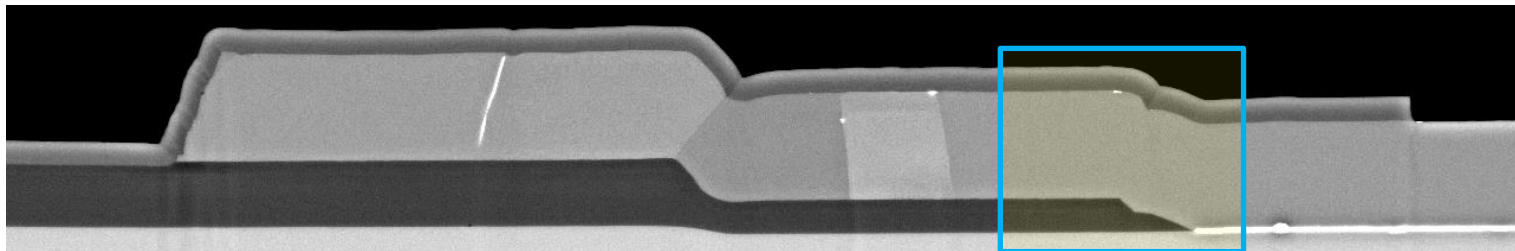
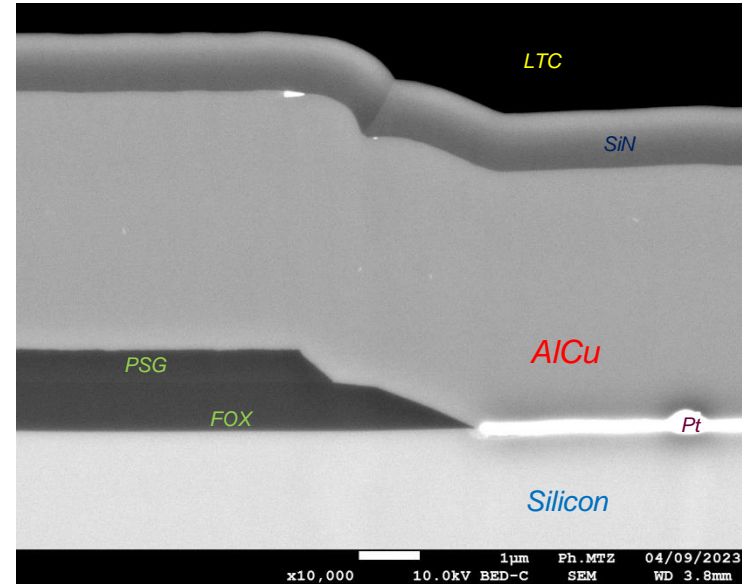
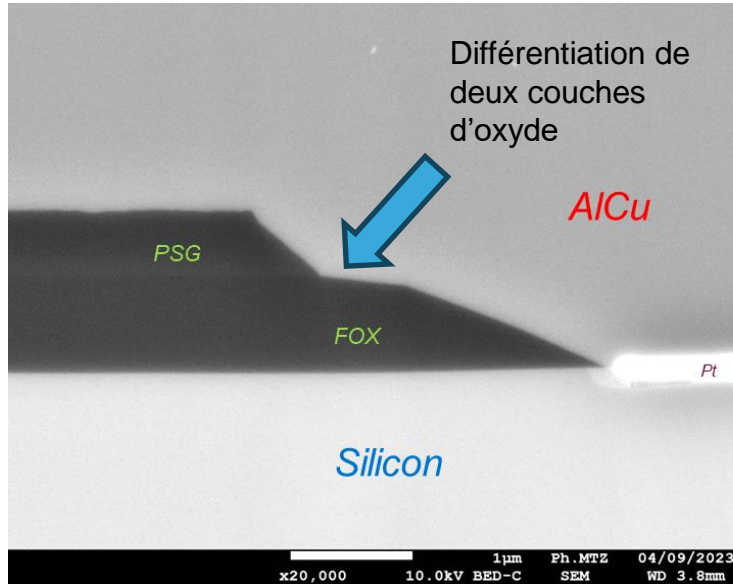


Cross section d'un
« bump »

Le choix du contraste

33

- **Contraste en Z** recherché, observation en **BSE**:

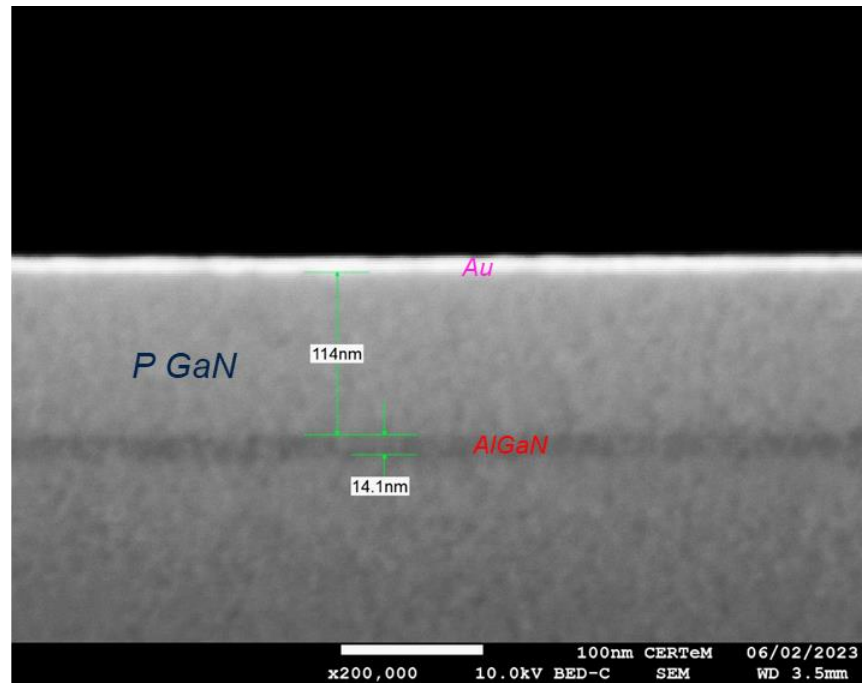
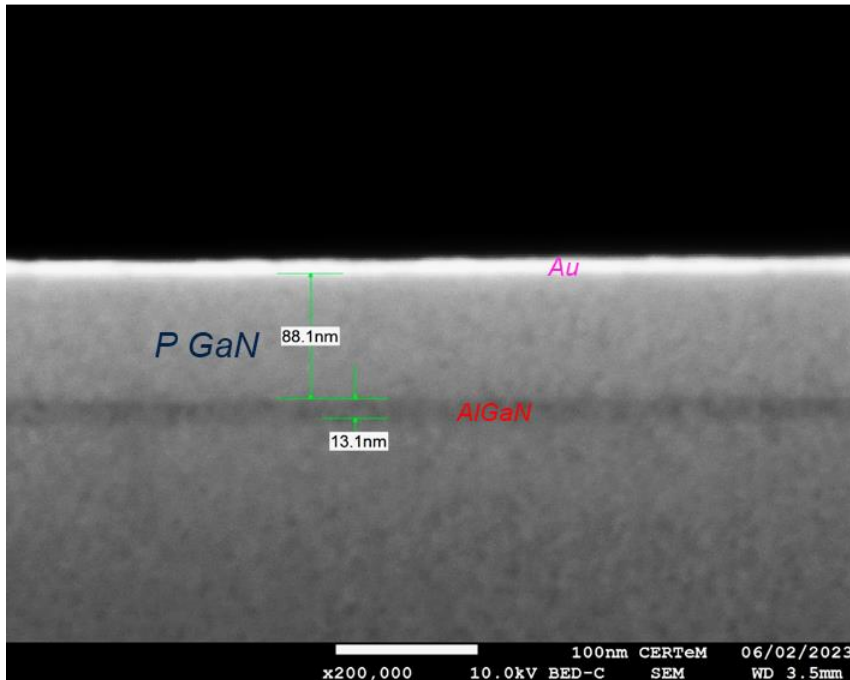


BSE: Différentiation de deux couches d'oxyde (de stœchiométrie légèrement différente) sans effet de charge (surface non métallisée), ***pas réalisable en SE.***

Le choix du contraste

34

- **Contraste en Z** recherché, observation en **BSE**:



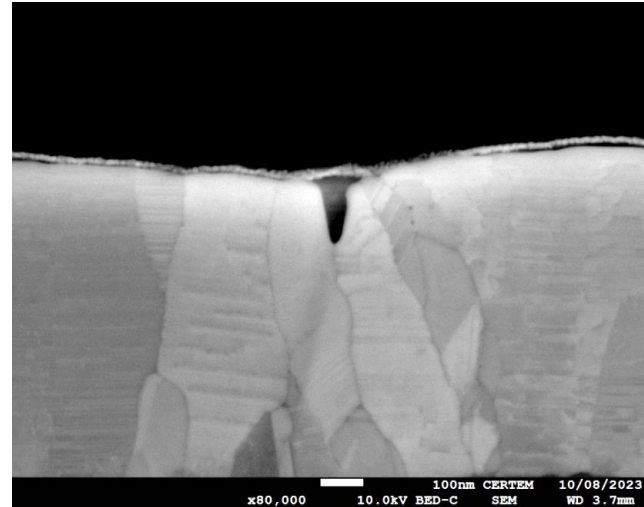
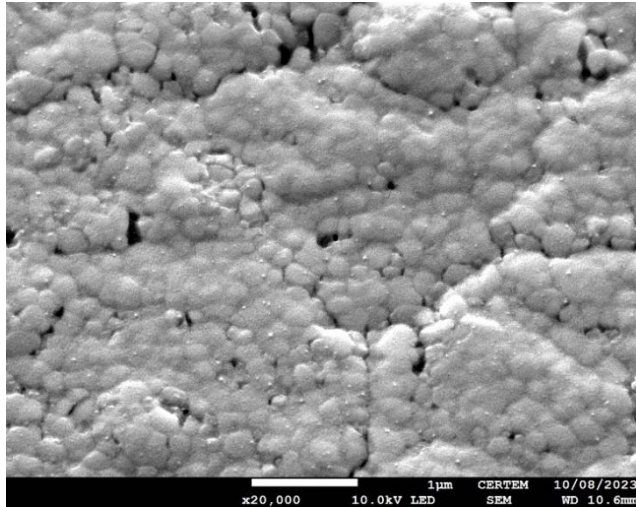
Ici une couche très mince d'AlGaN mesurée à environ 13 nm

Le choix du contraste

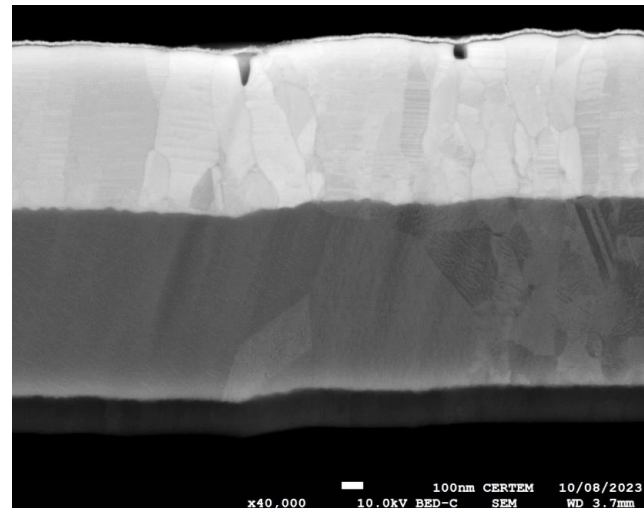
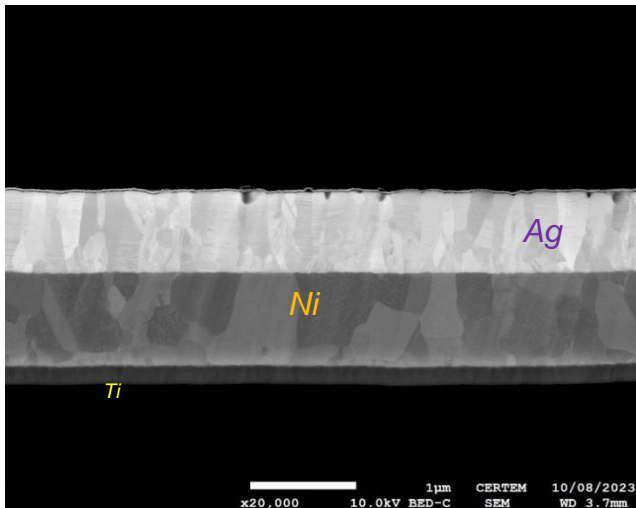
35

- **Contraste cristallin** recherché, observation en **BSE**:

Surface
tilted
view



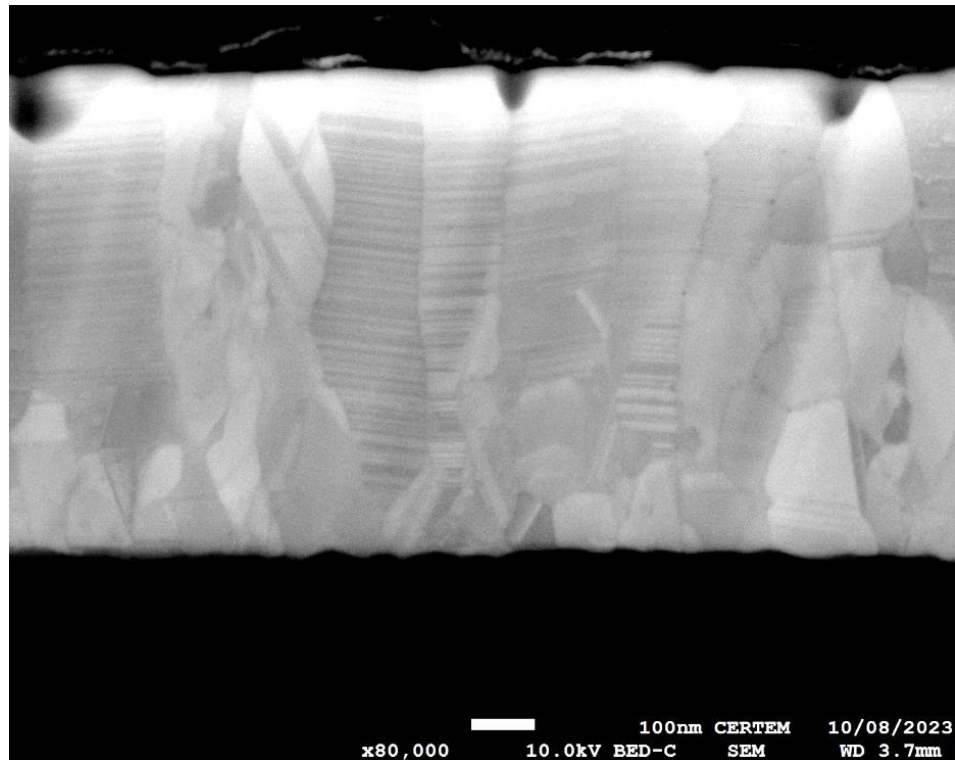
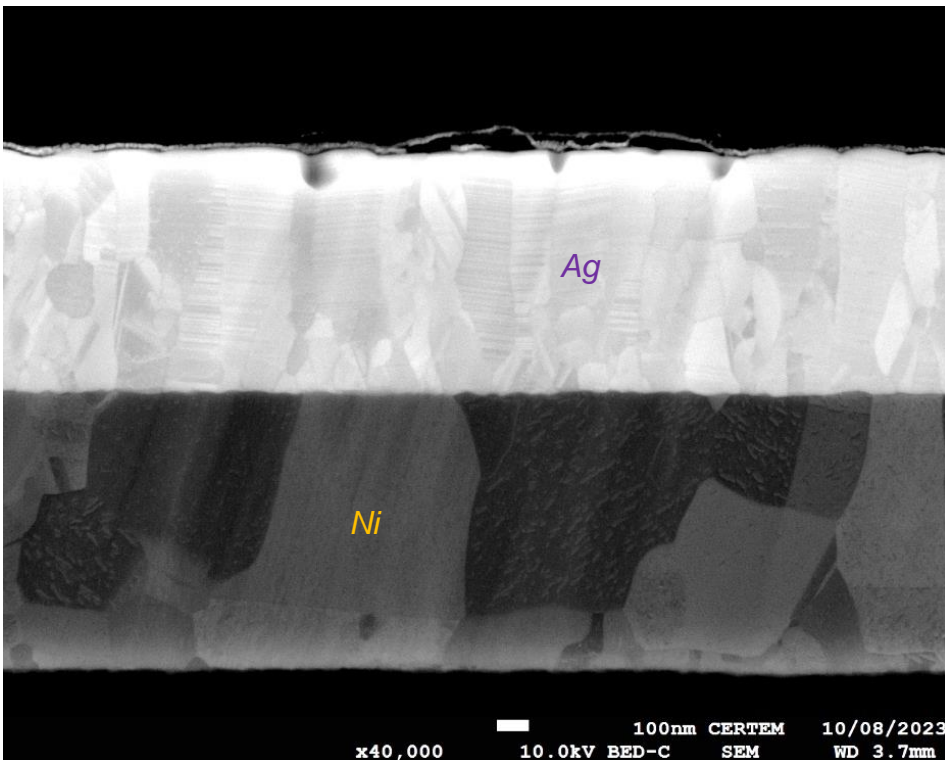
Cross
section
view



Le choix du contraste

36

- **Contraste cristallin** recherché, observation en **BSE**:

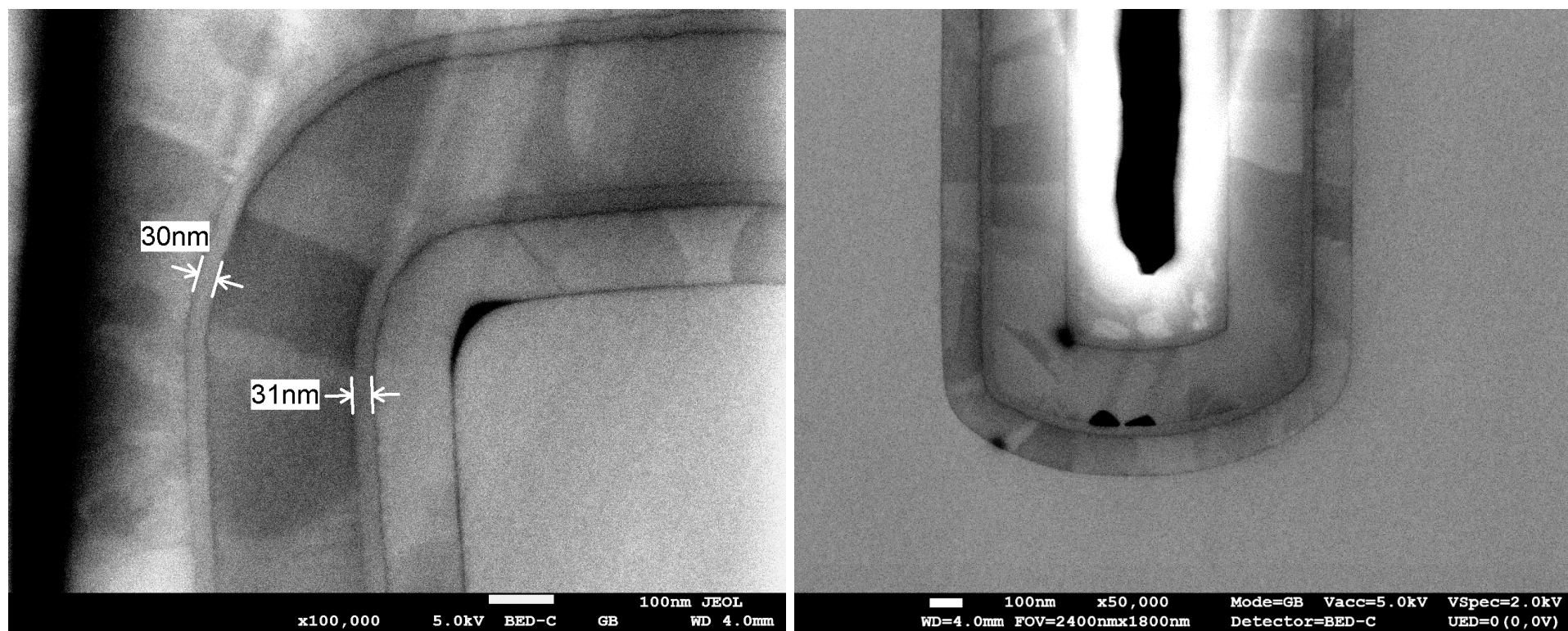


Parfaite définition des grains et joints de grains grâce au contraste cristallin

Le choix du contraste

37

- **Contraste en Z** et **contraste cristallin** recherchés, observation en **BSE**:



Contraste cristallin des couches de poly silicium bien marqué, mesure d'une couche de diélectrique (Si_3N_4) de 30nm.

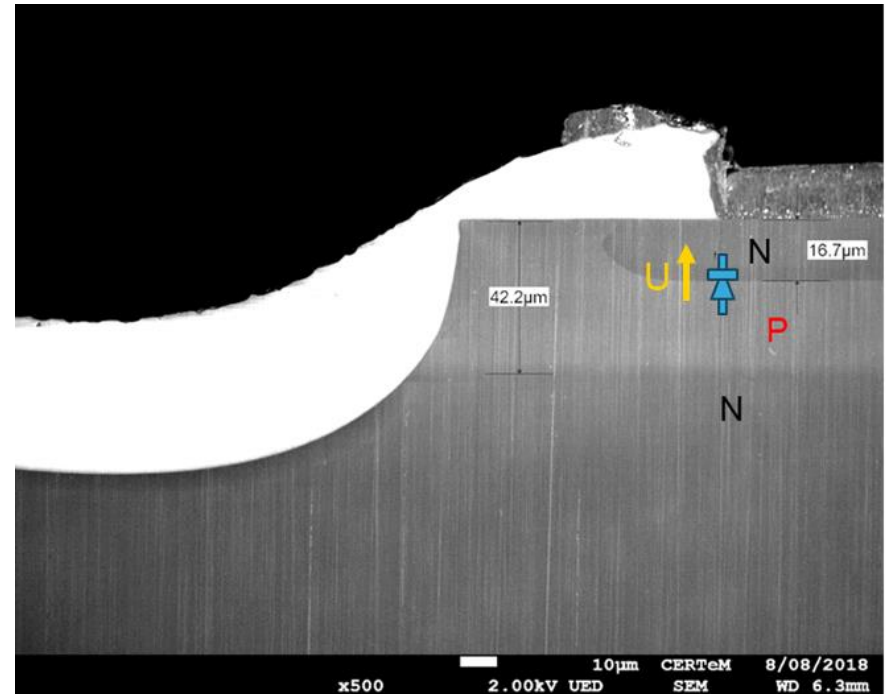
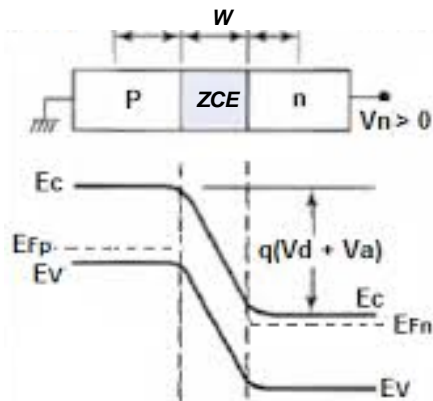
Révélation de jonction par SEPC

(Secondary Electron Potential Contrast)

38

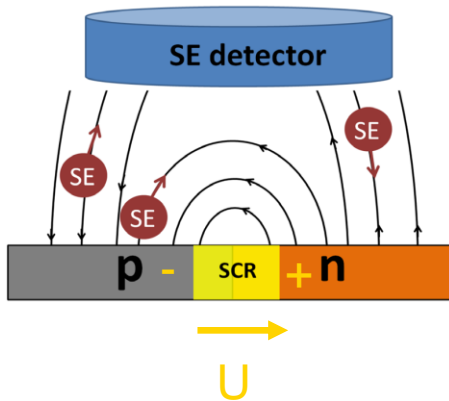
❑ Principe:

- ❑ la sonde balaye la section du dispositif (zones dopées P et zones dopées N) elle se comporte comme un générateur de courant, ce courant d'électrons s'évacue à la masse, mais les zones N évacuent plus facilement leurs charges que les zones P (conductivité liée au type de porteurs, électrons ou trous, et au dopage).
- ❑ Les zones dopées N en surface de la section se retrouvent donc polarisées positivement par rapport aux zones P, d'où une jonction polarisée en inverse dans laquelle apparaît une **Zone de Charge d'Espace** qui s'étend pour tenir la tension entre la zone P et la zone N (zone dans laquelle s'établit un champ électrique)



Révélation de jonction par SEPC (Secondary Electron Potential Contrast)

39



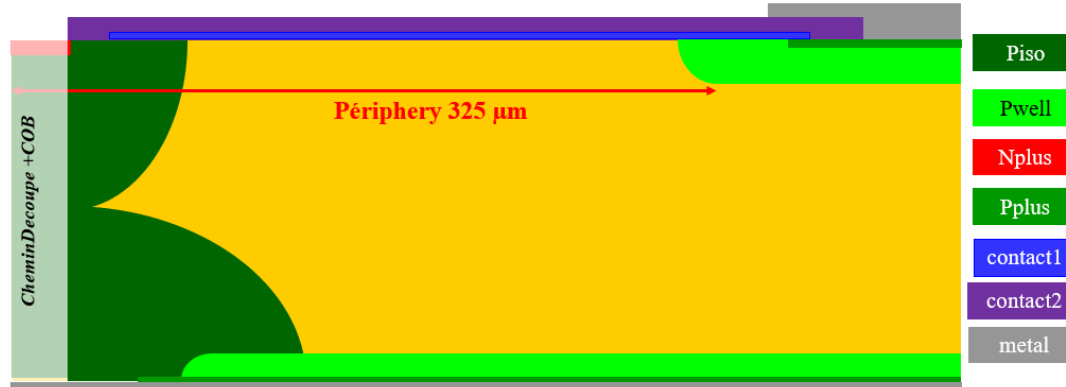
- Les électrons secondaires émis par la surface de la zone N vont se retrouver freinés par le champ électrique alors que ce sera le contraire pour la zone P d'où une meilleure collection des électrons secondaires de la zone P par le détecteur.
- Les zones P apparaissent donc plus brillantes et les zones N plus sombres

- ❑ Compte tenu de ces principes, il conviendra, pour optimiser ce contraste de potentiel, de travailler à **fort courant (courant de sonde 20nA)** et **faible tension d'accélération (1.5 à 3KV)**.
- ❑ Nécessité d'une **préparation minutieuse et adaptée** (cross polissage mécanique et ionique)
- ❑ **Meilleure précision sur fort dopage** (type dopage émetteur): la netteté de la délinéation de la jonction va dépendre de la largeur W de la ZCE (Zone de Charge d'Espace): *plus le dopage est fort, moins la ZCE s'étend pour tenir la tension et plus la transition sera nette.*

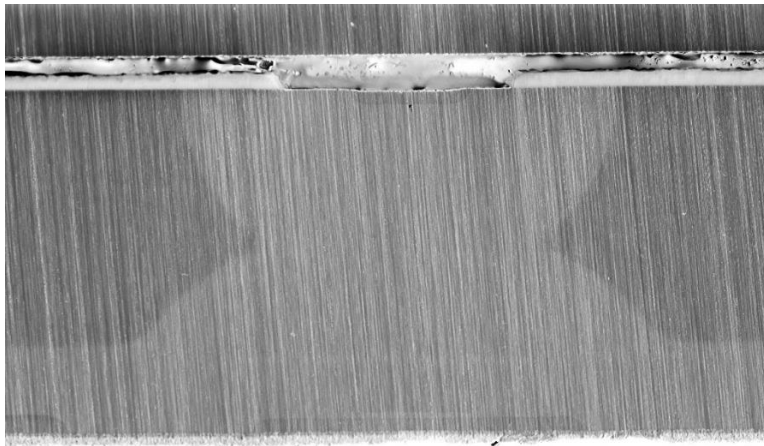
Le choix du contraste

40

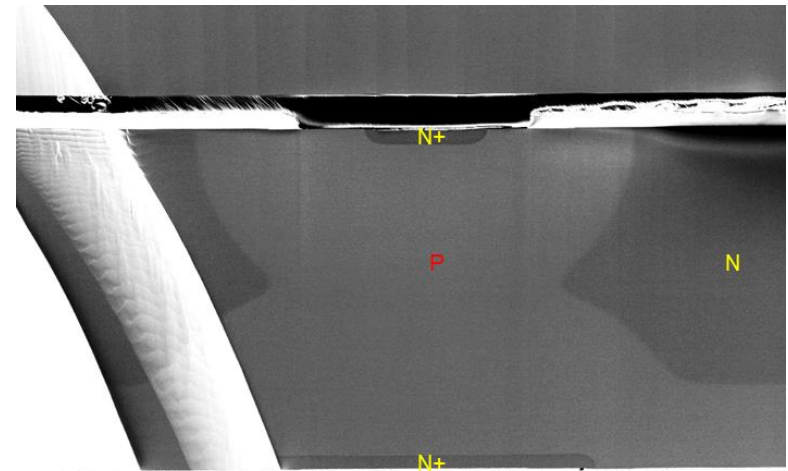
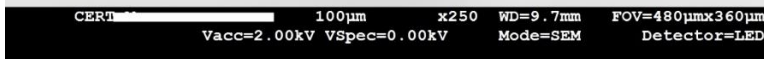
- **Contraste de potentiel** recherché, observation en **SE**:



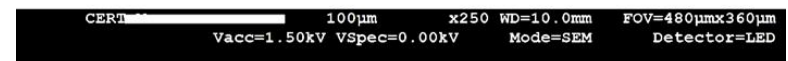
Révélation d'un
caisson traversant P+



Après polissage mécanique



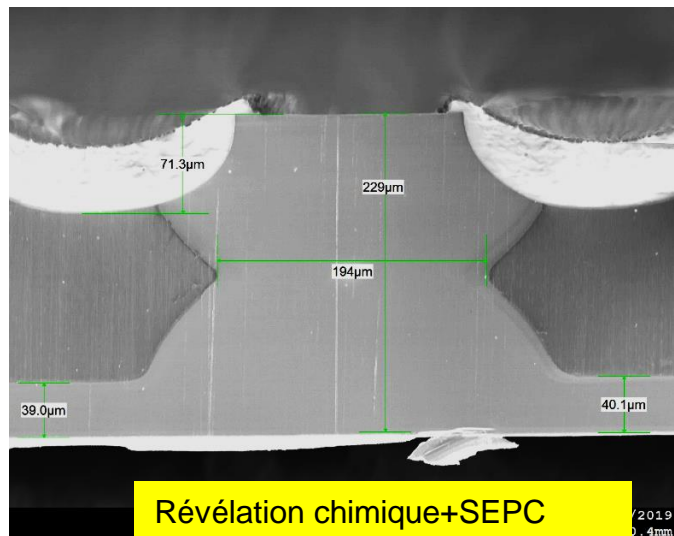
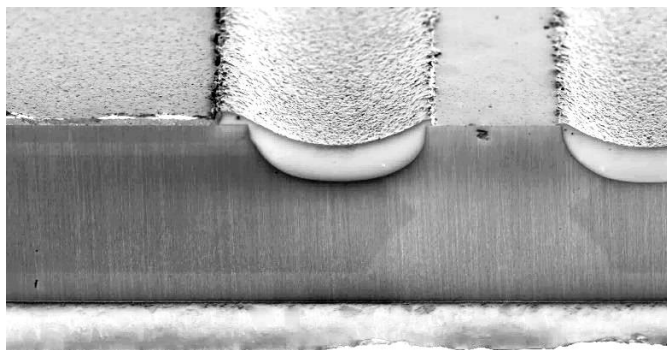
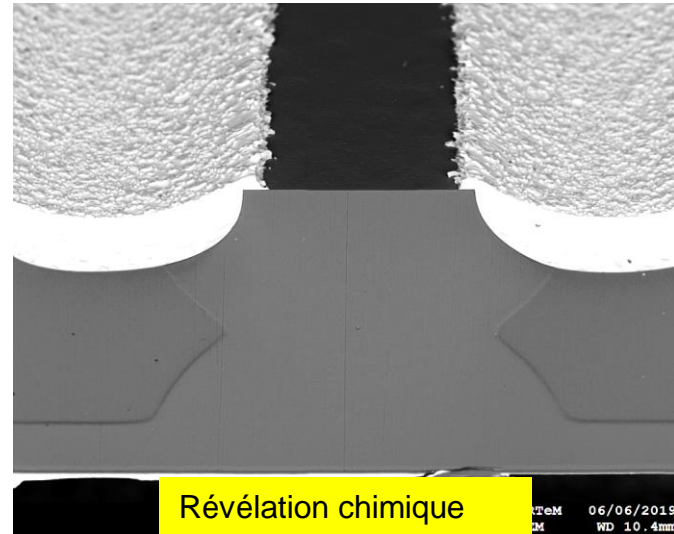
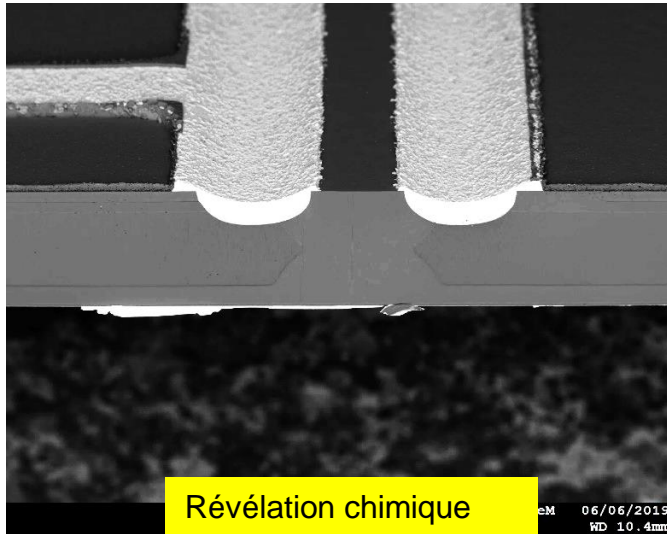
Après polissage ionique



Le choix du contraste

41

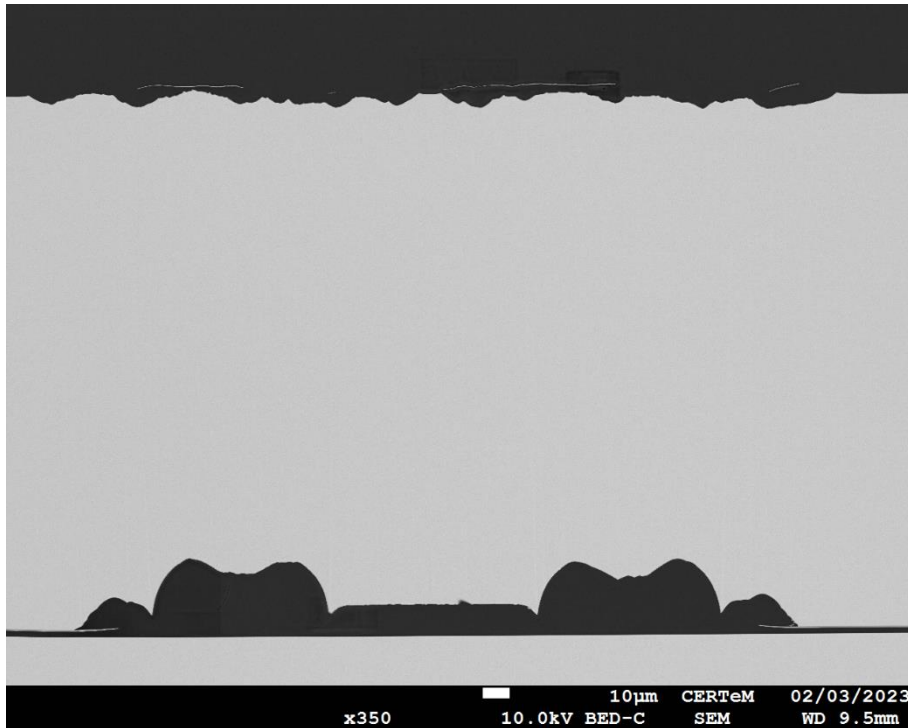
Révélation de jonctions



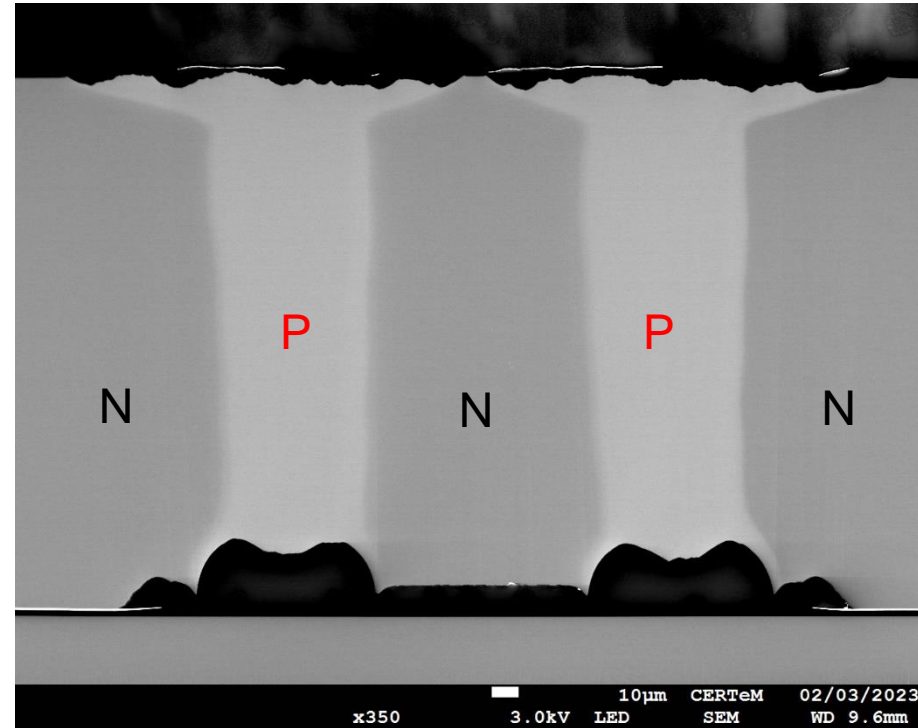
Le choix du contraste

42

- **Contraste de potentiel** recherché, observation en SE:



Aucune information en BSE (surface plane et matériau homogène)

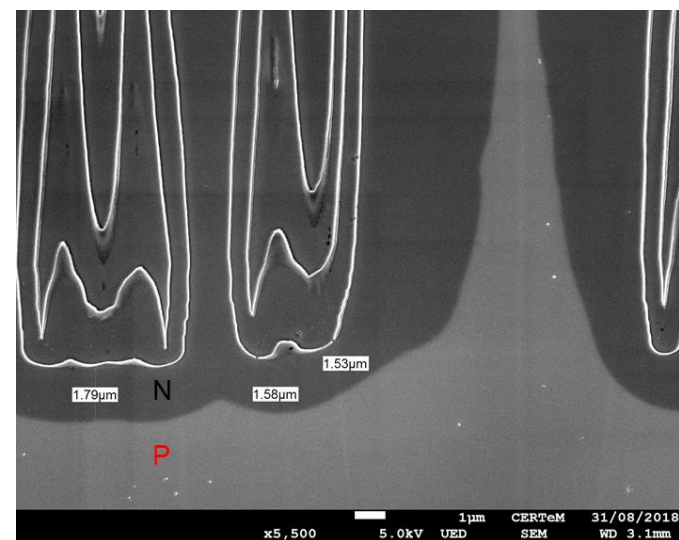
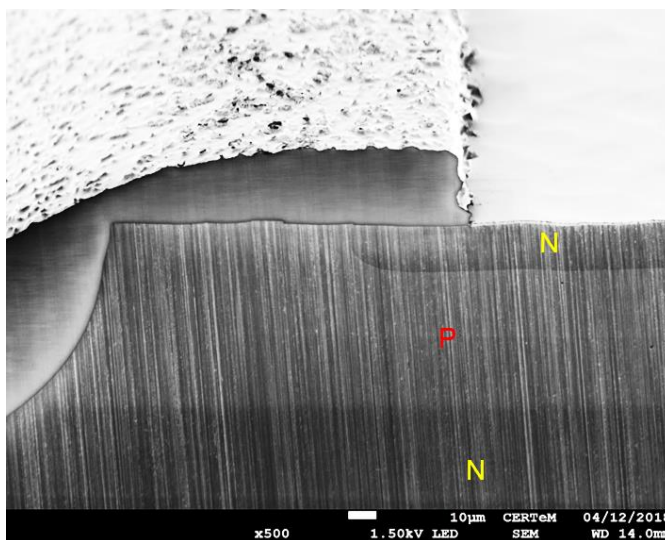
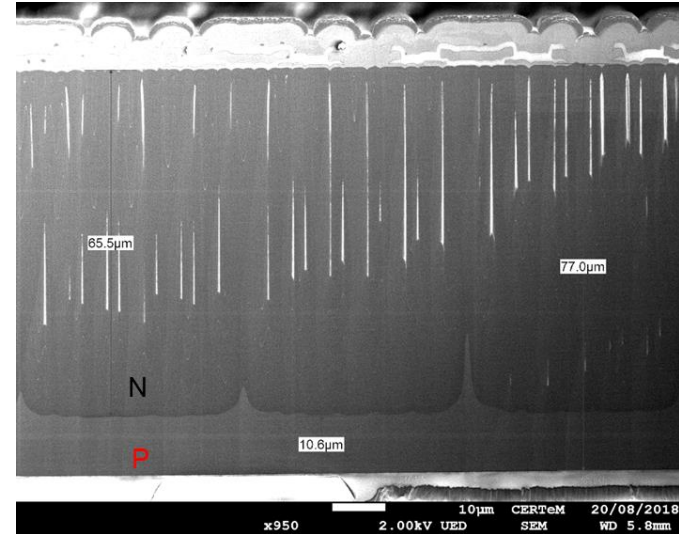
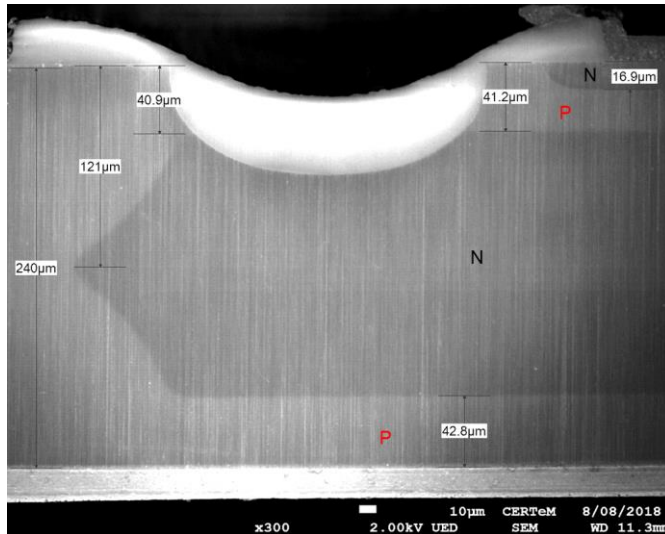


Révélation de jonctions en SE: Caissons traversants de type P réalisés par thermo migration d'Aluminium.

Le choix du contraste

43

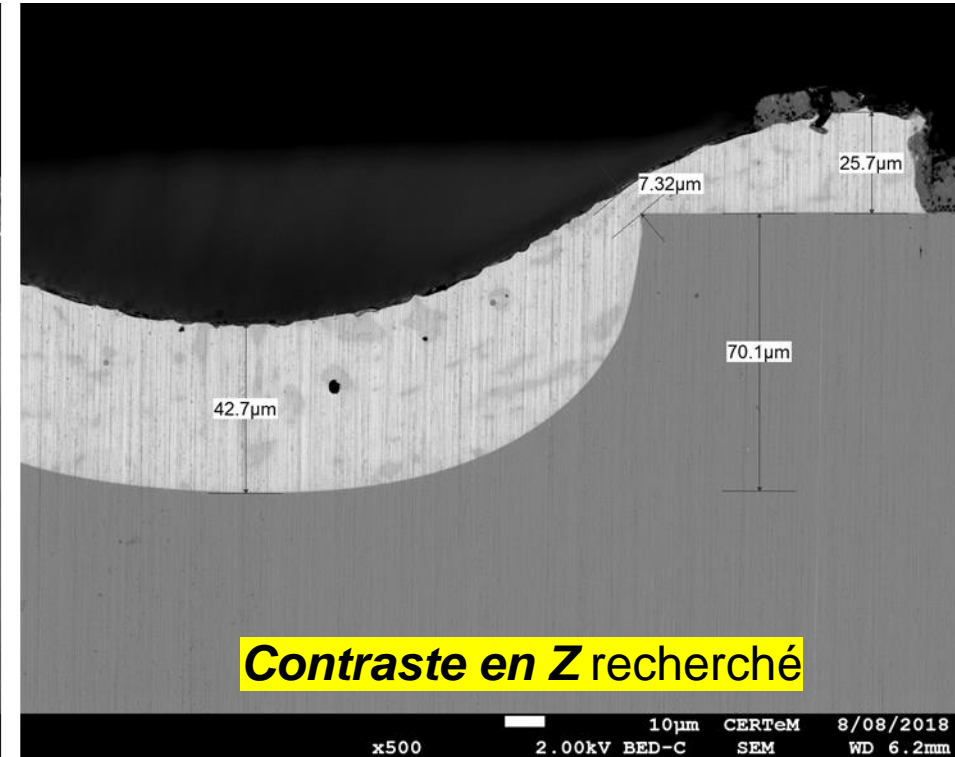
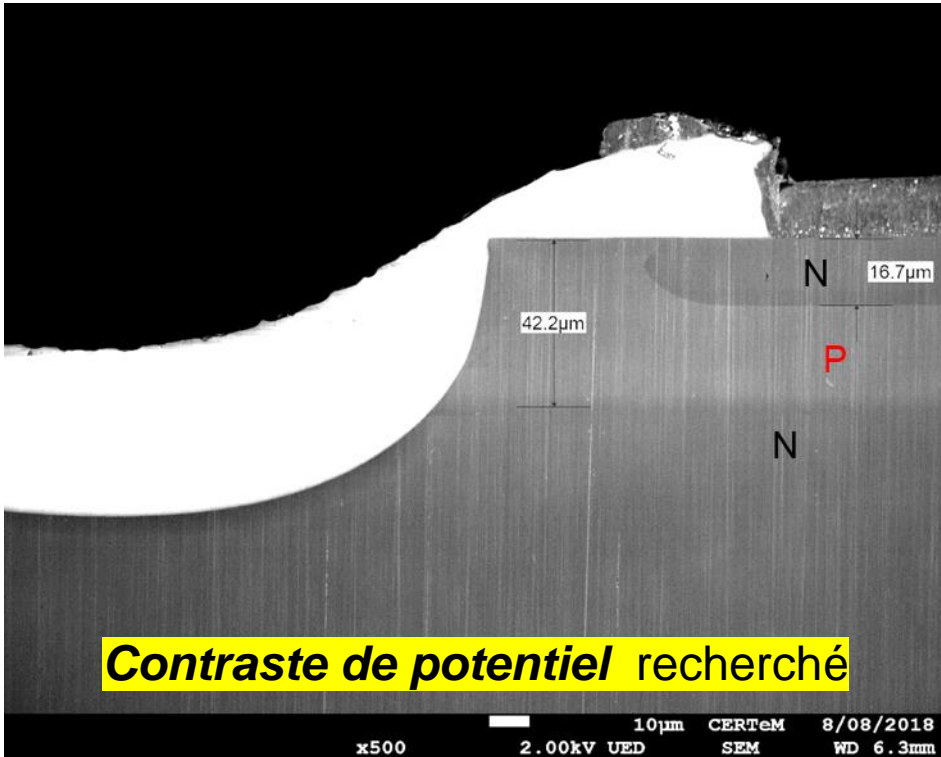
- **Contraste de potentiel** recherché, observation en **SE**:



Le choix du contraste

44

- **Contraste de potentiel** recherché, observation en **SE**:



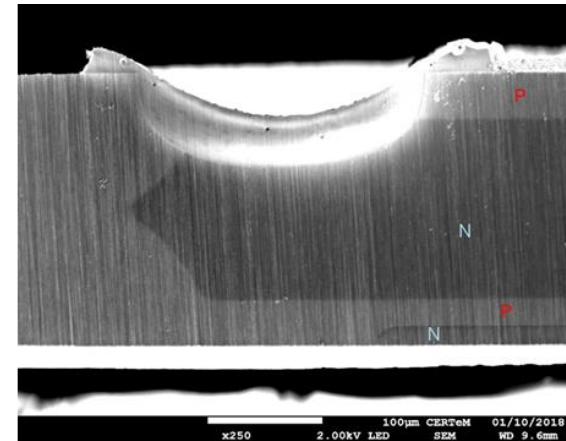
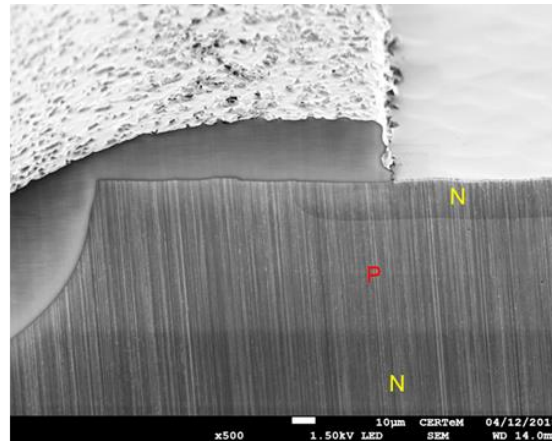
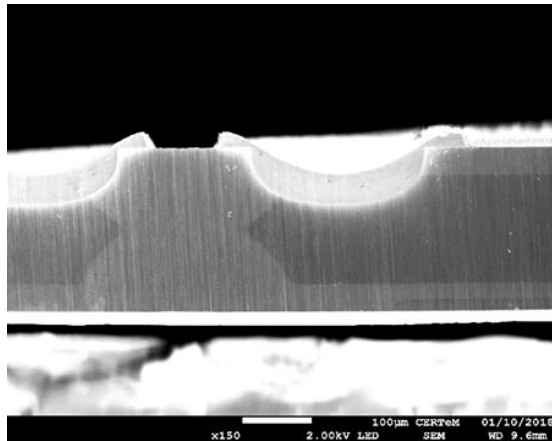
Révélation de jonctions en SE

Observation des différentes phases de la passivation (BSE)

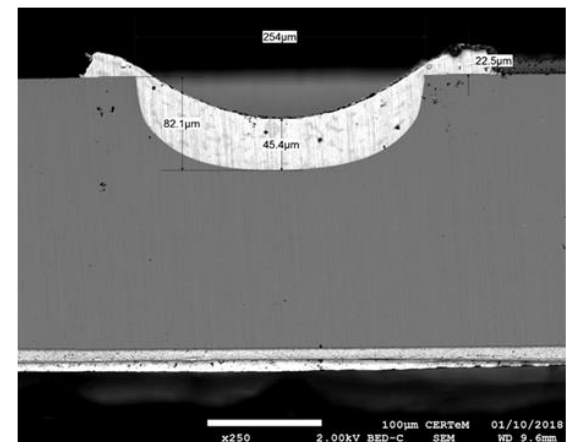
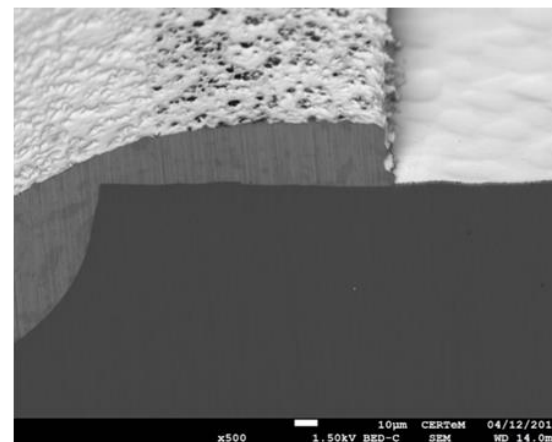
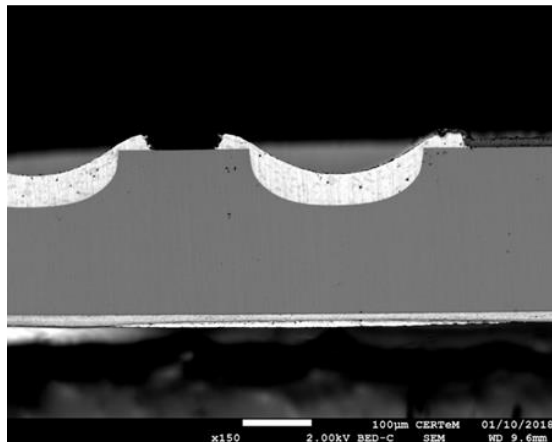
Le choix du contraste

45

- **Contraste de potentiel** recherché, observation en **SE**:



SE (*Secondary Electron*) detector (junction decoration by SEPC)

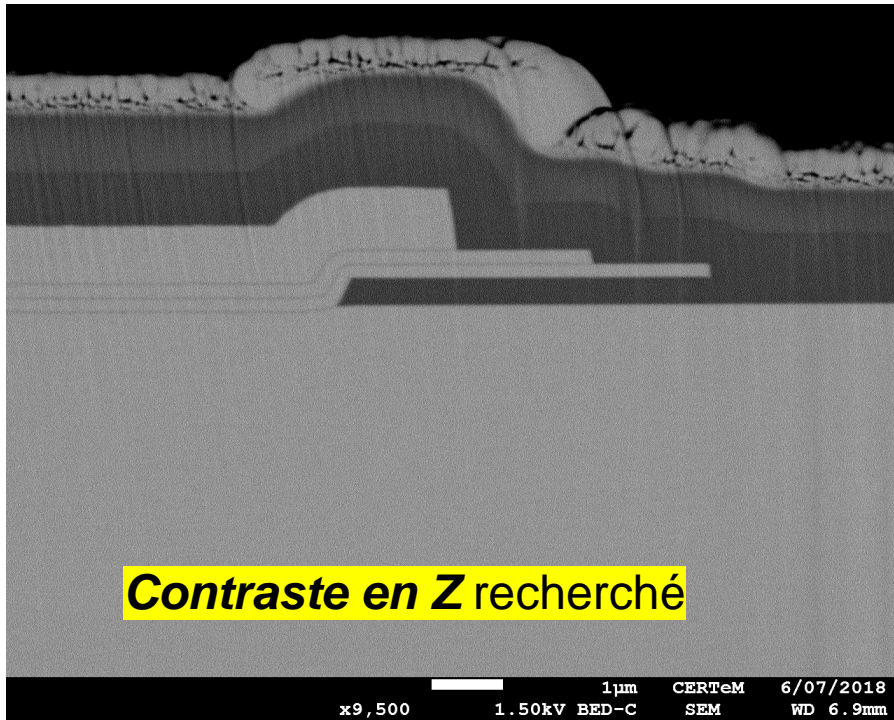


BSE (*Back-Scattered Electron*) detector

Le choix du contraste

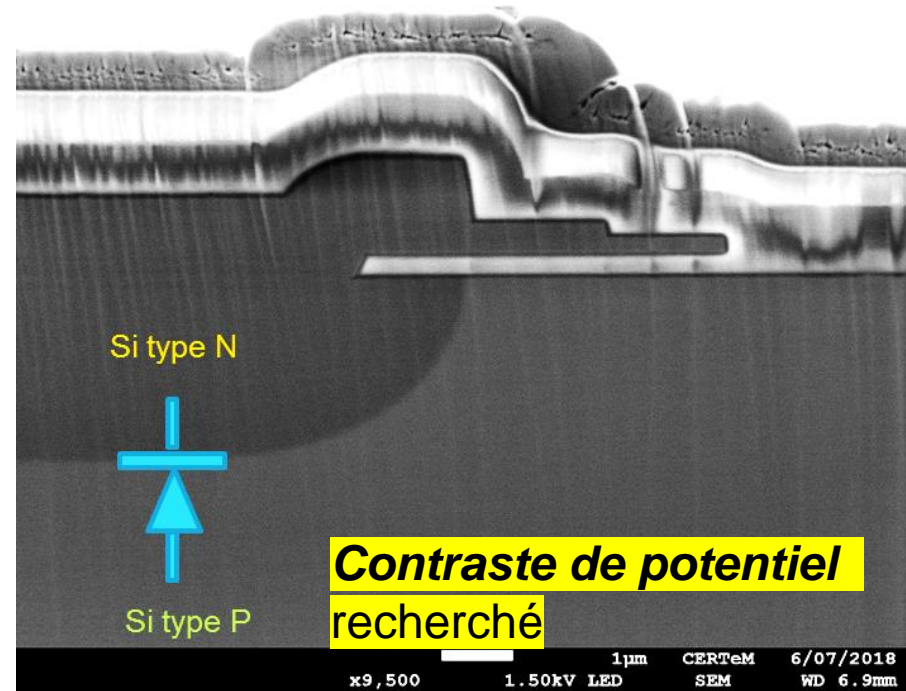
46

BSE detector

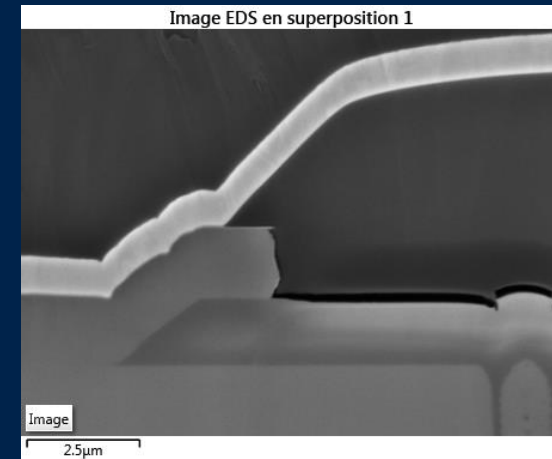
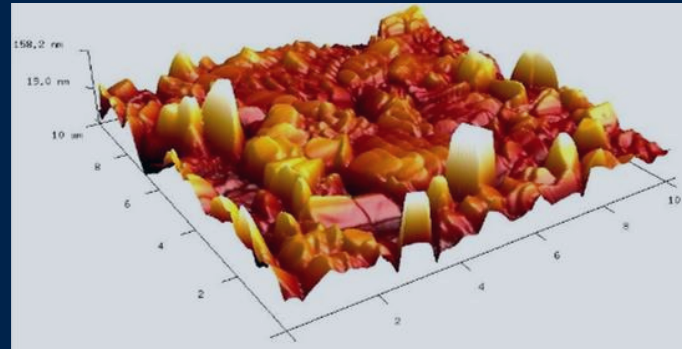
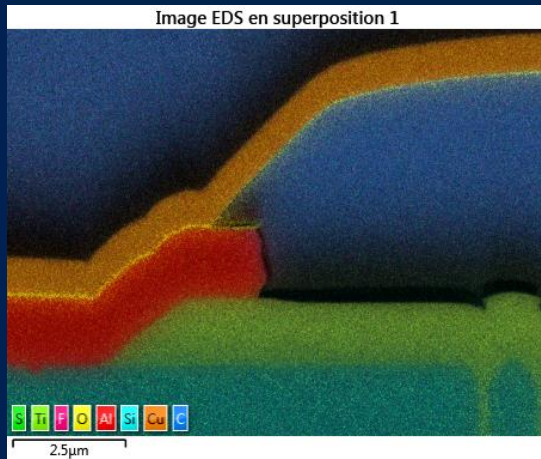


Même dispositif observé avec un détecteur d'électrons retro-diffusés (**BSE**) plus d'info sur le **volume**, **contraste en Z** (numéro atomique), **pas de contraste de potentiel**.

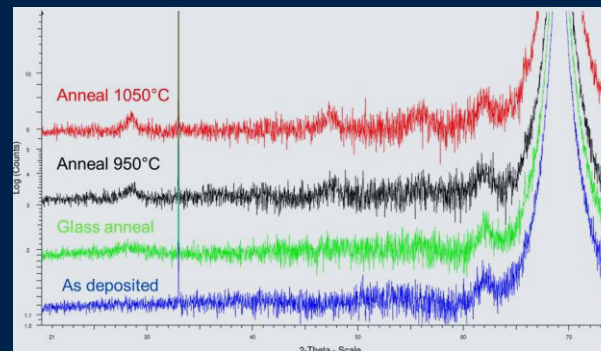
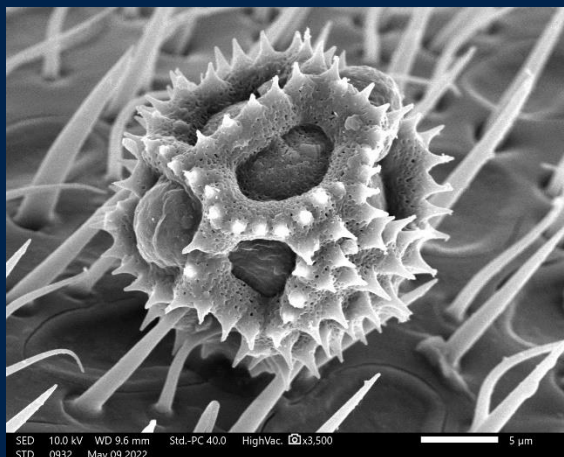
SE detector



Révélation de jonction obtenue avec un détecteur d'électrons secondaire (**SE**) à fort courant et faible tension d'accélération (1,5KV). Information de **surface** et **fort contraste de potentiel**.

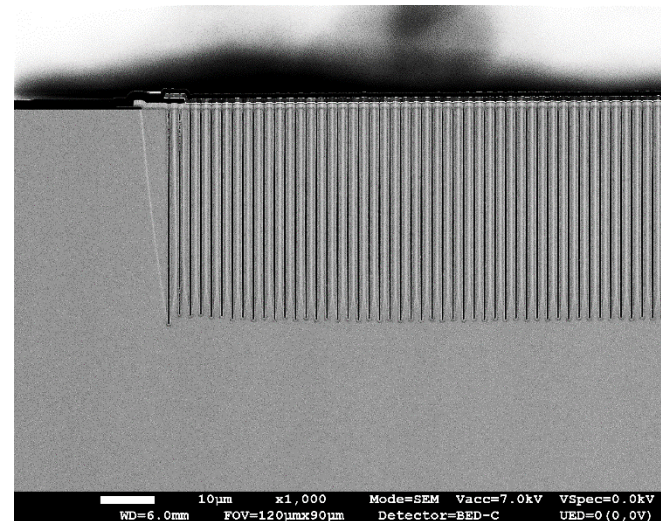
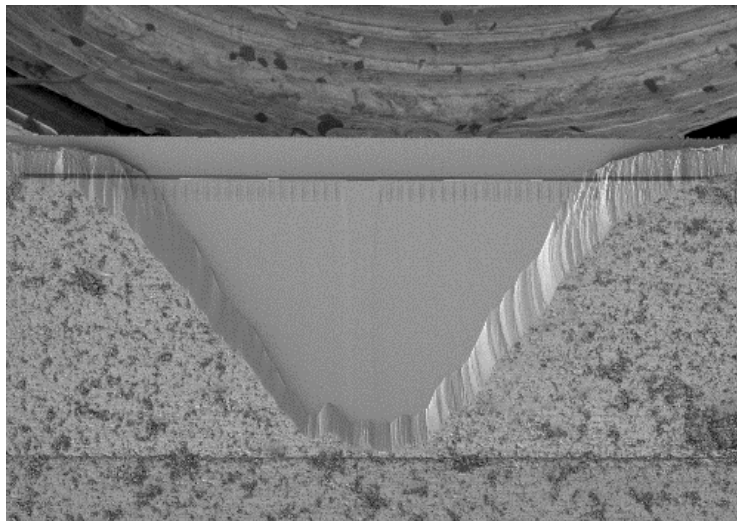
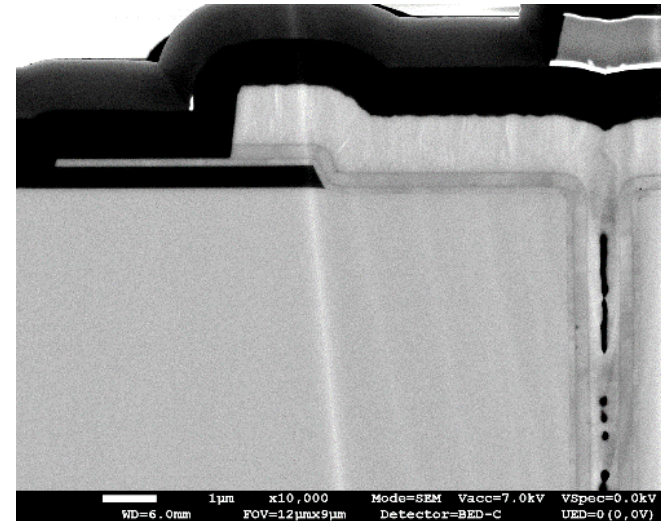


MERCI pour votre attention



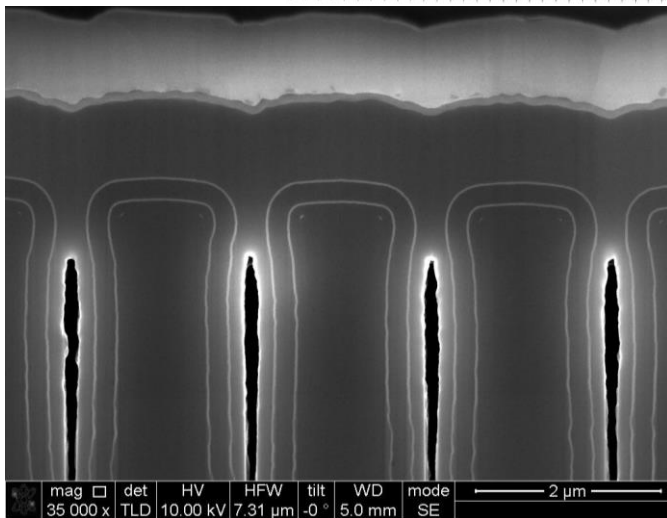
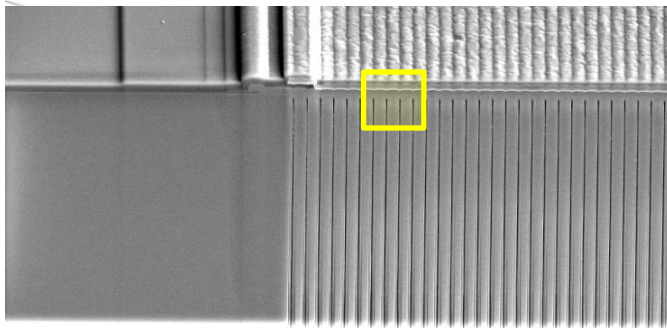
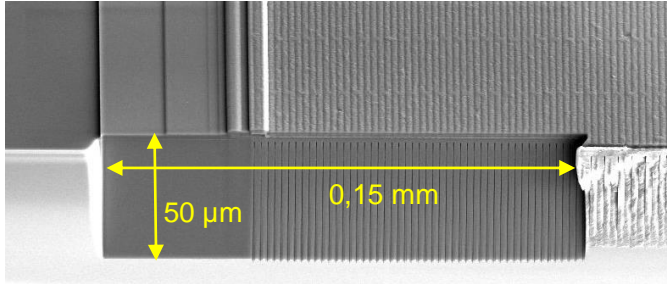
Annexe 1 (Broad Ion Beam)

48

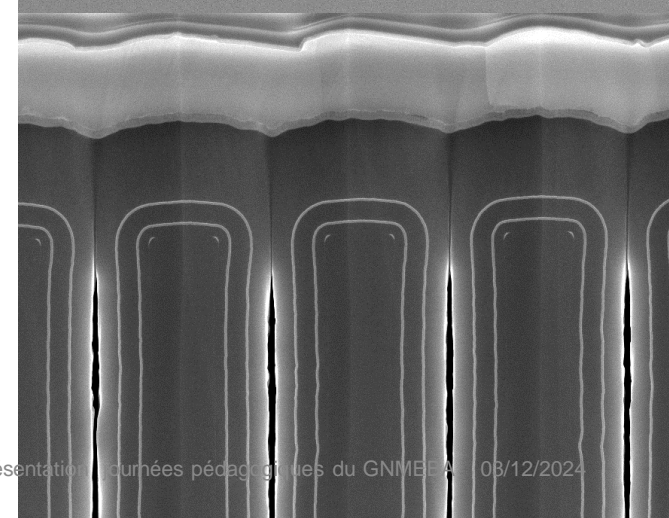
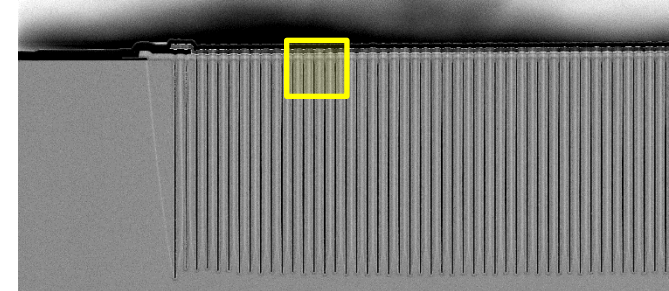
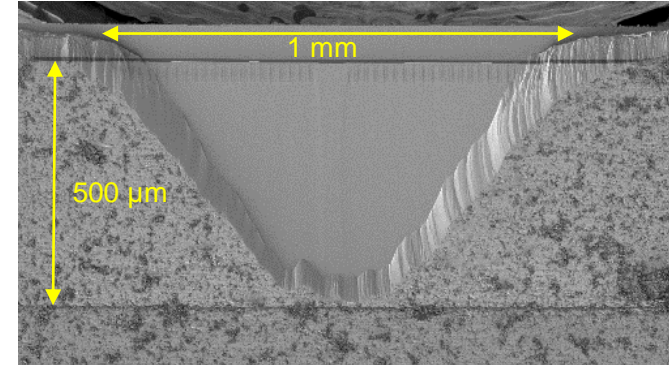


Annexe 1 (FiB versus BiB)

FIB



BiB



*About 150 μm wide FIB cross section compared to 1 mm for BiB cross section and 50 μm depth compared to 500 μm for BiB cross section In approximately the same time of milling.

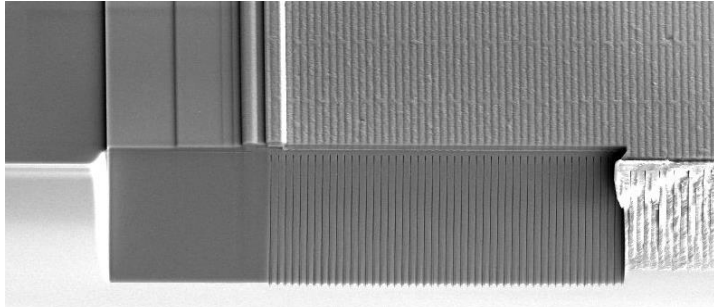
*Gallium ion species for Focus Ion Beam

*Argon ion species for Broad Ion Beam

*same surface state quality
At the top of sample

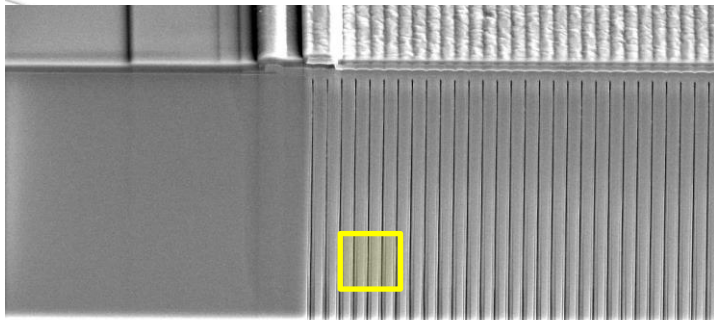
Annexe 1 (FiB versus BiB)

FIB

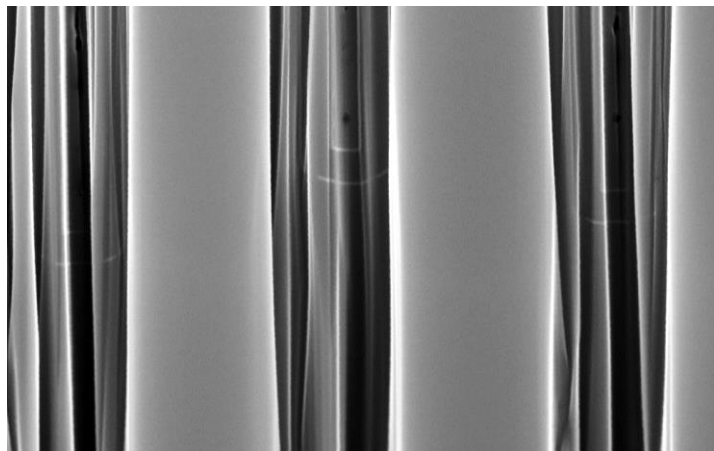


*no swing of the sample in the FIB

*swing of the sample in the BIB

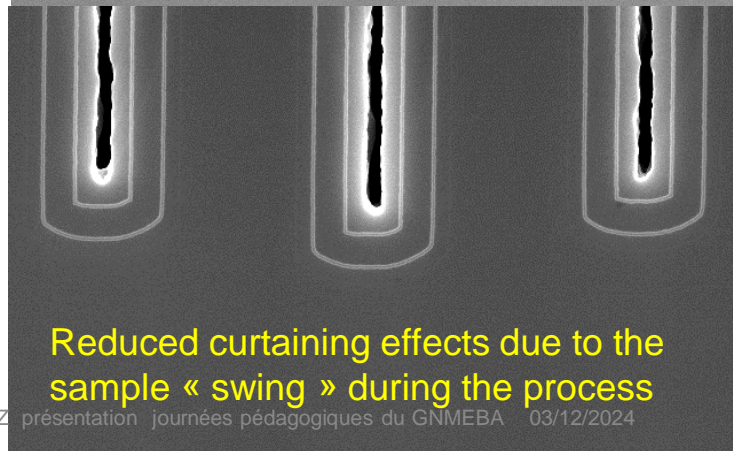
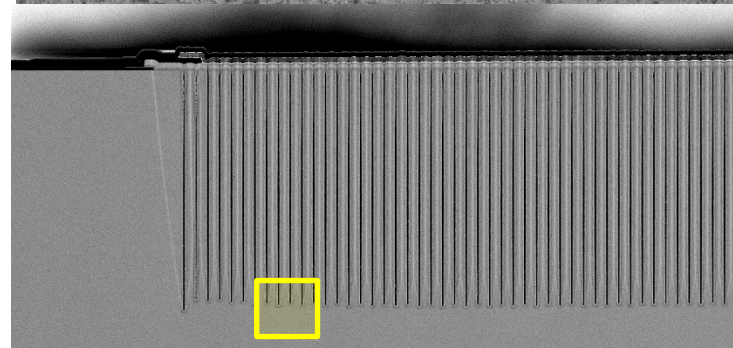
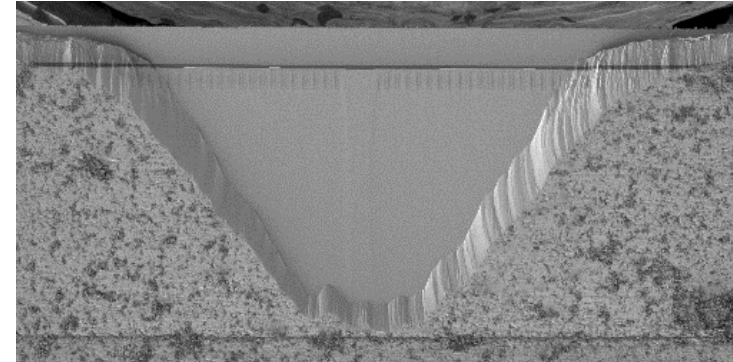


*bad surface state quality at the bottom of the cross section because of curtaining effect (due to voids in the trenches)



*no amorphization with Argon ion beam in finishing mode (EBSD sample preparation, AFM electrical mode..)

BiB



Reduced curtaining effects due to the sample « swing » during the process