



Mise au point d'un procédé de gravure d'aluminium sur oxyde de silicium dans la plateforme de micro et nanotechnologies du LAAS-CNRS

Pascal Dubreuil, David Quirion

► To cite this version:

Pascal Dubreuil, David Quirion. Mise au point d'un procédé de gravure d'aluminium sur oxyde de silicium dans la plateforme de micro et nanotechnologies du LAAS-CNRS. Rapport LAAS n° 19087. 2019. hal-02066017

HAL Id: hal-02066017

<https://laas.hal.science/hal-02066017>

Submitted on 13 Mar 2019

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.

Mise au point d'un procédé de gravure d'aluminium sur oxyde de silicium dans la plateforme de micro et nanotechnologies du LAAS-CNRS

Février 2019

Auteurs : P.Dubreuil (TEAM/LAAS)

D.Quirion (IMB-CNM)

Table des matières

Résumé	3
Objectif de la demande du CNM au LAAS.....	4
1 ^{ère} structure des plaquettes du IMB-CNM à traiter.....	4
Résultats.....	4
Etude d'un nouveau procédé de gravure de l'aluminium	7
Résultats.....	9
2 ^{ème} structure des plaquettes du IMB-CNM à traiter.....	10
Résultats.....	11
Conclusion.....	11
Bibliographie	13

Résumé

En avril 2018, L'institut de Microélectronique de Barcelone du Centre National de Microélectronique (IMB-CNM) a envoyé dans le cadre de Renatech, 8 plaquettes au LAAS pour deux gravures par plasma, sur des motifs d'aluminium différents avec arrêt sur oxyde de silicium.

Ces plaquettes sont issues de la fabrication des premiers prototypes de détecteurs 3D en technologie RD53 pour la mise à niveau du *Grand collisionneur de hadrons* (LHC au CERN).

En raison de leur géométrie particulière (jonction et contacts ohmiques dans le volume du silicium), ces détecteurs 3D résistent bien mieux au rayonnement attendu en haute luminosité que les détecteurs planaires. A terme, ils devraient être installés dans les détecteurs de pixels ATLAS et CMS au cours de la mise à niveau de la phase II en 2023-2025 [1].

Il s'agit de mettre au point un procédé de gravure anisotrope par plasma pour des technologies MOS et reproductible, qui soit adapté pour des surfaces d'aluminium à graver différentes. Enfin ce procédé doit être sélectif avec le substrat d'oxyde de silicium. Le IMB-CNM préconisait d'utiliser le BCl_3 ou BCl_3/Cl_2 , mais le LAAS n'avait pas ces chimies. Seule, la chimie $\text{Cl}_2 + \text{Ar}$ a été utilisée.

Les plaquettes ont été caractérisées en I(V) à IMB-CNM, ce qui a permis de valider le protocole de gravure d'aluminium du LAAS.

Deux présentations de IMB-CNM à des workshops en juin et novembre 2018, ont montré les bons résultats réalisés [5-6].

Objectif de la demande du CNM au LAAS :

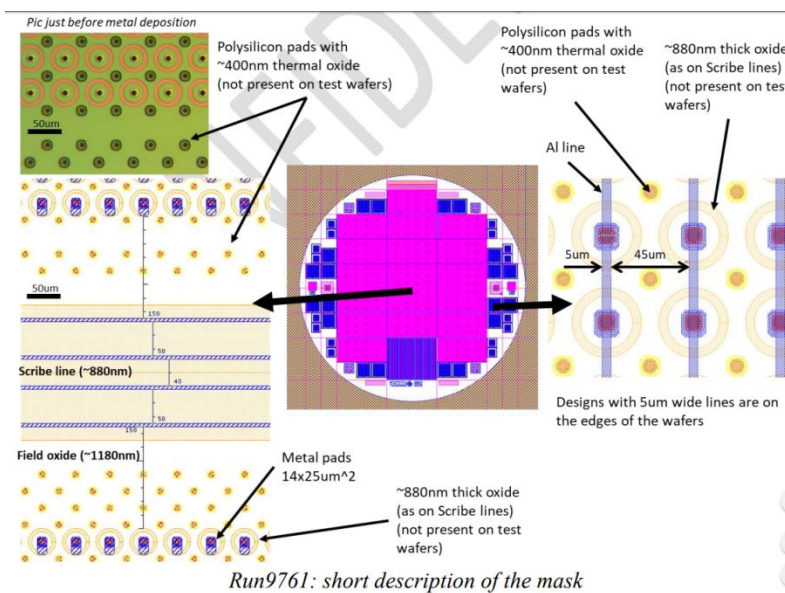
Il s'agit de mettre au point un procédé de gravure anisotrope par plasma propre et reproductible, qui soit adapté pour des surfaces d'aluminium à graver différentes et assez sélectif avec le substrat d'oxyde de silicium. Le CNM préconisait d'utiliser le BCl_3 ou BCl_3/Cl_2 , mais le LAAS n'avait pas ces chimies. Seule, la chimie Cl_2 a été utilisée.

1^{ère} run des plaquettes du IMB-CNM à traiter

RUN9761: Gravure anisotrope par plasma de 1 μm Al sur SiO_2

Le cahier des charges demandé par le CNM est le suivant (cf figure 1)

- 2 plaquettes de test 9761-DET-Ob9 et 9761-DET-Ob10
- Surface exposée et épaisseur à graver : 95% et 1 μm
- Masquage par résine réalisé au CNM : HiPR6517 1.8 μm d'épaisseur
- Dimension critique: lignes 5 μm large
- Substrat: oxyde thermique de silicium (SOI 450 μm)
- Couche d'arrêt sur l'oxyde de champ: ~ 1180nm
- **Sur-attaque attendue de l'oxyde: ~ 100nm**



Run9761: short description of the mask

Figure 1 : description des plaquettes de la série 9761

Résultats

L'équipement de gravure sèche par plasma qui a été utilisé est une ICP-RIE (figure 2).

Le nom de la recette qui a été utilisée est Al-Cl10.

Les paramètres de la recette sont : Cl_2 20sccm / 5mT / ICP 200W / bias 10W / T° 18 $^\circ\text{C}$

Cette recette a été testée sur un dépôt d'aluminium réalisé par PVD au LAAS sur silicium, pour une durée de 5min avec un suivi optique - Laser à 670nm pour visualiser la fin de la gravure sur le substrat de silicium.

Mise au point d'un procédé de gravure d'aluminium sur oxyde de silicium dans la plateforme de micro et nanotechnologies du LAAS-CNRS

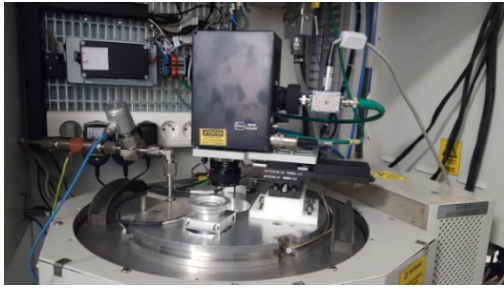


Figure 2 : ICP3 + système DFA laser

Le suivi optique laser est monté sur la chambre de gravure de ICP3, et le signal laser est transmis à travers le hublot. Le diamètre du spot laser étant de 100 μ m.

Nous observons pour la gravure de la plaquette test du LAAS (figure 3), deux changements de pente du signal laser. Le premier changement de pente indique une gravure de l'aluminium. Le deuxième changement de pente indique la transition entre Al et Si. Il est à noter que la gravure a été réalisée immédiatement après le dépôt d'Al par PVD pour éviter l'oxydation de l'aluminium (figure 4).

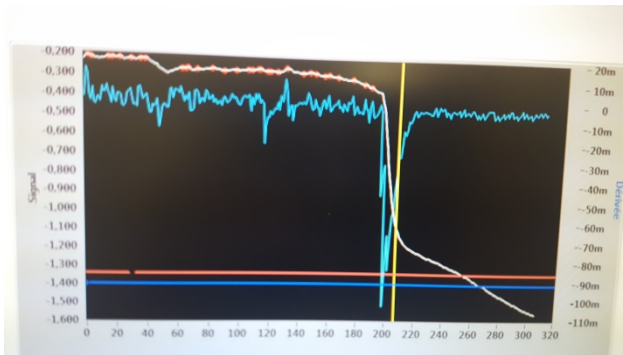


Figure 3 : suivi optique laser Al sur Si

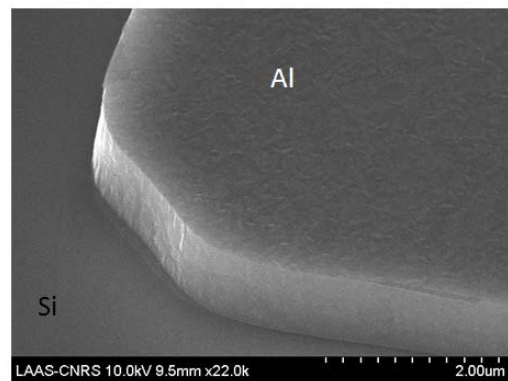
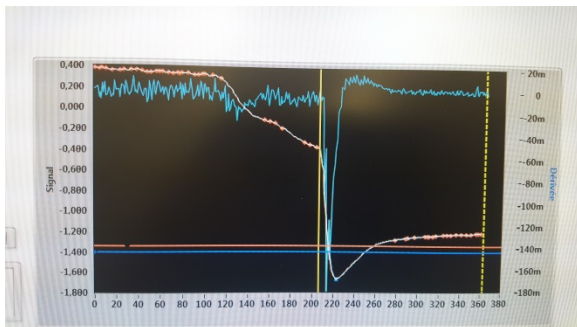


Figure 4 : 1 μ m Al gravé sur Si

Ensuite, cette recette a été utilisée pour traiter les plaques du run 9761 pour une durée de 6min avec un suivi optique - Laser à 670nm pour la fin de gravure et optimiser la sur-gravure dans la couche de SiO₂. La résine de masquage a été déposée au CNM, et les plaquettes ont été envoyées au LAAS. Il est possible qu'un oxyde natif Al₂O₃ soit présent sur l'aluminium.



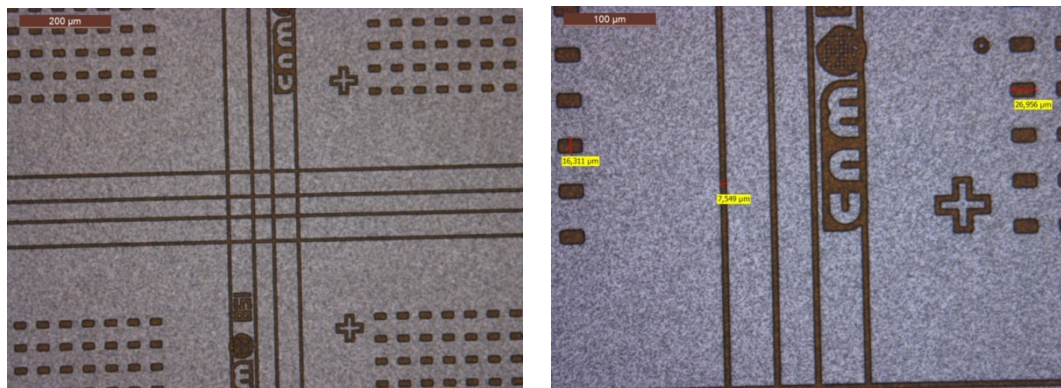
Images 5 : Signal laser de la gravure Al 1 μ m pour la plaquette 9763DETOB9.

On observe pour la gravure de la plaquette 9761-DET-Ob9 (photo 5), trois changements de pente du signal. Le premier changement de pente indique la gravure de l'oxyde d'aluminium. Le deuxième changement de pente indique la gravure de l'aluminium.

Mise au point d'un procédé de gravure d'aluminium sur oxyde de silicium dans la plateforme de micro et nanotechnologies du LAAS-CNRS

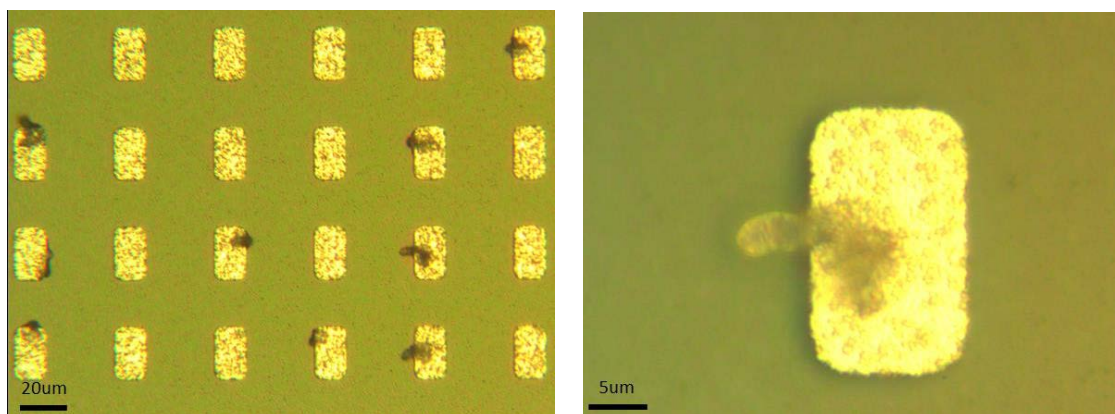
Le troisième changement de pente indique la transition entre aluminium et SiO_2 .

Au préalable, il a été fait une observation au microscope optique des structures sur les plaquettes à traiter (figures 6-7).



Figures 6 et 7: avant gravure au plasma, pour 9761-DET-0b9 et 9761-DET-0b10.

Ensuite, après chaque gravure, il a été fait une observation au microscope optique des structures sur les plaquettes traitées (figure 8-9)



Figures 8 et 9: après gravure et avant délaquage de la résine HiPR6517. Il y a des résidus.

Enfin, des observations ont été faites au microscope électronique à balayage et par microanalyse EDX de la nature chimique des résidus, au CNM (figures 10-11).

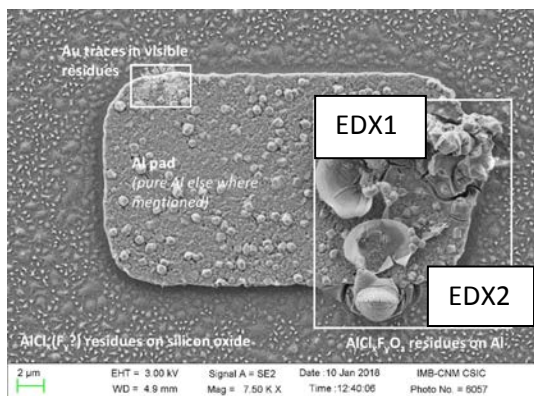


Figure 10: observation MEB au IMB-CNM d'un pad d'aluminium après gravure.

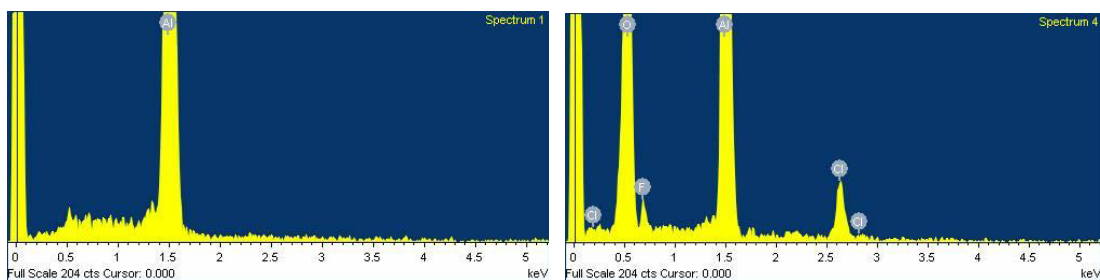


Figure 11 : spectres EDX réalisés au IMB-CNM : EDX1 et EDX2

En conclusion, sur ce premier run, la recette du LAAS peut graver Al sur SiO_2 , mais elle produit des résidus AlCl_xF_y sur l'aluminium et AlCl_x sur l'oxyde qui rendent les plaquettes inutilisables. En effet, ni acétone ni plasma d'oxygène ne pourront les éliminer.

Etude d'un nouveau procédé de gravure de l'aluminium

Pour réaliser cette gravure d'aluminium, il fallait étudier un procédé propre qui évite la prolifération de défauts $\text{AlCl}_x(\text{F}_y)$ ainsi que la corrosion de type Al_2O_3 en surface des plaquettes (figure 12). Al_2O_3 est présent en surface des plaquettes, il réagit avec l'oxygène de l'air, mais réagit aussi avec la résine de masquage et avec le SiO_2 enterré.

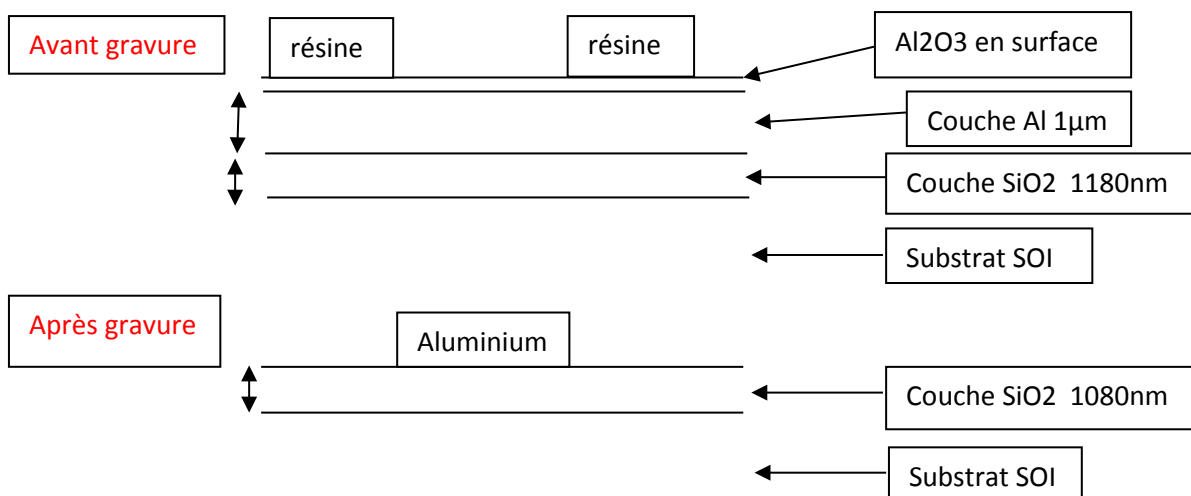


Figure 12 : schémas des matériaux du run 9763, avec oxyde Al_2O_3 en surface, avant et après gravure.

A partir d'une étude bibliographique sur le sujet, trois articles pourraient expliquer le problème rencontré lors de la gravure Al et proposent des solutions [2-4].

Reichelderfer [2] montre que par l'utilisation d'un plasma chloré (Cl_2), des composés AlCl_x sous forme solides se forment en surface de l'aluminium et sur la résine de masquage. Ces résidus peuvent continuer à faire des sur-gravures localisées sous forme de HCl en contact avec l'air. Reichelderfer propose d'augmenter la pression de Cl_2 pour éliminer ces résidus.

De notre point de vue, l'augmentation de la pression, augmenterait la vitesse de gravure de l'aluminium. Mais, l'anisotropie de la gravure ainsi que le suivi de la gravure par laser serait plus compliqués à maîtriser dans la couche d'arrêt de SiO_2 .

Spencer [3] propose d'augmenter la température dans la chambre de gravure. Un procédé de gravure à 35°C éviterait les résidus de AlCl_3 . De plus, la pression de vapeur d' AlCl_3 à 27°C est de l'ordre de 0.1mTorr.

De notre point de vue, l'augmentation de la température, augmenterait la vitesse de gravure de l'aluminium. Mais, le suivi de la gravure par laser serait plus compliqué à maîtriser dans la couche d'arrêt de SiO_2 . Cependant, les parois de la chambre de ICP3 sont chauffées à 60°C , et la plaquette est maintenue à une température constante de 18°C pendant la gravure.

Spencer préconise aussi de passer les plaquettes gravées directement sous cascade d'eau dé-ionisée avant le délaquage par plasma d'oxygène.

Une autre voie est possible, pour enlever la couche d'oxyde d'aluminium, c'est d'ajouter au chlore un gaz inerte comme l'argon pour permettre la gravure de l'aluminium et éliminer l'oxyde d'aluminium, dans les conditions de plasma [4].

De notre point de vue, l'ion Ar^+ issu du plasma permet de bombarder la surface d'aluminium pour bloquer la formation des composés AlCl_x .

Quatre plaquettes supplémentaires 11513-DET furent envoyées de l'IMB-CNM et gravées au LAAS. Les deux tableaux suivants résument les résultats obtenus.

Tranche	Paramètres plasma			Résultats de la gravure				Commentaires
	Ar (sccm)	T ($^\circ\text{C}$)	p (mTorr)	Grav. Oxyde ($\text{\AA}$)	Fit oxyde	Grav. Latérale Al (μm)	AlCl_x (Y/N)	
9761-DET-9	0	18	5	194	1,75	0,7	Y	
11513-DET-1	0	18	10	815	0,20	2,5	-	SEM+EDX non réalisé
11513-DET-2	0	30	5	615	0,02	2,9	N	
11513-DET-3	20	18	5	315	1,05	1,4	N	
11513-DET-4	20	30	5	445	0,52	1,7	Y	

Tableau 1 : Paramètres étudiés pour la mise au point de la recette de gravure Al.

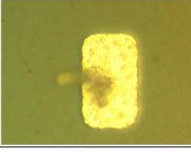
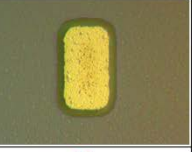
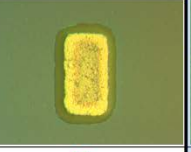
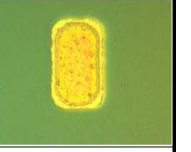
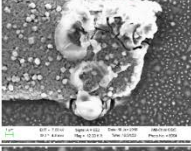
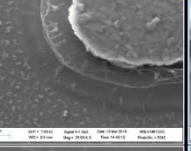
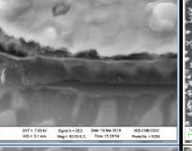
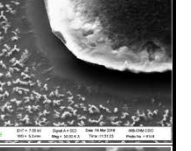
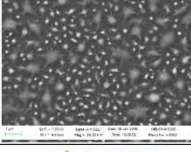
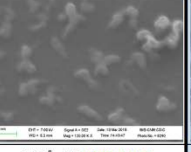
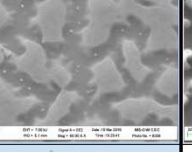
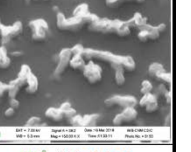
Tranche	9761-DET-9 & 10	11513-DET-1	11513-DET-2	11513-DET-3	11513-DET-4
Conditions de gravure	Cl ₂ : 20sccm ICP=500W – Bias=10W p=5mTorr – T=18°C – t=6'	Cl ₂ : 20sccm ICP=500W – Bias=10W p=10mTorr – T=18°C – t=4'40"	Cl ₂ : 20sccm ICP=500W – Bias=10W p=5mTorr – T=30°C – t=6'40"	Cl ₂ : 20sccm – Ar: 20sccm ICP=500W – Bias=10W p=5mTorr – T=18°C – t=6'+1'	Cl ₂ : 20sccm – Ar: 20sccm ICP=500W – Bias=10W p=5mTorr – T=30°C – t=6'25"
Pad P1 après RIE					
Gravure latérale Résidu sur Al	0,7µm Résidu AlCl ₃ F ₃ O ₂	2,5µm	2,9µm Résidu de résine	1,4µm Résidu de résine	1,7µm Résidu de résine
Pad Al après r RIE		Résumé des tests de RIE Al au LAAS CNM840 niveau Metal			
Oxyde de champ après RIE					
Surgravure oxyde - fit Résidu sur oxyde	194Å – fit: 1,15-2,34 Résidu AlCl ₃ (F ₃)	815Å – fit 0.10-0.29	615Å – fit 0.008-0.027 Très peu de résidu d'Al	315Å – fit 0.50-1.60 Très peu de résidu d'Al	445Å – fit 0.31-0.73 Résidu AlCl ₃ (F ₃)

Tableau 2 : Observations des résultats de gravure de Al en fonction des paramètres étudiés.

Sur la plaquette 11513-DET-1, seule la pression est changée par rapport à la recette Al-Cl10 utilisée sur les plaquettes 9761-DET-9 et 10. Sur les plaquettes 11513-DET-2, 3 et 4 sont variés le flux d'argon et la température.

Les critères d'acceptation du procédé de gravure par l'IMB-CNM étaient les suivants :

- Une gravure latérale de l'aluminium modérée.
- Un sur-gravure du substrat d'oxyde de silicium modérée
- Aucun résidu AlCl₃.

Au vu de ces critères, le procédé de gravure de la plaquette 11513-DET-3 est le meilleur.

Résultat

Une nouvelle recette Al-CNM est proposée :

Cl₂ 20sccm + Ar 20sccm / 10mT / ICP 500W / bias 10W / T° 18°C

Ainsi, un protocole a été mis au point pour éviter la corrosion de l'aluminium et éliminer les résidus AlCl₃(F₃). Il y a trois étapes à réaliser dans l'ordre :

- 1) Gravure RIE de l'aluminium en chimie chlorée.
- 2) Passage des plaquettes gravées sous une cascade d'eau dé-ionisée pendant 1min.
- 3) Délaquage de la résine par plasma d'oxygène pendant 5min.

Mise au point d'un procédé de gravure d'aluminium sur oxyde de silicium dans la plateforme de micro et nanotechnologies du LAAS-CNRS

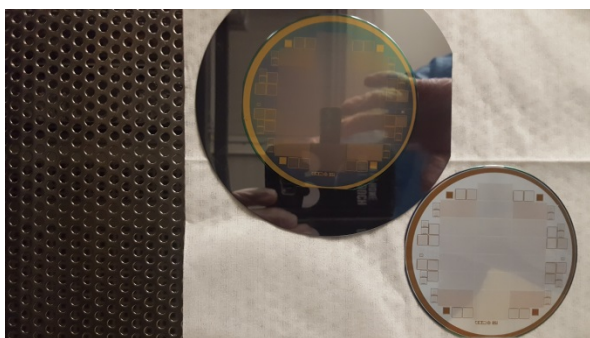


Figure 13 : plaquette avant la gravure.

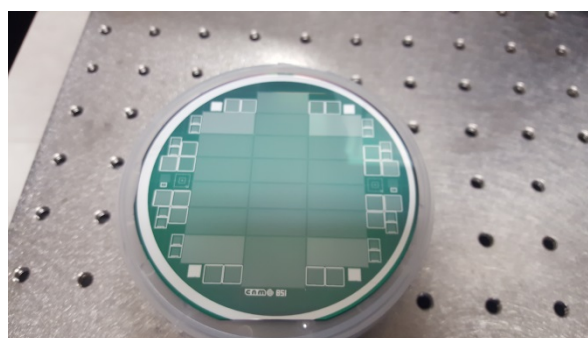


Figure 14: plaquette après la gravure et délaquée.

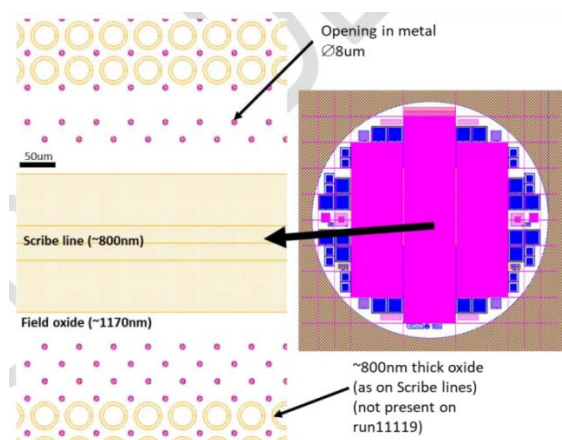
On peut observer sur les figures 13 et 14, la couleur verte uniforme du SiO_2 après gravure et délaquage, et la couleur grise de l'aluminium avant la gravure.

2^{ème} structure des plaquettes du IMB-CNM à traiter

RUN1118: Gravure anisotrope par plasma de $1 \mu\text{m}$ Al sur SiO_2

Le cahier des charges demandé par le IMB-CNM est le suivant (figure 19)

- 2 plaquettes de test 11118-DET-0b1 et 11118-DET-0b2
- Surface exposée et épaisseur à graver : **<5%** et $1 \mu\text{m}$
- Masquage par résine réalisé au CNM : HiPR6517 $2.0 \mu\text{m}$ d'épaisseur
- Dimension critique: contacts ronds $\varnothing 8 \mu\text{m}$
- Substrat: silicium ($525 \mu\text{m}$)
- Couche d'arrêt sur l'oxyde de champ: $\sim 400 \text{nm}$
- **Sur-attaque attendue de l'oxyde: $\sim 50 \text{nm}$, mais MEB au IMB-CNM**
- oxyde de silicium éliminé par gravure à l'étape suivante, laisser la résine après le processus de gravure.



Runs11118 & 11119: short description of the mask

Figure 19 : description des motifs d'aluminium à graver.

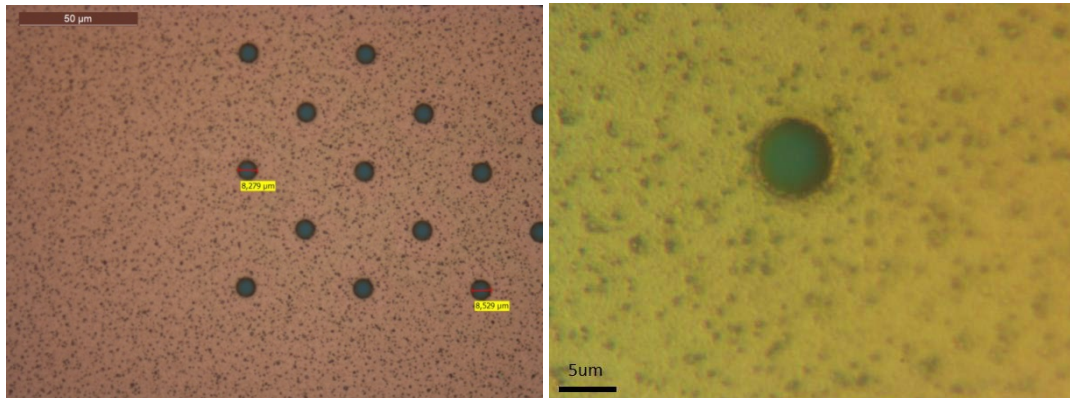
Mise au point d'un procédé de gravure d'aluminium sur oxyde de silicium dans la plateforme de micro et nanotechnologies du LAAS-CNRS

Résultats

Le nom de la recette qui a été utilisée est Al-CNM pour une durée de **13min** sans un suivi optique - laser pour la fin de gravure.

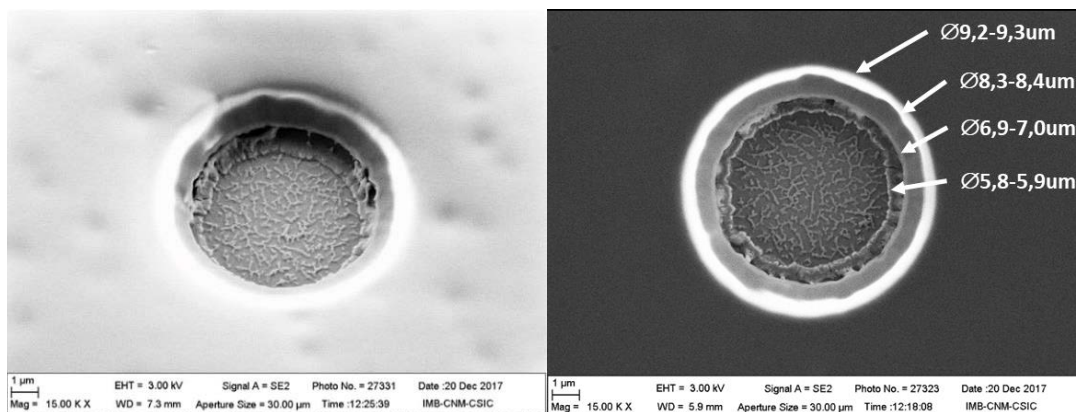
Ici, la première difficulté due à la surface à graver qui est inférieure à 5% et des motifs $\varnothing 8\mu\text{m}$ qui sont trop espacés.

La deuxième difficulté a été l'optimisation la sur-gravure dans la couche de SiO_2 . En effet la mesure par profilométrie tactile a été impossible dans un trou de $\varnothing 8\mu\text{m}$. Seule l'observation optique au microscope a pu être réalisée.



Figures 20 et 21: avant gravure au plasma, pour 1118-DET-0b1 et 1118-DET-0b2.

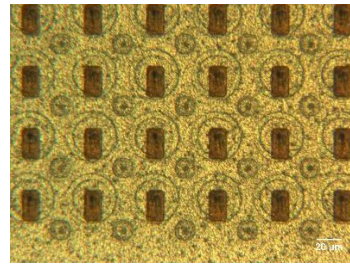
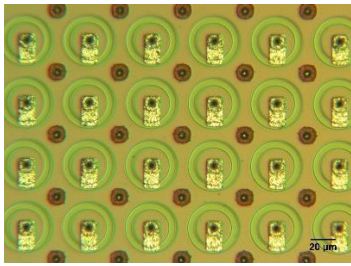
Par la suite, une observation au microscope à balayage au IMB-CNM a validé le procédé de gravure et le protocole étudiés (figures 22 et 23).



Conclusion

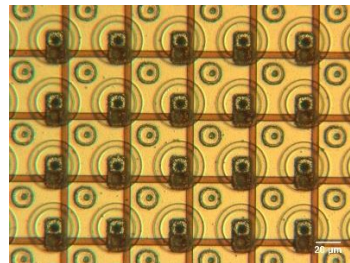
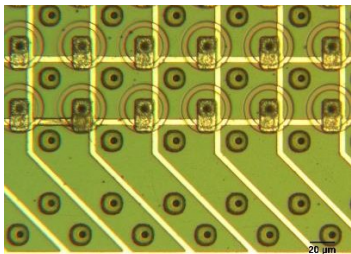
Premièrement, les contacts en aluminium des pixels ont été gravés. Comme on peut le voir sur les figures 24 et 25, la gravure sur l'aluminium était satisfaisante avec une sur-attaque contrôlée de l'oxyde de champ ($\sim 300\text{\AA}$).

Mise au point d'un procédé de gravure d'aluminium sur oxyde de silicium dans la plateforme de micro et nanotechnologies du LAAS-CNRS



Figures 24 et 25 : 9761-DET-2 avant et après gravure sur aluminium de contacts métalliques.

Deuxièmement, un métal temporaire a été gravé sur la passivation afin d'interconnecter tous les pixels afin de caractériser l'ensemble du détecteur en une seule mesure. Comme on peut le constater sur les figures 26 et 27, la gravure de l'aluminium était satisfaisante avec une sur-attaque minimale de la passivation (<200 Å).



Figures 26 et 27 : 9761-DET-4 avant et après la gravure de métal provisoire sur aluminium.

Enfin, les détecteurs ont été caractérisés au CNM et ont donné un bon rendement à ce stade du prototype (figure 28).

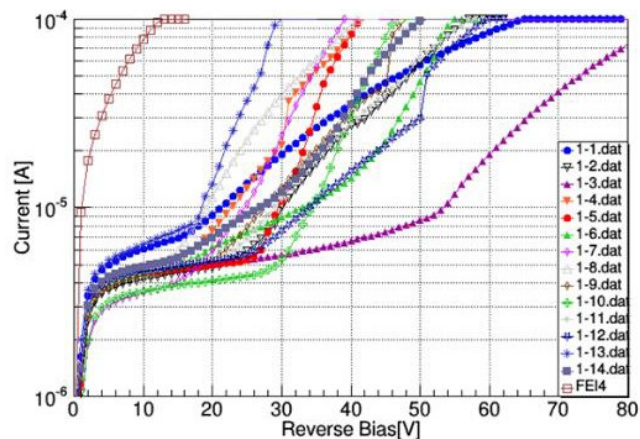


Figure 28 : caractéristiques I (V) des détecteurs (plaquette 9761-DET-5)

En résumé, le LAAS peut réaliser une gravure par plasma anisotrope reproductible de 1 μm Al sur une couche d'arrêt de SiO₂ dans les deux structures différentes, des RUN 9761-DET et RUN 1118-DET. Il est possible de s'arrêter dans une couche de SiO₂ avec une sur-gravure inférieure à 50 nm dans les deux cas en contrôlant la gravure par suivi optique-laser.

Deux présentations de IMB-CNM à des workshops dans les mois qui ont suivi cette étude, ont montré des bons résultats réalisés [5-6].

Bibliographie

- [1] F.J. Muñoz, *Module and electronics developments for the ATLAS ITk pixel system*, J.Inst. 13 (2018) C03045
- [2] R.F. Reichelderfer, *Single wafer plasma etching: I. Al and Al/Si alloys*, Solid State Technol. 25(4) (1982) 160.
- [3] J.E.Spencer, *Management of AlCl₃ in plasma etching of Al and its alloys*, Solid State Technol. 27 (1984) 203-207.
- [4] D. A. Danner, *Plasma Etching of Aluminum: A Comparison of Chlorinated Etchants*, J. Electrochem. Soc. 1987 134(3): 669-673
- [5] M. Manna, *Comparative investigation of irradiated small-pitch 3D strip detectors*, 32nd RD50 Workshop, Hamburg (juin 2018)
- [6] G. Giannini , *Test beam results of irradiated RD53A 3D modules for ATLAS ITk pixel detector*, 33rd RD50 workshop, CERN (novembre 2018)