

Titre: Microfabrication de tranchées d'isolement et de trous
Title: d'interconnexion à travers le silicium (TSV) pour l'amélioration de
photomultiplicateurs de silicium(SiPM)

Auteur: Kevin Lemieux
Author:

Date: 2017

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Lemieux, K. (2017). Microfabrication de tranchées d'isolement et de trous
Citation: d'interconnexion à travers le silicium (TSV) pour l'amélioration de
photomultiplicateurs de silicium(SiPM) [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique
de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/2731/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie:
PolyPublie URL: <https://publications.polymtl.ca/2731/>

**Directeurs de
recherche:** Yves-Alain Peter, & Philippe Vasseur
Advisors:

Programme: Génie physique
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

MICROFABRICATION DE TRANCHÉES D'ISOLEMENT ET DE TROUS
D'INTERCONNEXION À TRAVERS LE SILICIUM (TSV) POUR L'AMÉLIORATION DE
PHOTOMULTIPLICATEURS DE SILICIUM (SIPM)

KEVIN LEMIEUX

DÉPARTEMENT DE GÉNIE PHYSIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE PHYSIQUE)

MAI 2017

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

MICROFABRICATION DE TRANCHÉES D'ISOLEMENT ET DE TROUS
D'INTERCONNEXION À TRAVERS LE SILICIUM (TSV) POUR L'AMÉLIORATION DE
PHOTOMULTIPLICATEURS DE SILICIUM (SIPM)

présenté par : LEMIEUX Kevin

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. DESJARDINS Patrick, Ph. D., président

M. PETER Yves-Alain, D. Sc., membre et directeur de recherche

M. VASSEUR Philippe, DEST, membre et codirecteur de recherche

Mme SANTATO Clara, Doctorat, membre

DÉDICACE

Aux personnes les plus importantes dans ma vie, qui m'ont fait grandir et réussir :

Mes parents Denis Lemieux et Line Corbeil;

Ma sœur Mélanie Lemieux;

Ma copine Gabrielle Sirois;

Mes amis Mathew Blackburn, Jacques-Philippe Fort, David Thérien et Francis Bélanger.

REMERCIEMENTS

Il y a beaucoup de gens que je souhaite remercier pour la réalisation de mon projet de maîtrise passé à Excelitas. Puisque ce mémoire est prévu de marquer la fin de mes longues années d'études et qu'il n'y a pas de maximum de mots dans cette section, alors je m'en profite...

À **Excelitas**, je remercie tous les membres de l'équipe de support aux procédés qui m'ont aidé à la réalisation de mon projet :

- Philippe Vasseur (mon co-directeur de recherches et chef d'équipe), pour ses sages paroles, son expérience professionnelle et ses corrections rigoureuses apportées à mon mémoire;
- Pierre Lussier (alias Einstein = « Ein Stein » = « Une Pierre » [de l'allemand]), pour ses compétences ultimes en gravure ionique réactive, ses jeux de mots hors du commun et ses règles de trois;
- Sébastien Pigeon, pour ses compétences ultimes en photolithographie, sa patience et sa tranquillité qui apaisaient régulièrement mon galopant chakra interne et pour l'inspirante énergie scientifique qu'il dégage;
- Fatou Binetou Koné, pour ses compétences versatiles dans « tout!? », ses commentaires argumentés convaincants sur la syntaxe de la langue française et pour ses sages conseils à ne pas trop jouer au ninja;
- Murthy Rambhatla, pour ses compétences en oxydation thermique et son aide déchaînée sur la chimie du nettoyage des tranches de silicium;
- Viara Hristova, pour ma formation au clivage et au microscope électronique à balayage, ainsi que pour son généreux partage de ses instruments de clivage;
- Olivier Boudreault, pour sa passion compréhensive que nous partageons pour les photodiodes et les plasmas, ses compétences en techniques de métrologie de surface et son dynamisme tatoué d'un mystérieux style sportif.

Je les remercie aussi, tout comme les autres membres de jour de l'équipe, Sam Donato, Liane Saint-Denis, Hala Ghali, Oxana Nassyrova, Viorica Muresan, Grigore Huminic, pour leur soutien et leur respect. C'était vraiment un réel plaisir de travailler avec tout le monde.

Je remercie également le responsable des photomultiplicateurs de silicium dans l'équipe de recherche et développement d'Excelitas, Martin Couture, pour ses compétences inégalées sur les photomultiplicateurs de silicium et son admissibilité malgré toutes ses occupations professionnelles inexhaustibles.

Je tiens aussi à remercier Christian Vérité (en amélioration continue) et Philippe Simoes (directeur du bâtiment et des équipements) pour les discussions extrêmes que nous avons échangées qui ont grandement amélioré cette aventure.

À l'école Polytechnique de Montréal, je tiens à remercier mon directeur de recherches Yves-Alain Peter pour son soutien, sa pédagogie et ses compétences essentielles en microfabrication. Je l'imagine lire ce mémoire en skiant à haute vitesse au Mont-Tremblant, parce que cette situation ne semble pas trop loin de la réalité.

Je remercie aussi Philippe Plamondon, Arslane Bouchemit et Nicole MacDonald, membres de l'équipe du laboratoire (CM)², pour leur formation et soutien sur l'utilisation de leur microscope électronique à balayage et pour m'avoir donné des disponibilités flexibles sur cet équipement.

En dehors de mes heures d'ouvrage, je remercie ma copine, Gabrielle Sirois, pour toutes les anecdotes partagées jusqu'à maintenant, son soutien constant dans mes moments difficiles et pour son paisible et charmant aura de tranquillité (ou de « calmité » comme j'ai tendance à dire).

Je remercie aussi mon ami Mathew Blackburn pour mes ultra-doses de divertissement total à l'écart du sérieux professionnel dans les mondes imaginaires et virtuels, nos passions réciproques pour le « geekiness », nos « road-trips » de fous, ainsi que ses partages de réflexions psychologiques et philosophiques sur le monde réel. Par contre, on ne jouera plus au ninja; vive D&D et les jeux vidéo avec les « trinklets » clos.

Je remercie aussi ma plus vieille amie, ma petite sœur Mélanie Lemieux, pour son dynamisme extraordinaire et pour avoir toujours été là pour moi.

Finalement, je remercie mes parents Denis Lemieux et Line Corbeil. Mon père, qui m'a transmis sa discipline et qui a fait naître ma passion pour les mathématiques à un très bas âge. Je lui dois mon intérêt professionnel, mon plaisir à repousser toujours plus loin mes objectifs et mon esprit critique et logique. Ma mère, qui m'a donné tout ce qu'elle pouvait humainement donner et à qui je lui dois le bon fond de ma personnalité, mon dévouement et mon caractère sentimental.

RÉSUMÉ

Le projet exposé dans ce mémoire de maîtrise constitue le tout premier pas vers l'intégration 3D pour la compagnie Excelitas, qui investit dans la production, la recherche et le développement de produits optoélectroniques. L'objectif du projet consiste à développer et tester un procédé de microfabrication dans la salle blanche d'Excelitas pour : la formation par DRIE (gravure ionique réactive profonde) de tranchées et de TSV (trous d'interconnexion à travers le silicium) de facteur de forme élevé, leur oxydation, leur remplissage par du polysilicium et la planarisation de ce polysilicium par RIE (gravure ionique réactive). Un tel procédé a été élaboré dans un premier temps pour améliorer les SiPM (photomultiplicateur de silicium) d'Excelitas, mais son utilisation pourra éventuellement s'étendre vers d'autres produits de la compagnie.

Les tranchées et les TSV (de type « via-first ») sont formés par DRIE avant les étapes FEOL (« Front-End-Of-Line ») avec des masques de photorésine positive. Les tranchées constituent la première structure formée (par DRIE). Elles sont verticales, de dimensions $2,1\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ et entourent chaque cellule de SiPM. Les TSV sont formés au milieu de ces cellules. Leur design comprend une partie cylindrique ($3\ \mu\text{m} \times 29\ \mu\text{m}$) et une partie prismatique à base carrée ($36\ \mu\text{m} \times 346\ \mu\text{m}$). Pour ce faire, la partie cylindrique est d'abord formée par DRIE. Les dimensions obtenues sont alors $3\ \mu\text{m} \times 42\ \mu\text{m}$, soit un facteur de forme d'environ 14. Ensuite, la partie prismatique à base carrée est formée, aussi par DRIE, de l'autre côté des tranches. Leur gravure s'arrête automatiquement grâce à une technique de détection de fin d'attaque par fuite d'hélium (He-LEPD) lorsque la partie prismatique rejoint la partie cylindrique.

L'oxydation des structures (tranchées et TSV) est effectuée dans un tube d'oxydation pour faire croître 540 nm de SiO_2 . Le polysilicium est ensuite déposé dans les structures par LPCVD (dépôt chimique en phase vapeur à basse pression), puis aplani par RIE des deux côtés des tranches de silicium. Ce polysilicium sert à préparer les tranches pour les étapes subséquentes de BEOL (« Back-End-Of-Line »), qui incluent la formation des lignes de résistance et de conduction électriques.

Ce mémoire expose les résultats obtenus de la formation des tranchées et des TSV, ainsi que quelques défis qui ont dû être surmontés pour y arriver. Des étapes suivantes au projet sont finalement suggérées en vue de l'intégration de ces structures dans les produits d'Excelitas.

ABSTRACT

The project exposed in this master thesis constitutes the first step into 3D integration by the company Excelitas, that invests in production, research and development of optoelectronic devices. The main goal of the project is to develop and test a microfabrication process in the clean room of Excelitas for: the formation by DRIE (deep reactive ion etching) of trenches and high aspect ratio TSV (through-silicon vias), their oxidation, their polysilicon filling and the planarization of that polysilicon by RIE (reactive ion etching). Such a process has been established at first to improve Excelitas' SiPM (silicon photomultiplier), but its use could eventually extend to other products of the company.

The trenches and the TSV (of type "via-first") are formed by DRIE before the FEOL ("Front-End-Of-Line") steps with positive photoresist masks. The trenches constitute the first formed structure (by DRIE). They are vertical, of dimensions $2,1\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ and surround each cell of the SiPM. The TSV are formed in the center of those cells. Their design includes a cylindrical part ($3\ \mu\text{m} \times 29\ \mu\text{m}$) and a prismatic square-based part ($36\ \mu\text{m} \times 346\ \mu\text{m}$). In order to do so, the cylindrical part is first formed by DRIE. The achieved dimensions are then $3\ \mu\text{m} \times 42\ \mu\text{m}$, that to say an aspect ratio of about 14. Next, the prismatic part is formed, also by DRIE, on the other side of the wafers. Their etching automatically stops thanks to an end point detection technic using helium leakage when the prismatic part meets the cylindrical part.

The oxidation of the structures (trenches and TSV) is done in an oxidation tube to grow 540 nm of SiO_2 . The polysilicon is deposited afterward into the structures by LPCVD (low pressure chemical vapor deposition) and then planarized by RIE on both sides of the silicon wafers. The polysilicon is used to prepare wafers for the subsequent BEOL ("Back-End-Of-Line") steps, which include the formation of electrical resistance and conduction lines.

This thesis exposes the results obtained from the formation of the trenches and the TSV, as well as some challenges that had to be overcome for the accomplishment. Some project's next steps are finally suggested in order to integrate those structures into the products of Excelitas.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	VI
ABSTRACT	VII
TABLE DES MATIÈRES	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	XIV
LISTE DES FIGURES	XV
LISTE DES ABRÉVIATIONS, ACRONYMES ET VARIABLES	XXI
LISTE DES ANNEXES	XXVI
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 De la jonction PN au photomultiplicateur de silicium amélioré par intégration 3D (trois dimensions)	1
1.2 Photomultiplicateurs de silicium (SiPM)	1
1.3 Trous d'interconnexion à travers le silicium (TSV) et avantages	2
1.3.1 Avantages : « More Moore ».....	3
1.3.2 Avantages : « More than Moore ».....	3
1.4 Tranchées d'isolement.....	4
1.5 Contexte du projet	4
1.6 But et contraintes du projet	5
1.7 Approche envisagée	6
1.8 Recherche et développement dans un laboratoire de production	9
CHAPITRE 2 CARACTÉRISTIQUES D'UN PHOTOMULTIPLICATEUR DE SILICIUM.....	12
2.1 Facteur de remplissage	14

2.2	Gain	14
2.3	Efficacité quantique.....	14
2.4	Efficacité de détection de photons	15
2.5	Bruit.....	15
CHAPITRE 3 TECHNIQUES DE MICROFABRICATION		17
3.1	Méthodes de dépôt chimique en phase vapeur et oxydation thermique du silicium.....	17
3.1.1	CVD	17
3.1.2	LPCVD.....	19
3.1.3	PECVD.....	20
3.1.4	Oxydation thermique du silicium.....	20
3.2	Photolithographie	22
3.2.1	Photorésine positive vs négative et photoréaction par UV	23
3.2.2	Apprêt par application de molécules d'hexamethyldisilazane (HMDS).....	24
3.2.3	Dépôt de résine par tournette	25
3.2.4	Exposition aux UV	27
3.2.5	Développement humide de la photorésine	30
3.2.6	Rinçage-séchage.....	31
3.2.7	Types de cuisson	31
3.2.8	Photostabilisation après développement	33
3.3	Introduction sur la gravure et ses caractéristiques	34
3.3.1	Contrôlabilité d'arrêt.....	36
3.3.2	Degré d'anisotropie	37
3.3.3	Produits de gravure.....	38
3.3.4	Profil de surface	39

3.3.5	Facteur de forme.....	39
3.3.6	Reproductibilité.....	39
3.3.7	Sélectivité.....	40
3.3.8	Topographie de gravure	40
3.3.9	Taux de gravure.....	40
3.3.10	Uniformité sur la tranche.....	41
3.4	Gravure humide.....	41
3.5	Gravure au plasma.....	42
3.5.1	Définition du plasma	43
3.5.2	Formation d'un plasma : interactions <i>électrons – molécules de gaz</i>	44
3.5.3	Gravure au plasma : interactions <i>plasma – surface</i>	46
3.5.4	Gravure ionique réactive (RIE).....	50
3.5.5	Gravure ionique réactive profonde (DRIE).....	56
3.5.6	Paramètres de RIE et de DRIE.....	61
CHAPITRE 4	TROUS D'INTERCONNEXION À TRAVERS LE SILICIUM (TSV) ET TRANCHÉES D'ISOLEMENT	67
4.1	TSV	67
4.1.1	Formation des TSV	67
4.1.2	Défis dans la formation des TSV par DRIE.....	69
4.1.3	TSV réalisés ailleurs par DRIE	75
4.2	Phénomène de diaphonie.....	76
4.2.1	Description de la diaphonie.....	76
4.2.2	Tranchées d'isolement.....	76
CHAPITRE 5	MÉTHODOLOGIE.....	78
5.1	Équipements utilisés.....	78

5.1.1	Rinçage-séchage.....	78
5.1.2	Ressources pour les étapes de photolithographie.....	78
5.1.3	Ressources pour les étapes de CVD et d'oxydation thermique	81
5.1.4	Ressources pour les étapes de gravure	81
5.1.5	Ressources pour la caractérisation	82
5.1.6	Descriptions courtes des équipements.....	82
5.2	Nettoyage initial	90
5.3	Étapes du procédé de test	90
5.3.1	Formation des tranchées et des TSV (étapes a - j)	93
5.3.2	Décontamination et oxydation des tranches (étapes j - m).....	99
5.3.3	Remplissage par du polySi (étapes m - p).....	100
5.4	Vidage et remplissage par du tungstène	102
5.5	Formation des tranchées avec couches de diélectriques	102
CHAPITRE 6 RÉSULTATS, ANALYSES ET DISCUSSIONS.....		106
6.1	Tranchées d'isolement verticales	106
6.1.1	Résultat espéré.....	106
6.1.2	Formes et profondeurs pour deux temps de gravure totaux différents.....	107
6.1.3	Influence des couches de diélectriques	110
6.1.4	Courte conclusion sur les tranchées	114
6.2	TSV avant.....	114
6.2.1	Résultat espéré.....	114
6.2.2	Résultats préliminaires basés sur les tranchées	115
6.2.3	Fond plus plat : augmentation de la puissance RF appliquées au plateau.....	116
6.2.4	Parois plus droites : réduction de pression lors des retrait de polymère	116

6.2.5	Plus profond : augmentation du temps total de gravure.....	116
6.2.6	Qualité des TSV avant.....	118
6.2.7	Gravure des couches de diélectriques pour la formation des TSV avant.....	120
6.2.8	Courte conclusion sur les TSV avant	120
6.3	TSV arrière	121
6.3.1	Résultat espéré.....	121
6.3.2	Uniformité de gravure	122
6.3.3	Caractéristiques structurelles et résine résiduelle.....	123
6.3.4	Courte conclusion sur les TSV arrière	125
6.4	Assemblage des tranchées et des TSV	125
6.4.1	Résultat espéré.....	126
6.4.2	Protection des tranchées lors de la gravure des TSV avant.....	126
6.4.3	Alignement entre les TSV avant et arrière	130
6.4.4	Intersection des TSV avant et arrière	135
6.4.5	Détection de fin d'attaque par fuite d'hélium (He-LEPD).....	136
6.4.6	Courte conclusion sur l'assemblage.....	140
6.5	Comparaison des caractéristiques des TSV à la littérature	142
6.6	Remplissage par du polySi et planarisation	144
6.6.1	Résultat espéré.....	144
6.6.2	Remplissage et planarisation	144
6.6.3	Courte conclusion sur le remplissage par du polySi et la planarisation.....	148
6.7	Effets sur le taux de gravure de résine par photostabilisation avec des UV et à température ambiante après développement	148
6.8	Vidage des TSV remplis par du polySi.....	152
6.9	Choix du tungstène pour la métallisation.....	152

CHAPITRE 7	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	158
7.1	Accomplissements.....	158
7.2	Évolutions possibles.....	161
7.3	Ce que le déroulement en milieu industriel a apporté au projet.....	163
7.4	Ce que le projet apporte à Excelitas	164
BIBLIOGRAPHIE		165
ANNEXES		172

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Causes et conséquences de bruits retrouvés dans un signal de SiPM. Informations tirées de [11]–[13], [25].	16
Tableau 3.1 : Courtes descriptions de caractéristiques de gravure.	36
Tableau 4.1 : Caractéristiques de TSV trouvés dans la littérature dans un contexte de recherche.	75
Tableau 5.1 : Liste d'équipements de photolithographie.	79
Tableau 5.2 : Liste d'équipements de CVD et d'oxydation thermique.	81
Tableau 5.3 : Liste d'équipements de gravure.	81
Tableau 5.4 : Liste d'outils de caractérisation et de leurs usages.	82
Tableau 5.5 : Paramètres des différentes recettes de DRIE.	93
Tableau 5.6 : Paramètres des différentes recettes de dépôt.	94
Tableau 5.7 : Paramètres de RIE pour la planarisation du polySi sacrificiel.	94
Tableau 5.8 : Étapes de formation des structures formées indépendamment.	96
Tableau 5.9 : Paramètres des différentes recettes de RIE pour graver la couche de diélectriques.	103
Tableau 6.1 : Évolution des paramètres de DRIE pour les corrections de forme et de profondeur	117
Tableau 6.2 : Caractéristiques d'un TSV avant formé par 16min30s de DRIE.	119
Tableau 6.3 : Comparaison entre les caractéristiques de TSV trouvés dans la littérature dans un contexte de recherche et celles des TSV formés durant le projet dans les laboratoires d'Excelitas.	143

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Dimensions souhaitées des tranchées et des TSV dans une tranche de silicium.....	8
Figure 1.2 : Organigramme des sous-objectifs du procédé de test.....	9
Figure 2.1 : Schéma électrique de cellules de SiPM.	13
Figure 2.2 : Exemple d'un signal de SiPM (tension mesurée en fonction du temps) dans l'obscurité (avalanches dues aux excitations thermiques). Le graphique de droite est le signal correspondant au nombre d'évènements obtenus (déclenchements de cellules) pour chaque million de photo-électrons (gain = 1 million). Image provenant d'Excelitas, modifiée et utilisée avec la permission de M. Martin Couture.	13
Figure 3.1 : Les 5 étapes principales d'un procédé de CVD régulier. Inspirée de [26, p. 417, 420, 421].....	18
Figure 3.2 : Consommation du silicium lors de son oxydation thermique.	21
Figure 3.3 : 5 étapes principales d'un procédé de photolithographie régulier avec les 3 étapes de cuissons.	23
Figure 3.4 : Résine présentant des perles au bord de la tranche.....	26
Figure 3.5 : Représentation des forces agissant sur la résine déposée par-dessus une structure profonde.	27
Figure 3.6 : 3 types d'exposition en photolithographie. Image provenant d'Excelitas, modifiée et utilisée avec la permission de Mme. Fatou Binetou Koné.....	28
Figure 3.7 : Transfert de motifs.....	35
Figure 3.8 : Exemple d'arrêt de gravure par une couche enterrée de haute sélectivité.....	37
Figure 3.9 : Structures de différents degrés d'anisotropie (de gauche à droite : 0, 1,]0,1[,]0,1[).38	
Figure 3.10 : Plan schématique de la section sur la gravure au plasma.	43
Figure 3.11 : 4 interactions possibles entre un électron et une molécule de gaz.	44

Figure 3.12 : Gravure par radicaux libres a) sans assistance par les ions et b) avec assistance par les ions. De gauche à droite : adsorption, formation d'un produit de gravure volatil, désorption.	47
Figure 3.13 : Interactions <i>ions – surface</i> pour différents intervalles d'énergie des ions.....	49
Figure 3.14 : Schéma simplifié de la configuration CCP d'un réacteur de RIE typique.	51
Figure 3.15 : Abaissement de la moyenne de tension au plateau par génération d'une tension d'autopolarisation durant les premiers cycles RF d'une tension appliquée (configuration CCP).	52
Figure 3.16 : Tension au plateau et tension plasma en fonction du temps dans un régime stable (configuration CCP).	54
Figure 3.17 : Moyenne temporelle de la tension entre les électrodes d'une configuration CCP. Inspirée de [26, p. 168], [46].	55
Figure 3.18 : Schéma simplifié de la configuration CCP+ICP d'un réacteur de DRIE typique.	57
Figure 3.19 : Procédé Bosch a) à 2 phases et b) à 3 phases.	59
Figure 4.1 : Défauts structuraux formés par DRIE avec un masque de résine dans le cas d'un TSV en cours de formation. L'image de droite est prise au SEM (microscope électronique à balayage) durant le projet et sert de comparaison au schéma de gauche.	69
Figure 4.2 : Sous bombardement ionique, formation de striations par élargissement d'une ouverture dans un masque de résine dû à la présence de facettes inclinées. Inspirée de [55], [58].	71
Figure 4.3 : Déviation d'ions a) par effet de charge, b) par collisions dans la gaine (distribution angulaire d'incidence) et c) par réflexion sur une facette inclinée de résine.	73
Figure 5.1 : Réticules de « stepper » pour a) les tranchées, b) les TSV avant et c) les TSV arrière. À gauche, une vue d'ensemble et à droite, une vue agrandie de la partie encadrée.	80
Figure 5.2 : Les 5 stations du rail de dépôt.	83
Figure 5.3 : Les 7 stations du rail de développement.	85
Figure 5.4 : Flux d'hélium envoyé sous une tranche dans le réacteur de DRIE du projet.	88

Figure 5.5 : Organigramme des sous-objectifs du procédé de test.....	91
Figure 5.6 : Les 22 étapes de microfabrication du procédé de test.	92
Figure 5.7 : Étapes de microfabrication du procédé de test ayant pour but de tester la formation des tranchées et des TSV.....	95
Figure 5.8 : Étapes de microfabrication du procédé de test ayant pour but de décontaminer et tester l'oxydation des tranches.	99
Figure 5.9 : Étapes de microfabrication du procédé de test ayant pour but de tester le remplissage des TSV par du polysilicium sacrificiel et leur vidage.	101
Figure 5.10 : Étapes de microfabrication du procédé de test ayant pour but de tester la formation des tranchées avec la présence de couches de diélectriques.	104
Figure 6.1 : Tranchées espérées, vue de profil (gauche) et vue de surface (droite).	106
Figure 6.2 : Tranchées obtenues pour des temps de DRIE de a) 2min14s (sans couches de diélectriques) et b) 2min37s (avec couches de diélectriques).	107
Figure 6.3 : Coupe longitudinale de tranchées en présence de couches de diélectriques après 2min37s de DRIE.	108
Figure 6.4 : Vue de surface des tranchées après leur formation et un décapage de la résine.	109
Figure 6.5 : Tranchées en présence de couches de diélectriques pour les cas de formations a) réussies et b) échouées à deux endroits différents.	110
Figure 6.6 : Vue de surface (résine présente) au microscope optique (gauche) et au SEM (droite) des tranchées après DRIE en présence de couches de diélectriques pour les cas où les tranchées a) sont bien formées et b) sont mal formées.	111
Figure 6.7 : Motifs de tests de résolution dans la résine a) après les deux RIE des couches de diélectriques (avant DRIE) et b) après DRIE pour la formation des tranchées sur une tranche qui présentait des problèmes de formation des tranchées.	112
Figure 6.8 : Vue de surface des tranchées après RIE (avant DRIE) en présence de couches de diélectriques de tranchées mal formées a) dans l'ensemble, b) à des terminaisons et c) à un point de croisement.	113

Figure 6.9 : TSV avant espérées, vue de profil (gauche) et vue de surface (droite).	115
Figure 6.10 : TSV avant formés suite à différents procédés de DRIE pour a,b,c) une correction de forme et d,e) une correction de profondeur.	117
Figure 6.11 : TSV avant formé par 16min30s de DRIE.	119
Figure 6.12 : 3 parties d'un TSV avant formé par 16min30s de DRIE.	119
Figure 6.13 : TSV arrière espérées, vue de profil (gauche) et vue de surface (droite).	121
Figure 6.14 : TSV arrière formées par 1 h de DRIE (gauche) et profondeurs mesurées en microns au microscope optique à 4 endroits sur la tranche.	122
Figure 6.15 : Ouvertures des TSV arrière (qui ont rejoint les TSV avant) après DRIE.	124
Figure 6.16 : Vue de profil du résultat d'assemblage espéré.	126
Figure 6.17 : Formation des cavités latérales par mauvaise protection aux coins des tranchées.	127
Figure 6.18 : Images prises au SEM (haut et bas) et au microscope optique (milieu) des tranchées après formation des TSV avant pour les procédés de dépôt de base (gauche) et amélioré (droite).	128
Figure 6.19 : Dimensions au point de croisement entre des tranchées (vue de surface).	129
Figure 6.20 : Désalignement entre les TSV avant et les TSV arrière pour une exposition aux UV alignée au « stepper ».	131
Figure 6.21 : Vues de surface avant (a,c) et arrière (b,d) de différents désalignement entre les TSV avant et les TSV arrière sur une même tranche.	132
Figure 6.22 : Deux images aplaties placées l'une par-dessus l'autre, avec les tranchées vis-à-vis, à deux endroits différents sur une tranche.	132
Figure 6.23 : Vue de surface arrière de l'ouverture des TSV arrière pour deux différents focus, démontrant l'alignement réussi à l'aligneur par contact entre les TSV avant et les TSV arrière.	133
Figure 6.24 : Vue de profil de l'alignement réussi à l'aligneur par contact entre les TSV avant et les TSV arrière à deux endroits sur la tranche : a) au centre et b) au bord.	134
Figure 6.25 : Intersection entre les TSV avant et les TSV arrière.	135

Figure 6.26 : Schéma de la déformation à l'intersection des TSV avant et arrière.....	135
Figure 6.27 : Courbes de débit d'hélium entrant enregistrées lors de la DRIE du premier test d'assemblage. a) vue d'ensemble et b) partie d'intérêt agrandie de la courbe associée au centre de la tranche.....	137
Figure 6.28 : Face arrière d'une tranche après formation des TSV arrière lors du premier test d'assemblage.	138
Figure 6.29 : Courbes de débit d'hélium entrant enregistrées lors de la DRIE du premier test d'assemblage. a) Vue d'ensemble, b) partie d'intérêt agrandie de la courbe associée au bord de la tranche et c) partie d'intérêt agrandie de la courbes associée au centre de la tranche.	139
Figure 6.30 : Structures obtenues, schématisées à l'échelle (gauche) et prises au SEM (droite).	141
Figure 6.31 : Résultats espérés suite au dépôt de 2 μm de polySi par LPCVD (gauche) et suite à la planarisation par deux RIE (droite).	144
Figure 6.32 : Structures avant planarisation (gauche) et après planarisation (droite) par RIE. ...	145
Figure 6.33 : Structures obtenues, prises au SEM, avec polySi aplani (2 images collées).	148
Figure 6.34 : Épaisseurs des résines A et B en fonction du temps pour le cas sans photostabilisation (« sans UV ») et avec photostabilisation (« avec UV »).	150
Figure 6.35 : Modélisations en structures simples a) des lignes d'Al présentement à la surface des SiPM et b) du métal dans des TSV de dimensions souhaitées et c) de dimensions obtenues.	153
Figure 6.36 : Conversion du modèle d'un prisme à base carré en un cylindre pour simplifier le calcul de résistance électrique, menant à une valeur surestimée.....	155
Figure A.1 : Silicium dopé-P par du bore (gauche) et silicium dopé-N par de l'arsenic (droite). Inspirée de [83].	173
Figure A.2 : Formation d'une zone de déplétion autour d'une jonction PN par recombinaisons des porteurs de charge majoritaires : a) sans contact (inexistence de la jonction PN), b) recombinaison par diffusion des porteurs de charge majoritaires suite au contact et c) à l'équilibre, c'est-à-dire l'état pour lequel le champ électrique généré par les ions est assez intense pour prévenir toute autre de ces recombinaisons.	175

Figure A.3 : a) Rétrécissement par polarisation directe et b) élargissement par polarisation inverse de la zone de déplétion d'une photodiode PN et c) absorption d'un photon menant à une paire électron-trou séparés par le champ électrique local.	176
Figure A.4 : Circuit électrique équivalent d'une GM-APD branchée en série à une résistance d'étouffement (configuration de type passif). Inspirée de [11].	179
Figure A.5 : États d'une GM-APD soumise à une irradiation lumineuse. Inspirée de [87].	180
Figure C.1 : Moyenne temporelle de la tension entre des électrodes pour deux rapports de surface différents.	184

LISTE DES ABRÉVIATIONS, ACRONYMES ET VARIABLES

Abréviations

TSV arrière	Partie du TSV formée sur la face arrière d'une tranche
TSV avant	Partie du TSV formée sur la face avant d'une tranche
polySi	Polysilicium
tr/min	Tours par minute

Acronymes

3D	Trois dimensions
3D SiP	« System-In-Package » avec intégration 3D
APD	Photodiode avalanche (« Avalanche Photodiode »)
AR	Facteur de forme (« Aspect Ratio »)
ARDE	Gravure dépendante du facteur de forme (« Aspect Ratio Dependant Etching »)
BOE	Solution de gravure d'oxyde tamponnée (« Buffered Oxide Etching »)
CCP	Plasma à couplage capacitif (« Capacitively Coupled Plasma »)
CVD	Dépôt chimique en phase vapeur (« Chemical Vapor Deposition »)
DNQ	Diazonaphthoquinone
Dopé(e)-N	Dopé(e) d'impuretés de donneurs
Dopé(e)-P	Dopé(e) d'impuretés d'accepteurs
DRIE	Gravure ionique réactive profonde (« Deep Reactive Ion Etching »)
DUV	Ultraviolet profond (« Deep Ultraviolet »)
EBR	Décapage de perle au bord (« Edge Bead Removal »)
GM-APD	Photodiode avalanche opérée en mode Geiger (« Geiger-Mode Avalanche Photodiode »)

HB	Cuisson forte (« Hardbake »)
He-LEPD	Détection de fin d'attaque par fuite d'hélium (« Helium Leak End Point Detection »)
HMDS	Hexamethyldisilazane
ICP	Plasma à couplage inductif (« Inductively Coupled Plasma »)
LPCVD	Dépôt chimique en phase vapeur à basse pression (« Low-pressure Chemical Vapor Deposition »)
PDE	Efficacité de détection de photons (« Photon Detection Efficiency »)
PEB	Cuisson post-exposition (« Post-Exposure Bake »)
PECVD	Dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma (« Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition »)
PET	Tomographie par émission de positrons (« Positron Emission Tomography »)
PIN	Milieux dopé-P, intrinsèque et dopé-N
PMT	Tube photomultiplicateur (« Photomultiplier Tube »)
PN	Milieux dopé-P et dopé-N
RIE	Gravure ionique réactive (« Reactive Ion Etching »)
SB	Cuisson douce (« Softbake »)
SEM	Microscope électronique à balayage (« Scanning Electron Microscope »)
SiP	« System-In-Package »
SiPM	Photomultiplicateur de silicium (« Silicon Photomultiplier »)
TSV	Trou d'interconnexion à travers le silicium (« Through-Silicon Via »)
UV	Ultraviolet

Variables

a	Rayon des TSV avant [m]
b	Rayon du modèle cylindrique pour le calcul de résistance électrique [m]
U	Uniformité de gravure
Z	Épaisseur finale de résine [m]
A	Aire de la surface perpendiculaire à la direction du courant électrique [m^2]
AR	Facteur de forme
C	Concentration de polymère dans une photorésine en $g/100 mL$
E	Intensité d'un champ électrique [V/m]
F	Facteur de remplissage
P	Pression d'hélium au bord de la tranche [Pa]
P'	Pression d'hélium au centre de la tranche [Pa]
PDE	Efficacité de détection de photons
R	Résolution [m]
R	Probabilité de réflexion du photon à la surface
S	Sélectivité
T	Température [K]
e	Épaisseur de matière [m]
h	Épaisseur de métal à l'intersection entre les TSV avant et les TSV arrière [m]
p	Profondeur d'une structure gravée [m]
s	Distance entre le masque de photolithographie et la surface de la résine [m]
t	Temps [s]
z	Épaisseur de matière ou du masque [m]
ΔV	Surtension d'opération [V]
Φ	Ouverture d'une structure gravée [m]
α	Degré d'ionisation
γ	Fraction de photons absorbés dans la zone de déplétion
η	Viscosité intrinsèque d'une photorésine [$Pa \cdot s$]
λ	Longueur d'onde [m]

ξ	Fraction de paires électron-trou sans recombinaison et qui participent donc au photocourant
ρ	Résistivité électrique [Ω]
ω	Vitesse de rotation [rad/s]
$\langle v_{e,i} \rangle$	Énergie cinétique moyenne des électrons (e) ou des ions (i) [eV]
C_{int}	Capacité interne [F]
$E_{i,\{anode,cathode\}}$	Énergie des ions arrivant à l'anode ou la cathode [eV]
E_i	Énergie des ions [eV]
E_r	Écart relatif
$M_{(g),(s)}$	Molécule M à l'état gazeux (g) ou solide (s)
P_{plasma}	Pression du plasma [Pa]
P_{trig}	Probabilité qu'un porteur de charge déclenche une avalanche
Q_E	Efficacité quantique
R_{Al}	Résistance électrique équivalente à une ligne d'aluminium utilisée présentement dans les SiPM [Ω]
R_{Bosch}	Rapport de temps dans un procédé Bosch
R_{TSV}	Résistance électrique équivalente d'une ligne de conduction électrique dans un TSV [Ω]
R_{TSV}^{obtenu}	Résistance électrique équivalente d'une ligne de conduction électrique dans un TSV de dimensions obtenues [Ω]
$R_{TSV}^{souhait}$	Résistance électrique équivalente d'une ligne de conduction électrique dans un TSV de dimensions souhaitées initialement [Ω]
$S_{anode,cathode}$	Aire de surface de l'anode ou de la cathode [m^2]
$T_{e,i}$	Température des électrons (e) ou des ions (i) [K]
V_{appl}	Tension appliquée (ou d'opération) [V]
V_{auto}	Tension d'autopolarisation [V]
V_{plasma}	tension plasma [V]
$V_{plateau}$	Tension au plateau dans une configuration CCP de gravure au plasma [V]
V_{seuil}	Tension de claquage [V]
d_{aniso}°	Degré d'anisotropie
$d_{anode,cathode}$	Épaisseur de la gaine du plasma au-dessus de l'anode ou de la cathode [m]

f_{fuite}	Débit de fuite d'hélium [<i>sccm</i>]
f_{in}	Débit d'hélium entrant au centre de la tranche [<i>sccm</i>]
f'_{in}	Débit d'hélium entrant au bord de la tranche [<i>sccm</i>]
k_B	constante de Boltzmann ($k_B = 8,617 \times 10^{-5} \text{ eV} \cdot \text{K}^{-1}$)
$m_{e,i}$	Masse des électrons (e; $m_e = 9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}$) ou des ions (i) [<i>kg</i>]
$n_{i,e,r}$	Densités d'ions (i), d'électrons (e) ou de radicaux libres (r) [m^{-3}]
$p_{TSV, tranchées}$	Profondeur des TSV ou des tranchées [<i>m</i>]
$t_{TSV, tranchées}$	Temps de formation des TSV ou des tranchées [<i>s</i>]
t_g	Temps de l'étape de gravure dans un procédé Bosch [<i>s</i>]
t_p	Temps de l'étape de passivation dans un procédé Bosch [<i>s</i>]
v_g	Taux de gravure d'un matériau [<i>m/s</i>]
v_m	Taux de gravure de l'environnement d'un matériau (masque) [<i>m/s</i>]
$v_{x,y}$	Taux de gravure horizontal (x) ou vertical (y) [<i>m/s</i>]

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A – PHOTODIODES.....	172
ANNEXE B – CARACTÉRISTIQUES D’UN PLASMA	181
ANNEXE C – INFLUENCE DU RAPPORT DES AIRES DE SURFACE DES ÉLECTRODES SUR L’ÉNERGIE DES IONS DANS UNE CONFIGURATION CCP DE GRAVURE AU PLASMA.....	183
ANNEXE D – CALCUL DU DIAMÈTRE SOUHAITÉ DES TSV AVANT POUR LE REPLISSAGE PAR DU MÉTAL	185
ANNEXE E – RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE DANS UNE STRUCTURE SIMPLE	186

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 De la jonction PN au photomultiplicateur de silicium amélioré par intégration 3D (trois dimensions)

Les détecteurs de lumière ont subi nombre d'évolutions au fil des ans. De la simple photodiode PN au très élaboré SiPM (photomultiplicateur de silicium), chacune d'elles marque un saut de performances ouvrant les portes à de nouvelles applications [1]. Les SiPM sont des dispositifs récents du 21^e siècle [2], maintenant en production à l'échelle industrielle, permettant de compter les photons grâce à la génération d'une impulsion électrique comportant des millions d'électrons pour chaque photon incident. La technologie des SiPM couvre aujourd'hui des champs d'applications telles que l'imagerie biomédicale, la reconnaissance et la mesure de distance par laser, la sécurité, la biophotonique et la physique des particules [3]. La microfabrication s'est plongée récemment dans l'ère de l'intégration 3D (trois dimensions) signifiant l'exploitation de la troisième dimension des puces pour améliorer leurs performances, les rendre moins coûteuses, les miniaturiser et diversifier leurs fonctionnalités [4]–[8]. Les SiPM n'échappent pas à l'intégration 3D. De par leur fonctionnement basé sur un circuit optoélectronique, l'introduction de TSV (trous d'interconnexion à travers le silicium; une application de l'intégration 3D) permet de séparer la partie photosensible des SiPM de leur partie insensible [4]. Même sans TSV, les SiPM rivalisent déjà avec les PMT (tubes photomultiplicateurs) qui étaient jusqu'alors la meilleure approche pour compter les photons [2]. L'introduction des TSV rendrait les SiPM comme étant les dispositifs reproductibles à l'échelle industrielle les plus sophistiqués au monde en termes de comptage de photons.

1.2 Photomultiplicateurs de silicium (SiPM)

Dans les années 1960, la recherche sur le comptage de photons à l'aide d'une APD opéré à haute tension était très active à la fois au plan expérimental et théorique [9]. Il a toutefois fallu attendre les années 1990 pour que les premières GM-APD (photodiodes avalanche opérées en mode Geiger, Annexe A) soient développées pour permettre un gain et un signal sur bruit suffisants pour permettre la détection d'un photon unique [10]. Une GM-APD correspond à une APD (photodiode avalanche) branchée à un circuit « d'étouffement » (traduction libre de

« quenching ») permettant à l'APD d'être opérée à une tension plus élevée que sa tension de seuil pour ainsi déclencher une impulsion courte comportant des millions d'électrons pour un seul photon incident [11]. Pour cette raison, les GM-APD sont parfois appelées SPAD (« diode avalanche à photon unique », traduction libre de « Single-Photon Avalanche Diode »). La configuration matricielle de plusieurs de ces GM-APD branchées en parallèle constitue ce qu'on appelle le photomultiplicateur de silicium (ou SiPM, pour l'anglais « Silicon Photomultiplier »). Pour le comptage de photons, les SiPM remplacent les lourds, coûteux et délicats tubes photomultiplicateurs commercialisés depuis 1936 et possèdent des performances améliorées [9].

Les SiPM offrent des applications pratiques nombreuses et importantes. Voici une liste non exhaustive de ces applications.

- PET (tomographie par émission de positrons) [2], [3], [12], [13]
- Cytométrie en flux [13]–[15]
- Physique des particules [3], [13], [16]
- Détecteur de radiations [3], [13], [17]
- Instrumentation analytique (exemple : mesure de distance par lidar) [3], [13]
- Toute autre application de comptage de photons même à faible luminosité [3], [13]

Par exemple, une technique en imagerie biomédicale, la PET, utilise des détecteurs de photons pour prendre des images en trois dimensions d'une activité métabolique d'un organe. Grâce à une amélioration des SiPM découlant de ce projet, ces derniers permettraient à la PET d'obtenir des images mieux résolues et donc de détecter des maladies à des stades plus précoces. [2]

1.3 Trous d'interconnexion à travers le silicium (TSV) et avantages

Les TSV ont été inventés vers la fin des années 1950 par William Shockley, co-inventeur de la plus grande invention de l'histoire de la microélectronique : le transistor [7]. Un TSV est une structure étroite gravée de bord en bord d'une tranche de silicium en vue de faire passer un matériau conducteur de l'avant vers l'arrière d'une puce ou d'un dispositif. Les TSV sont une technologie au cœur de l'intégration 3D [7] : ils permettent non seulement d'améliorer les performances et de miniaturiser les puces, mais aussi de connecter ensemble plusieurs puces sans

ajouter de micro-fils [4]–[7]. De plus, la connexion entre la face avant des tranches et leur face arrière permet aux puces d’avoir une surface pratiquement deux fois plus grande pour l’occupation des structures et circuits, sans compter l’espace occupé en moins par les connexions métalliques qui passent maintenant dans les TSV eux-mêmes. Toutefois, même si les TSV peuvent être vus grossièrement comme de simples trous dans le silicium, leurs étapes de formation comportent de nombreux défis (section 4.1).

La technologie des TSV est utilisée aujourd’hui comme une solution aux enjeux « More Moore » et « More than Moore » considérant respectivement les défis associés aux performances et à la diversification de fonctionnalités d’un produit [4]–[7].

1.3.1 Avantages : « More Moore »

L’enjeu « More Moore » est associé au dépassement constant des barrières physiques liées à la miniaturisation et aux performances d’un dispositif [4], [18]. Grâce à l’introduction de TSV, certains composants d’un microsystème, comme des lignes de conduction électrique, peuvent occuper une surface moins importante en passant par le silicium qui supporte les structures et circuits. De plus, les dispositifs sont plus légers étant donné la diminution de masse de silicium nécessaire pour le système [6]. Des TSV de faible profondeur peuvent aussi améliorer les délais de réponse d’un signal en remplaçant les longues lignes métalliques de conduction électriques par des plus courtes qui passent à travers le silicium [6].

1.3.2 Avantages : « More than Moore »

L’enjeu « More than Moore » est associé à la diversité de fonctionnalités d’un dispositif [4], [18]. Depuis plusieurs années, la configuration SiP (« System-In-Package ») a permis aux industries de développer des dispositifs plus diversifiés grâce au soudage par micro-fils (traduction libre de « wire bonding ») et plus récemment, par puce retournée (traduction libre de « flip chip ») [8]. Cette configuration atteint aujourd’hui un stade plus avancé grâce à l’intégration 3D : « 3D SiP » [5]. Les TSV métallisés permettent de raccorder plusieurs puces entre elles à un moindre coût et en minimisant la consommation d’énergie du dispositif [6]. Relativement au soudage par fils, les TSV offrent de meilleures performances et la densité surfacique de puces est augmentée [5], [6]. Aussi, le soudage par puce retournée empêche d’avoir des structures et des circuits sur les deux faces des puces [6], alors qu’avec les TSV, il n’y a simplement plus de distinction entre les faces

avant et arrière des puces [7]. Les TSV dans une configuration « 3D SiP » permettent donc de raccorder ensemble des puces de différentes fonctionnalités de façon plus efficace, ce qui permet de fabriquer des dispositifs munis d'un plus grand éventail de fonctionnalités [6].

1.4 Tranchées d'isolement

Dans le cadre du projet, les tranchées d'isolement sont des structures de faible profondeur gravées dans du silicium qui entourent et isolent les cellules de SiPM. Elles sont recouvertes d'une couche isolante afin de réduire l'intensité du phénomène de diaphonie (section 4.2) qui nuit aux performances du dispositif à optimiser. [19], [20]

1.5 Contexte du projet

Excelitas, compagnie investissant dans la production, la recherche et le développement de produits optoélectroniques, est une des quelques compagnies dans le monde à construire des SiPM [21]. Les SiPM sont des matrices de plusieurs APD opérées en mode Geiger permettant la détection de la lumière et le comptage de photons. Toutefois, le signal électrique généré par l'absorption de photons doit passer par des lignes de métal qui limitent le facteur de remplissage du dispositif (proportion de surface sensible aux photons). Pour remédier à ce problème, Excelitas projette d'entreprendre pour la première fois l'intégration 3D. Plus précisément, c'est grâce à l'introduction de TSV et de tranchées d'isolement verticales que l'entreprise ambitionne de devenir productrice des SiPM les plus performants au monde. En effet, les TSV permettraient aux connections métalliques d'occuper moins d'espace sur la surface du dispositif et donc d'augmenter substantiellement le facteur de remplissage.

Bien que dans le cadre du projet, les TSV sont développés spécifiquement en vue d'augmenter le facteur de remplissage des SiPM, une telle technologie pourrait aussi s'étendre vers d'autres produits d'Excelitas. Les SiPM ne servent ici que de véhicules d'amorçage au projet. C'est pourquoi la priorité est mise sur le développement du procédé de microfabrication qui pourrait s'appliquer pour d'autres produits, plutôt que sur l'amélioration des performances des SiPM. Par contre, l'intégration 3D est un domaine complètement nouveau pour Excelitas et les particularités du design des SiPM impliquent un développement de procédé jamais encore réalisé. Il ne va donc pas sans dire que cette intégration entraîne avec elle des défis technologiques importants.

Dans l'ordre, ce mémoire expose d'abord brièvement le fonctionnement des photomultiplicateurs de silicium (Chapitre 2). Ensuite, les procédés les plus importants du projet sont décrits (Chapitre 3). La gravure est la section la plus détaillée étant donné la complexité paramétrique à cet égard pour la formation des tranchées et surtout des TSV. Les descriptions des TSV et de la diaphonie atténuée par l'introduction de tranchées d'isolement sont par la suite présentées. La méthodologie (Chapitre 5) décrit de façon détaillée les étapes du procédé de microfabrication qui ont mené aux meilleurs résultats. Ces résultats sont exposés au Chapitre 6 avec quelques résultats préliminaires, des analyses et des discussions.

1.6 But et contraintes du projet

L'objectif principal du projet est de développer une technique de formation de TSV reproductibles. Ceci permettrait aux SiPM d'Excelitas d'avoir un facteur de remplissage plus élevé, tout en réduisant au minimum les effets parasites de diaphonie grâce à des tranchées d'isolement verticales. L'optimisation proposée dans le projet permettra théoriquement d'atteindre un facteur de remplissage dépassant celui des SiPM produits par les concurrents. Excelitas ambitionne d'être dans le futur, le producteur des meilleurs SiPM au monde.

Les étapes du procédé réalisé doivent être compatibles avec les procédés de fabrication des SiPM. Les TSV formés, une fois remplis, doivent avoir une résistance électrique équivalente ou plus faible à celle des lignes d'aluminium utilisées actuellement. L'objectif est atteint suite à la conception d'un procédé de microfabrication dont la faisabilité est prouvée en laboratoire, et qui permet :

- La formation de TSV de haut facteur de forme (ouvertures circulaires de $2,2\ \mu\text{m}$ de diamètre sur la surface photosensible des dispositifs et gravés de bord en bord de tranches de $375\ \mu\text{m}$ d'épaisseur);
- La formation de tranchées d'isolement verticales ($2\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$) qui réduisent l'intensité de diaphonie;
- Le remplissage des TSV par du polysilicium;
- Le retrait du polysilicium déposé dans les TSV (vidage);

- Le remplissage des TSV par un matériau dont la résistance électrique résultante est équivalente ou inférieure à celle des lignes d'aluminium utilisées actuellement;
- L'intégration de cette technologie doit permettre d'augmenter le facteur de remplissage des SiPM (aucun chiffre exact n'est donné).

Pour être compatibles avec les procédés de fabrication des SiPM, les étapes du procédé réalisé doivent tenir compte des spécifications suivantes :

- Les 15 premiers microns de silicium à la surface des tranches doivent être le moins possible touchés par les étapes de gravure;
- Les tranches ne peuvent pas être amincies;
- Le spectre de longueurs d'onde d'opération des SiPM d'Excelitas est : $[400, 1100] \text{ nm}$;
- Aucun métal ne doit être déposé avant l'étape de dopage des tranches pour la formation des photodiodes avalanche (APD, Annexe A);
- La formation des tranchées et des TSV ne doit pas compromettre aux dépôts de couches subséquentes ou à toute autre étape du procédé de SiPM.

Plusieurs autres contraintes (et défis) sont reliées à l'utilisation d'un laboratoire de production. Par exemple, dans la mesure du possible, les étapes du procédé doivent être testées avec les équipements de production de l'entreprise et ce, en minimisant toute contamination. Par conséquent, la formation des tranchées et des TSV doit être effectuée avec les réacteurs de DRIE (gravure ionique réactive profonde; section 3.5.5) utilisés en production d'Excelitas. La section 1.8 énumère quelques autres contraintes et difficultés reliées à la recherche dans un laboratoire de production.

1.7 Approche envisagée

Étant donné que le but repose principalement sur le développement d'une technique de formation de TSV, le projet s'inscrit plus dans une optique de fabrication des TSV que sur l'optimisation des SiPM eux-mêmes. Avant même que le projet ne soit amorcé, l'équipe de recherche et de développement d'Excelitas s'était déjà penché sur les questions reliées au design des TSV dans les SiPM.

En 2014, l'équipe s'est d'abord inspirée d'un des principaux compétiteurs dans le marché des photodétecteurs. Ces derniers utilisaient alors une méthode de gravure anisotrope pour former des TSV en forme de « V », donc très larges d'un côté des tranches et minces de l'autre. Par contre, pour des tranches de 375 μm d'épaisseur, la partie large des TSV obtenus par cette méthode devient tellement importante (plusieurs centaines de microns) qu'il est impossible de former un seul TSV par cellule de SiPM, puisque dans ce cas, les TSV se rejoindraient latéralement. Cette méthode ne permet donc que de former un seul TSV par matrice de cellules de SiPM. Elle ne constituerait ainsi qu'une solution à court terme, car ultimement, Excelitas voudrait faire passer un TSV par cellule unique de SiPM, ce qui limite l'ouverture des TSV à quelques dizaines de microns seulement.

L'équipe de recherche et de développement savait alors que des TSV en forme de « V », tel que formés par un des principaux compétiteurs, ne seraient pas convenables à long terme et qu'un procédé de gravure anisotrope vertical s'imposait. Il fallait trouver un moyen pour former des TSV droits avec une ouverture assez mince à la surface photosensible des SiPM pour ne pas trop affecter le facteur de remplissage. Comme une tranche de 375 μm d'épaisseur avec un TSV de 2,2 μm démontre un facteur de forme très grand, l'équipe de recherche et de développement est arrivée à la conclusion que la formation de TSV avec une ouverture petite sur la face avant et une grosse sur la face arrière pourraient être une solution viable (voir Figure 1.1). Cette approche a aussi l'avantage, selon les membres de l'équipe, qu'une grosse ouverture au dos diminuerait de façon importante la résistance totale des lignes métalliques qui passeraient dans les TSV. Le projet a alors transité vers l'équipe de support aux procédés qui se devait de trouver un moyen de concrétiser de façon reproductible un tel design dans les laboratoires de production d'Excelitas.

Pour développer la technique de fabrication, un procédé de test a été conçu. Celui-ci inclut les étapes de microfabrication concernant le développement des tranchées et des TSV, le remplissage de ces derniers par du polysilicium suivi d'un vidage et de leur remplissage par du tungstène, mais exclut toute autre étape du procédé de microfabrication des SiPM. Ceci en vue de sauver du temps en salle blanche et surtout, pour diminuer les coûts liés à l'utilisation et à l'occupation des équipements de production. Durant le projet, ce procédé de test a dû être modifié plusieurs fois pour parvenir à la formation des structures souhaitées.

Selon les objectifs établis à la section 1.6, les TSV doivent avoir une ouverture circulaire de $2,2\ \mu\text{m}$ de diamètre et avoir une profondeur de $375\ \mu\text{m}$. Or, la formation de TSV de dimensions $2,2\ \mu\text{m} \times 375\ \mu\text{m}$ va bien au-delà des moyens actuels de l'industrie : l'élaboration d'un procédé de formation de TSV $3\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ [22], [23] ou $30\ \mu\text{m} \times 142,6\ \mu\text{m}$ [24] est déjà considéré être un défi. Ainsi, pour atteindre l'objectif tout en tenant compte des 15 premiers microns qui doivent être le moins possible touchés par la gravure, le design envisagé des TSV est celui présenté à la Figure 1.1.

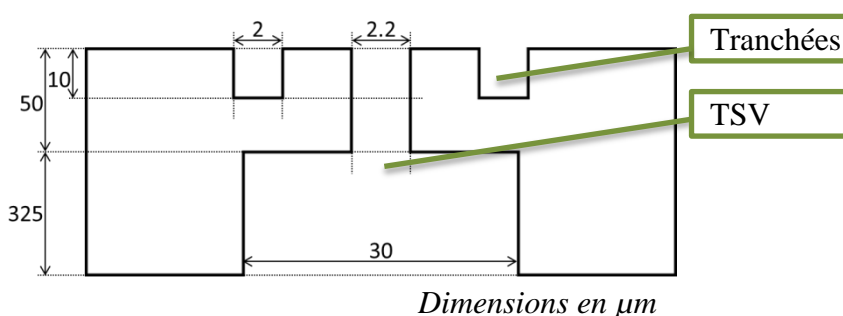


Figure 1.1 : Dimensions souhaitées des tranchées et des TSV dans une tranche de silicium.

Les TSV souhaités sont donc constitués d'une partie cylindrique de dimensions $2,2\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ et d'une partie prismatique à base carrée de dimensions $30\ \mu\text{m} \times 325\ \mu\text{m}$ (pourrait être cylindrique elle aussi). Pour simplifier le vocabulaire, nous utilisons le terme « TSV avant » pour désigner la partie cylindrique (face avant des tranches; photosensible) et le terme « TSV arrière » pour désigner la partie prismatique (face arrière; électronique). Les dimensions des TSV réalisés peuvent différer de celles présentées à la Figure 1.1, mais la profondeur des TSV avant doit être supérieure à $15\ \mu\text{m}$. Une profondeur de $50\ \mu\text{m}$ est posée comme première cible simplement pour prendre en compte la reproductibilité imparfaite des procédés de microfabrication et la non-uniformité de gravure lors de la formation des TSV arrière.

Les sous-objectifs du procédé de test sont placés en ordre de réalisation dans l'organigramme de la Figure 1.2. La partie en orange (étapes de formation des tranchées et des TSV) mène au résultat (espéré) de la Figure 1.1.

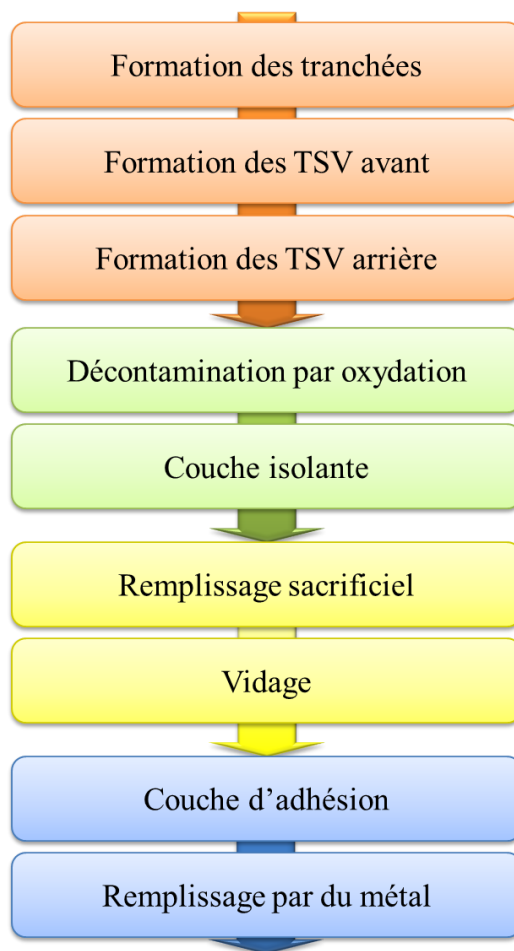


Figure 1.2 : Organigramme des sous-objectifs du procédé de test.

Les étapes pour atteindre ces sous-objectifs sont présentées à la méthodologie (Chapitre 5).

1.8 Recherche et développement dans un laboratoire de production

Un laboratoire de production ne suit pas les mêmes règles et les mêmes priorités qu'un laboratoire de recherche. Travailler au sein d'une entreprise sur l'élaboration d'un procédé de microfabrication dans un laboratoire de production relève des défis considérables au point de vue de gestion de temps, d'argent et de manipulations expérimentales à cause notamment des priorités d'occupation des machines et des règles strictes en salle blanche. Négliger le temps d'attente pour l'utilisation d'une machine est une erreur facilement commise, surtout pour une personne qui manque d'expérience en entreprise.

Voici une liste détaillée de quelques défis à relever dans un laboratoire de production pour le développement d'un procédé de microfabrication.

1. Production

Travailler avec des machines de production est le défi #1 en entreprise, car la production est la priorité #1 de l'entreprise. Même si la R&D est importante pour la croissance technologique de l'entreprise, le développement de nouveaux produits et la conservation d'une place dans le marché, il ne reste pas moins qu'elle est financée grâce à la production. Faufilet des lots de tests expérimentaux entre des lots de production peut s'avérer difficile. De plus, si une machine n'est pas utilisée pour la production avant longtemps, alors elle devient moins prioritaire pour l'équipe de maintenance et on croise donc les doigts pour ne pas qu'elle tombe en panne.

Évènement en lien au projet : « Pendant quelques mois, Excelitas est entrée en mode "crise" pour un certain type de produits. Même les scientifiques de procédé devaient contribuer à la production. L'unique étudiant à la maîtrise de l'entreprise (l'auteur de ce mémoire) devait contribuer via l'optimisation de son temps d'utilisation des machines pour son projet, ce qui a ralenti ce dernier. »

2. Contamination

Les tranches de production ne comportent évidemment pas toutes les mêmes matériaux. Par exemple, lorsqu'une tranche contenant de l'aluminium entre dans une machine, les autres tranches qui y entrent sont aussitôt considérées comme contaminées à l'aluminium. De plus, une tranche qui sort de la salle blanche ne pourra plus être traitée dans une machine de production.

Évènement en lien au projet : « Des tranches gravées par DRIE (section 3.5.5) devaient simplement être oxydées avant de poursuivre le procédé. Ces tranches, qui sont passées dans le réacteur de DRIE, étaient considérées comme contaminées au métal. Or, les tubes d'oxydation ne peuvent pas traiter des tranches contaminées. Une solution n'a pu être trouvée qu'après environ 2 mois, ce qui a ralenti le projet. »

3. Existence des machines

Le procédé doit être développé avec les machines de l'entreprise pour pouvoir éventuellement le qualifier en production sans devoir acheter d'autres machines. Acheter d'autres machines implique des dépenses, du temps de déménagement, de maintenance et de formation, de la place dans la salle blanche, etc. Dans le milieu de la recherche ailleurs qu'en industrie, les tranches peuvent être envoyées et traitées à l'extérieur du laboratoire.

4. Configuration des machines

Certaines machines peuvent être configurées différemment en fonction de la demande de production. Par exemple, les réacteurs DRIE peuvent être configurés « 100 mm » ou « 150 mm » et un très long temps de main-d'œuvre s'impose lorsqu'il est temps de changer la configuration.

Évènement en lien au projet : « Excelitas a dû prématurément convertir sa production de tranches 100 mm en tranches 150 mm. Le projet a donc commencé avec des tranches 100 mm pour finir avec des machines presque toujours configurées 150 mm, ce qui a ralenti le projet. »

5. Inspection

Les procédés de microfabrication des dispositifs sur les lignes de production d'une entreprise doivent être reproductibles. Une fois que ceci est démontré, la métrologie se charge du maintien de la qualité. Toutefois, pour le diagnostic de problèmes ou pour l'inspection de résultats de tests en R&D, des inspections rigoureuses s'imposent, parfois même à l'aide d'outils (coûteux et volumineux) qui ne se trouvent généralement pas dans un laboratoire de production.

Évènement en lien au projet : « Excelitas ne possède pas de SEM (microscope électronique à balayage). L'école Polytechnique de Montréal, oui, et est située à 40 km d'Excelitas. Une distance de 40 km est suffisante pour avoir ralenti le projet. »

CHAPITRE 2 CARACTÉRISTIQUES D'UN PHOTOMULTIPLICATEUR DE SILICIUM

La compréhension du fonctionnement des SiPM (photomultiplicateurs de silicium) commence avec une connaissance de base des photodiodes et du phénomène d'étouffement au sein d'une GM-APD (Annexe A).

Les cellules d'un SiPM sont chacune composée d'une GM-APD connectée en série à une résistance qui sert de résistance d'étouffement. Ces cellules sont connectées en parallèle de façon à ce que le courant total du système soit égal à la somme des courants générés dans chaque cellule. Un schéma électrique est illustré à la Figure 2.1.

Chaque fois qu'un photon interagit avec une partie photosensible d'une GM-APD à la surface du SiPM, celui-ci a des chances d'être absorbé et de générer une paire électron-trou qui contribue à la formation d'un courant par phénomène d'avalanche [11], [12]. Le courant produit s'additionne à ceux dans toutes les autres cellules connectées, grâce à la configuration en parallèle. L'amplitude du signal reçu correspond donc idéalement au nombre de photons détectés multiplié par l'amplitude du signal d'une cellule unique [2], [12]. Le nombre de photons détectés peut donc être calculé en divisant l'amplitude du signal reçu par l'amplitude du signal d'une cellule unique.

En pratique, plusieurs phénomènes parasites surviennent et pas tous les photons incidents ne sont détectés. Par exemple, si plusieurs photons arrivent simultanément sur la même cellule d'un SiPM, un seul photon n'est compté. Les sections 2.1 et 2.5 décrivent sommairement quelques caractéristiques de performance d'un SiPM : facteur de remplissage, gain, efficacité quantique, efficacité de détection des photons et différentes sources de bruit.

La Figure 2.2 est un exemple de signal généré par un SiPM d'Excelitas mis à l'obscurité. La mesure de tension est effectuée en fonction du temps aux bornes d'une résistance externe.

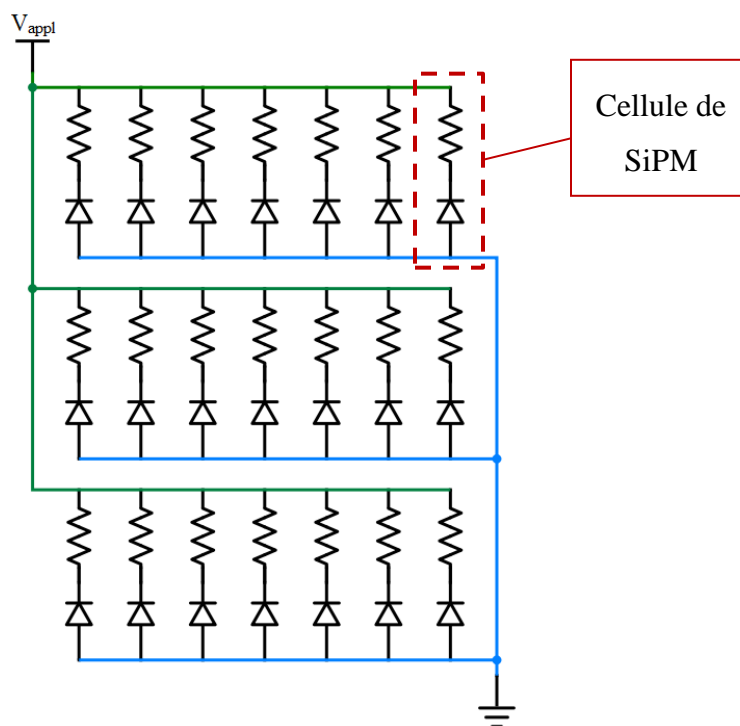


Figure 2.1 : Schéma électrique de cellules de SiPM.

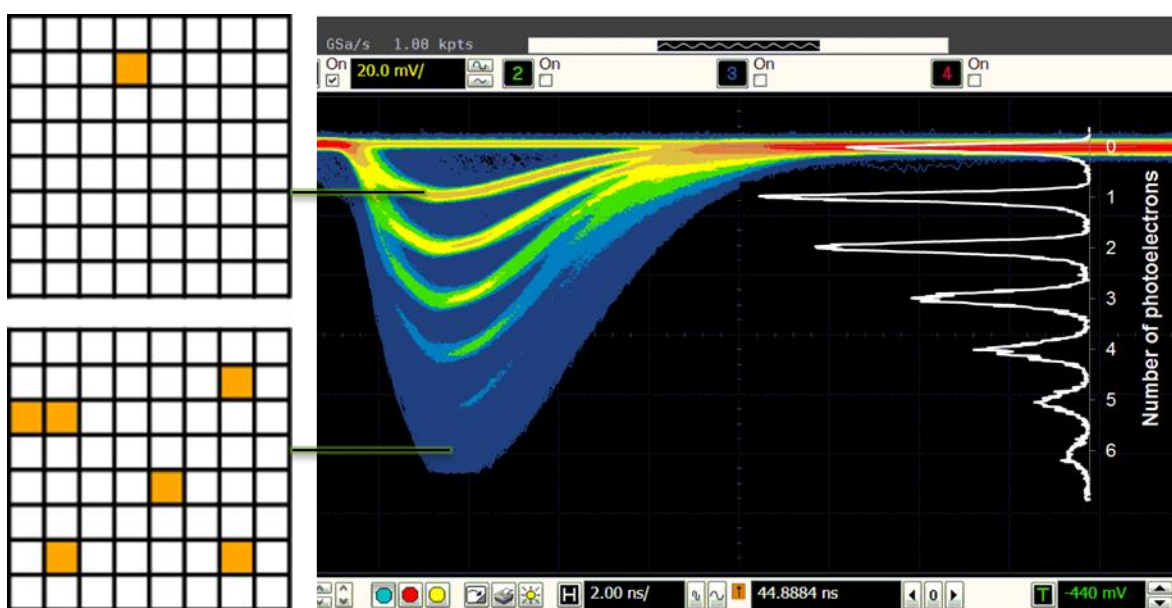


Figure 2.2 : Exemple d'un signal de SiPM (tension mesurée en fonction du temps) dans l'obscurité (avalanches dues aux excitations thermiques). Le graphique de droite est le signal correspondant au nombre d'évènements obtenus (déclenchements de cellules) pour chaque million de photo-électrons (gain = 1 million). Image provenant d'Excelitas, modifiée et utilisée avec la permission de M. Martin Couture.

2.1 Facteur de remplissage

Le facteur de remplissage F correspond au rapport de l'aire de surface sensible aux photons sur l'aire totale [12]. Pour un SiPM, les parties insensibles aux photons correspondent par exemple aux lignes de résistance et de conduction électriques et aux zones servant d'isolation optique ou électrique entre les cellules (tranchées d'isolement).

Les TSV permettent d'augmenter le facteur de remplissage en faisant passer les lignes insensibles à travers la tranche.

2.2 Gain

Un photon produit un nombre de photoélectrons égal au gain. Ce gain est calculé comme le rapport de la charge d'une impulsion générée par l'absorption d'un seul photon sur la charge d'un seul électron (équation (2.1)) [12].

$$G = \frac{Q_{signal}}{|e|} = \frac{\Delta V C_d}{|e|} = \frac{(V_{bias} - V_{seuil})C_{int}}{|e|} \quad (2.1)$$

$$\Delta V := V_{appl} - V_{seuil} (> 0) \quad (2.2)$$

ΔV : Surtension d'opération

V_{appl} : Tension appliquée (ou d'opération)

V_{seuil} : Tension de claquage

C_{int} : Capacité interne d'une cellule (dizaines à centaines de fF)

$|e|$: Charge élémentaire ($e = -1,602 \times 10^{-19} C$)

2.3 Efficacité quantique

Pour un SiPM, l'efficacité quantique Q_E représente la portion de photons incidents qui contribuent au photocourant [12]. L'équation (2.3) correspond à cette définition.

$$Q_E := \frac{Nb \text{ photons qui contribuent}}{Nb \text{ photons incidents}} \quad (2.3)$$

L'équation (2.4) permet de calculer l'efficacité quantique d'un SiPM en tenant compte de la réflexion à la surface.

$$Q_E = (1 - r)\xi\gamma \quad (2.4)$$

r : Probabilité de réflexion du photon à la surface

ξ : Fraction de paires électron-trou sans recombinaison et qui participent donc au photocourant

γ : Fraction de photons absorbés dans la zone de déplétion

2.4 Efficacité de détection de photons

La PDE (efficacité de détection de photons) correspond à l'efficacité quantique affectée par le facteur de remplissage F et la probabilité P_{trig} qu'un porteur de charge déclenche une avalanche. L'équation (2.5) [12] permet de calculer la PDE.

$$PDE = FQ_E P_{trig} \quad (2.5)$$

Il est à noter que la PDE dépend de la longueur d'onde de la source étant donné que Q_E et P_{trig} en sont dépendants. Il est avantageux d'obtenir une PDE maximale à la longueur d'onde spécifique d'opération.

Plus la PDE est élevée, plus la probabilité qu'un photon incident soit détecté est élevée. Un SiPM de haute PDE est souhaitable pour s'assurer de détecter le plus de photons incidents possibles. Le nombre de photons qui sature un SiPM correspond au rapport du nombre de cellules de SiPM sur la PDE [12]. Dans ce cas, l'ajout de photons n'affecte plus le signal et il faut donc augmenter le nombre de cellules.

En utilisant des TSV, plus de cellules peuvent être introduites pour une même aire de surface donnée.

2.5 Bruit

Il existe plusieurs types de bruit dans le signal d'un SiPM. Une liste non exhaustive se retrouve au Tableau 2.1 avec chacun une courte description des causes et des conséquences.

Tableau 2.1 : Causes et conséquences de bruits retrouvés dans un signal de SiPM. Informations tirées de [11]–[13], [25].

Type de bruit	Causes	Conséquences
Courant noir	Excitations thermiques et effet tunnel	<ul style="list-style-type: none"> • Courant en absence de lumière • Capacité de comptage à faible luminosité réduite
Post-impulsion	Libération de porteurs de charge piégés dans la zone de déplétion pendant l’avalanche	Signal à deux impulsions pour l’absorption d’un même photon (surestimation).
Diaphonie (plus de détails à la section 4.2)	Avalanche dans une cellule de SiPM générée par l’avalanche dans une cellule voisine.	Un photon génère un signal correspondant à la détection de plusieurs photons (surestimation).

Le rapport signal sur bruit peut être amélioré grâce à des procédés robustes de microfabrication. Les procédés les plus importants du projet sont décrits au Chapitre 3.

CHAPITRE 3 TECHNIQUES DE MICROFABRICATION

Ce chapitre traite des concepts de microfabrication les plus importants pour l'élaboration d'un procédé permettant d'atteindre les objectifs du projet : dépôt, oxydation thermique, photolithographie et gravure.

3.1 Méthodes de dépôt chimique en phase vapeur et oxydation thermique du silicium

Le CVD (dépôt chimique en phase vapeur), ses variantes, comme le LPCVD (CVD à basse pression) et le PECVD (CVD assisté par plasma), ainsi que l'oxydation thermique sont des méthodes permettant d'ajouter un matériau à un système en cours de fabrication.

3.1.1 CVD

Le CVD consiste à favoriser une réaction chimique dans un milieu contrôlé dans le but de déposer un matériau sur une surface. Il existe plusieurs variantes qui se distinguent par leurs conditions de procédé et leurs résultats finaux. Les acronymes LPCVD et PECVD désignent respectivement des dépôts chimiques en phase vapeur à basse pression et assistés par plasma. En général, le CVD est un procédé très versatile de dépôt au sens où 1) plusieurs types de matériaux peuvent être déposés et 2) les intervalles de température et de pression possibles sont larges. Le processus d'un CVD régulier est présenté en 5 étapes à la Figure 3.1.

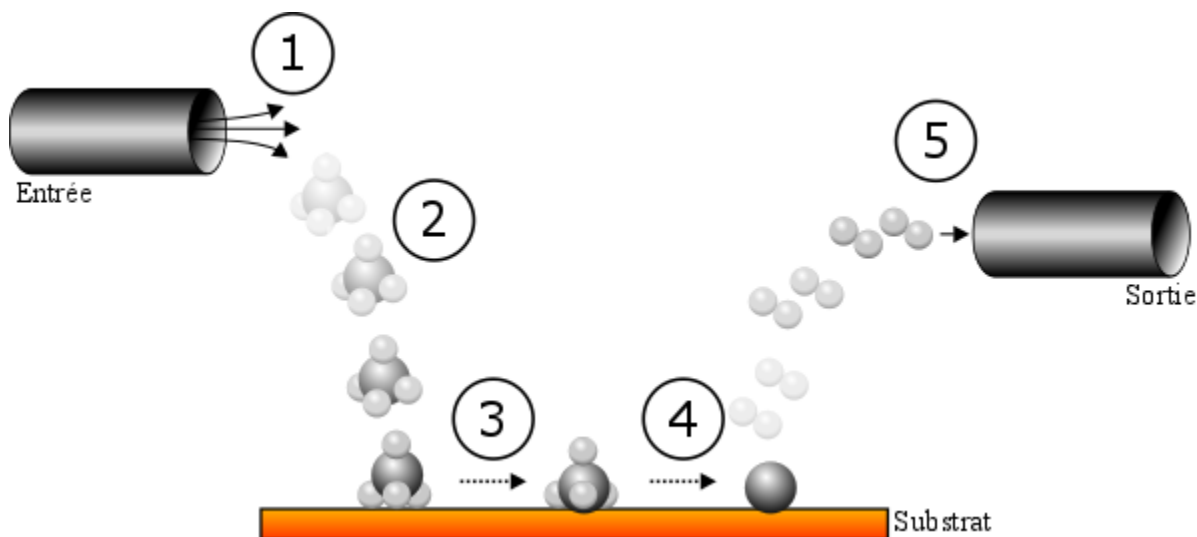


Figure 3.1 : Les 5 étapes principales d'un procédé de CVD régulier. Inspirée de [26, p. 417, 420, 421].

1. Injection des gaz

Les gaz réactifs sont généralement dilués dans un gaz porteur (souvent inerte) et sont envoyés dans l'enceinte où se trouve le substrat. Les molécules de gaz peuvent se décomposer et libérer des sous-produits.

2. Diffusion vers la surface du substrat

Les molécules de gaz atteignent la surface du substrat par diffusion.

3. Adsorption et réactions à la surface

Les molécules de gaz sont adsorbées à la surface. Des réactions endothermiques entre la surface et les molécules de gaz adsorbées forment la couche de dépôt.

4. Désorption de sous-produits

Les sous-produits quittent la surface par désorption.

5. Évacuation

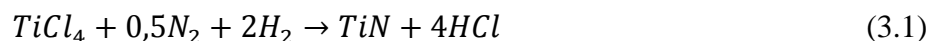
Les sous-produits sont pompés hors de l'enceinte.

L'étape au cours de laquelle s'effectue la transition de l'état gazeux à l'état solide (condensation) dépend de la nature des gaz utilisés. Dans un cas désirable, la condensation s'effectue proche ou en contact avec la surface du substrat par réactions hétérogènes (gaz – solide). Dans d'autres cas,

des réactions homogènes (gaz – gaz) entre les molécules de gaz peuvent se produire pendant la diffusion. Ces réactions homogènes mènent au dépôt du matériau sous forme de fragments, formant une couche de faible adhérence, de faible densité et avec plusieurs défauts et impuretés [26, p. 415], [27]. Des réactions homogènes peuvent aussi avoir lieu à la surface du substrat si la nature chimique du gaz est instable à haute température (le SiH_4 par exemple), résultant à la projection de fragments qui peuvent retomber sur le substrat.

La vitesse de dépôt correspond à la vitesse de l'étape dite « limitante », qui constitue l'étape la plus lente du processus. À basse pression, la vitesse de diffusion des molécules vers la surface du substrat augmente. L'étape limitante est alors celle des réactions à la surface. Dans ce cas, une haute température est de mise afin d'accélérer les réactions endothermiques à la surface. Dans le cas d'une pression atmosphérique, les réactions à la surface sont plus rapides que l'arrivée des molécules. C'est donc le débit des gaz qui doit être augmenté pour accélérer le dépôt.

Le TiN (nitrure de titane) et le W (tungstène) sont deux exemples de matériaux qui peuvent être déposés par CVD et qui constituent un intérêt pour le projet. Les procédés de CVD respectifs sont décrits par les réactions chimiques suivantes [26, p. 415] :



Les températures utilisées sont environ 900°C pour la formation de TiN (réaction (3.1)) et 600°C pour la formation de W (réaction (3.2)) [26, p. 415].

3.1.2 LPCVD

Le LPCVD est une variante à basse pression (30 – 260 Pa [26, p. 429]) du CVD. Le dépôt à basse pression permet d'obtenir une meilleure uniformité en limitant la vitesse du procédé à l'étape des réactions à la surface du substrat [26, p. 421,428]. La température du procédé doit être élevée (300°C à 900°C [26, p. 429]) pour activer les réactions et déposer le film plus rapidement. Ceci limite le LPCVD aux microsystèmes qui peuvent tolérer un budget thermique plus élevé.

Le LPCVD se produit généralement à l'intérieur d'un tube de quartz dans lequel plusieurs tranches peuvent être traitées en même temps [26, p. 421,428]. En raison de la configuration de ce système, le dépôt se fait sur les deux côtés des tranches.

Le nitrure de silicium stœchiométrique (Si_3N_4) et le polysilicium (Si ou polySi) sont deux exemples de matériaux qui peuvent être déposés par LPCVD et qui constituent un intérêt pour ce projet. Les procédés de LPCVD respectifs sont décrits par les réactions chimiques suivantes [26, p. 415,430] :



Les températures utilisées sont environ 800°C [26, p. 432] pour la formation de Si_3N_4 (réaction (3.3)) et 600°C [26, p. 432] pour la formation de polysilicium (réaction (3.4)).

3.1.3 PECVD

Le PECVD est une variante du CVD pour laquelle un plasma (définition du plasma, section 3.5.1) génère les radicaux libres et ions qui participent aux réactions chimiques menant au dépôt. Les radicaux libres du plasma constituent les composants du matériau déposé et les bombardements ioniques à la surface du substrat favorisent l'activation des réactions endothermiques. Les températures utilisées sont souvent basses (moins de 400°C) par rapport au LPCVD. Ceci rend le PECVD compatible avec un plus grand éventail de matériaux déjà présents sur les tranches. De plus, la vitesse de dépôt par PECVD est plus élevée que celle par LPCVD. [26, p. 418, 430, 431]

Le PECVD se produit entre deux électrodes parallèles mises sous tension. Les tranches sont placées sur un plateau à température contrôlée. Le dépôt ne s'effectue que d'un seul côté des tranches et moins de tranches peuvent être traitées en même temps que dans le cas du LPCVD. [26, p. 431]

L'étape de passivation dans un procédé Bosch durant une DRIE (section 3.5.5.2; réactions (3.31), (3.32) et (3.33)) constitue un exemple de PECVD [28].

3.1.4 Oxydation thermique du silicium

L'oxydation thermique du silicium est une technique permettant de faire croître une couche d'oxyde de silicium stœchiométrique (SiO_2) sur du silicium en forçant les interactions entre le silicium et l'oxygène.

Lorsque le silicium est en présence d'oxygène, ce dernier consomme le silicium pour former des molécules de SiO_2 . Pour cette raison, 46% de l'épaisseur d'oxyde formée correspond à l'épaisseur de silicium consommée et donc seulement 54% de l'épaisseur d'oxyde dépasse le niveau initial de la surface [29], tel qu'illustré à la Figure 3.2.

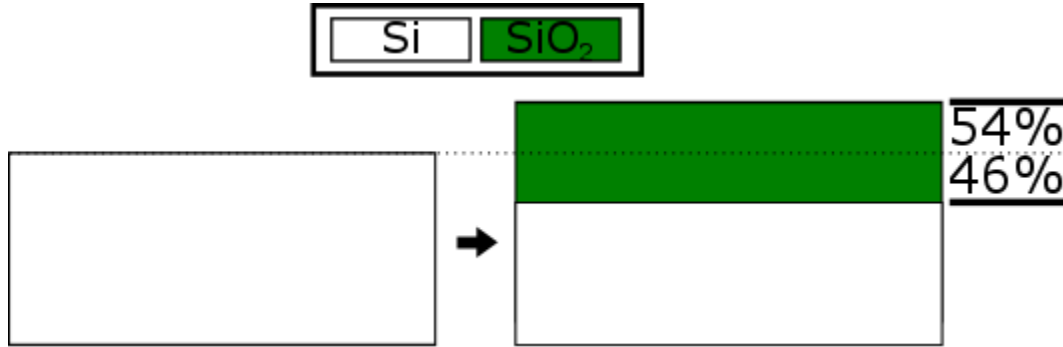
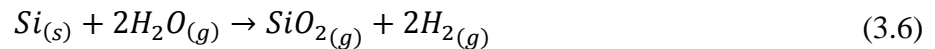
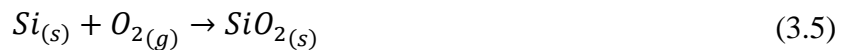


Figure 3.2 : Consommation du silicium lors de son oxydation thermique.

Les tranches de silicium s'oxydent naturellement à l'air libre, mais l'épaisseur de l'oxyde de silicium est très limitée; c'est l'oxyde natif [29]. L'oxydation thermique permet d'accélérer et de contrôler ce processus de croissance. Il s'agit d'abord d'introduire les tranches dans un tube ou un four, puis d'élever la température entre 850°C et 1200°C [29].

Il existe deux types d'oxydation thermique : l'oxydation sèche et l'oxydation humide. L'oxydation sèche est le cas où l'oxygène est introduit dans la chambre à l'état pur (O_2). Dans le cas de l'oxydation humide, ce sont des vapeurs d'eau qui transportent l'oxygène (H_2O). Les réactions (3.5) et (3.6) correspondent respectivement aux oxydations sèche et humide [29].



Les indices (s), (g) correspondent respectivement aux états solide et gazeux.

L'oxydation sèche permet d'obtenir une couche d'oxyde plus homogène et avec moins de défauts que l'oxydation humide, mais est plus lente. Pour l'obtention d'une couche d'oxyde épaisse, l'oxydation humide est donc privilégiée aux dépens de la qualité du résultat. [29], [30]

La température favorise la cinétique des réactions (3.5) et (3.6) et permet donc dans les deux cas, d'augmenter la vitesse du processus d'oxydation. Ceci limite l'oxydation thermique aux microsystèmes qui peuvent tolérer un budget thermique plus élevé. [30]

3.2 Photolithographie

La photolithographie est une forme de lithographie utilisant la lumière, dans le spectre des UV (ultra-violets) ou des DUV (ultra-violets profonds), pour répliquer des motifs d'un masque sur une couche de photorésine.

La lithographie connaît aujourd'hui bien des formes, mais c'est la photolithographie qui est la forme la plus répandue dans l'industrie de la microfabrication grâce à 1) sa résolution qui s'améliore au fil des ans et à 2) sa capacité à reproduire rapidement et à faible coût des motifs d'un masque sur une couche de photorésine [26, p. 4]. Toutes les résines utilisées dans le cadre du projet de maîtrise sont des photorésines sensibles à la lumière UV. La photolithographie requiert l'utilisation d'un masque constitué d'une plaque transparente aux UV partiellement couverte d'un matériau qui les bloque, comme le chrome. Les motifs de ce masque sont réalisés à l'aide de techniques de lithographie plus coûteuses, comme la lithographie à faisceau d'électrons qui n'est pas expliquée ici. Un tel masque, bien que coûteux, peut être réutilisé sur une grande quantité de tranches, d'où l'intérêt économique de la photolithographie.

Cette section traite d'abord des deux types de photorésine et de leur réaction lorsqu'exposés aux UV. Ensuite, les 5 étapes de photolithographie sont décrites : apprêt, dépôt de résine, exposition, développement et nettoyage. Finalement, les trois types de cuisson utilisés entre ces étapes, c'est-à-dire les cuissons douces, post-exposition et fortes, sont expliqués. La Figure 3.3 illustre la chronologie de toutes ces étapes.

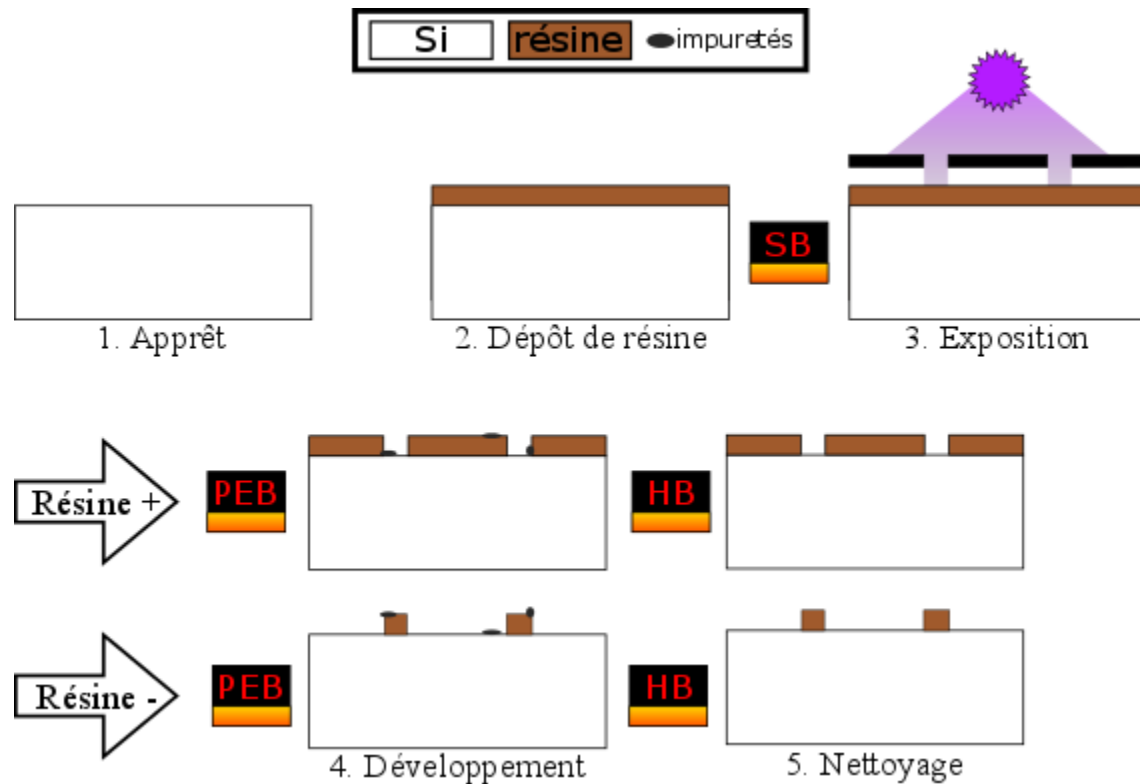


Figure 3.3 : 5 étapes principales d'un procédé de photolithographie régulier avec les 3 étapes de cuissons.

Sur la Figure 3.3, les termes « résine + » et « résine - » désignent respectivement la résine positive et la résine négative. Les acronymes associés aux cuissons sont les suivants :

- SB : cuisson douce (traduction libre de « softbake »)
- PEB : cuisson post-exposition (traduction libre de « post-exposure bake »)
- HB : cuisson forte (traduction libre de « hardbake »)

3.2.1 Photorésine positive vs négative et photoréaction par UV

La photorésine positive est insoluble, mais devient soluble lorsque soumise aux UV. L'exposition aux UV brise les liens entre les chaînes polymériques, rendant la photorésine positive exposée jusqu'à 10 fois plus soluble [26, p. 26]. À l'inverse, la photorésine négative est initialement soluble, mais l'exposition aux UV génère des liaisons polymériques qui la rendent insolubles.

Il existe des compositions différentes de photorésine, mais chacune comprend au moins un polymère et un solvant [26, p. 26]. Le solvant sert à rendre la photorésine suffisamment liquide

pour un dépôt par tournette (section 3.2.3). Les résines utilisées dans le cadre du projet sont des photorésines positives qui contiennent un sensibilisateur insoluble de type DNQ (diazonaphthoquinone, $C_{10}H_6N_2O$). Une fois que la photorésine positive est soumise aux UV, une molécule d'azote (N_2) se détache du sensibilisateur [26, p. 27], [31]. Le sensibilisateur se reconfigure alors en cétène et devient réactif avec la molécule d'eau [31]. Une molécule d'eau doit alors s'attacher au cétène pour que le produit formé devienne soluble et que la photoréaction soit complétée. Si l'humidité dans l'air est trop faible, il se forme une liaison polymérique entre le cétène et la résine qui reste alors insoluble [32]. Un contrôle de la température permet généralement de bien contrôler l'humidité. Dans le cas de résines épaisses, les molécules d'eau se distribuent de façon moins homogène dans la résine [33].

Dans la résine positive, plus la concentration de sensibilisateurs insolubles DNQ est élevée, plus le taux de retrait de la partie exposée de la résine est élevé et plus le taux de retrait de la partie non exposée est faible [31].

3.2.2 Apprêt par application de molécules d'hexamethyldisilazane (HMDS)

Avant de déposer la résine sur une tranche, une étape d'apprêt (traduction libre de « priming ») doit avoir lieu. L'apprêt sert à préparer la tranche pour obtenir une meilleure adhérence entre le substrat et la résine qui sera déposée. La résine, surtout si elle est positive, adhère mal aux tranches de silicium non apprêtée, puisqu'elle a tendance à adhérer aux molécules d'eau de l'air adsorbées à la surface de l'oxyde natif (hydrophile), plutôt qu'à adhérer à la surface du substrat (hydrophobe) [26, p. 41]. Plus la surface est hydrophobe, plus l'adhérence entre la résine et le substrat est bonne [26, p. 42].

L'apprêt d'une tranche peut se faire en appliquant des molécules de HMDS dans un four conçu à cet effet. L'acronyme HMDS définit la molécule 1,1,1,3,3,3-hexamethyldisilazane de formule chimique $(CH_3)_3SiNHSi(CH_3)_3$ [26, p. 41] qui a été développée et brevetée par la compagnie IBM en 1970 [34]. Le procédé d'apprêt régulier dans un four HMDS s'effectue en trois étapes : déshydratation, dépôt HMDS et évacuation [35].

1. Déshydratation

L'étape de déshydratation consiste à répéter un cycle constitué de jets d'azote chaud dans un four et de dépressurisation par pompage. La température élevée permet de déshydrater l'oxyde natif,

alors que le pompage permet d'expulser les vapeurs d'eau et l'oxygène hors du four. La déshydratation est l'étape la plus longue de l'apprêt et peut durer jusqu'à 30 minutes. [26, p. 42], [35]

2. Dépôt HMDS

Lorsque l'oxyde est suffisamment déshydraté et que la pression est suffisamment basse pour prévenir une réhydratation, de la vapeur de HMDS est introduite dans la chambre. Les molécules de HMDS adhèrent alors à l'oxyde natif déshydraté par liaisons chimiques et rendent la surface hydrophobe. Si des molécules d'eau sont présentes, les molécules de HMDS ne peuvent pas adhérer à la surface. [26, p. 42], [35]

3. Évacuation

Une évacuation s'ajoute pour s'assurer d'un retrait des molécules de HMDS qui ne sont pas utilisées. Le four est dépressurisé à pression atmosphérique. [26, p. 42], [35]

Pour résumer, la surface d'une tranche de silicium non apprêtée est hydrophile à cause de l'oxyde natif et la résine adhère mal à la surface, alors qu'une tranche de silicium apprêtée par application de molécules de HMDS est hydrophobe et la résine adhère bien à la surface.

3.2.3 Dépôt de résine par tournette

Le solvant contenu dans la résine permet de déposer uniformément une épaisseur désirée de résine à l'aide d'une tournette. Un procédé régulier de dépôt de résine par tournette s'effectue en 3 étapes : dépôt de résine, obtention de l'épaisseur par rotation et décapage de perle au bord (traduction libre de « Edge Bead Removal »; acronyme EBR).

Pour empêcher la redondance du terme, le dépôt de résine est, dans le cadre de ce travail, implicitement effectué par tournette.

1. Dépôt de résine

La tranche est maintenue par aspiration sur la tournette. Le dépôt s'effectue grâce à un bras de distribution qui envoie la résine. Pendant le dépôt, la tranche tourne généralement à basse vitesse [26, p. 16] afin d'étendre la résine sur la surface complète de la tranche.

2. Obtention de l'épaisseur par rotation

La tranche tourne plus rapidement, généralement entre 1500 et 6000 tr/min (tours par minute) [26, p. 16]. Par force centrifuge, la résine se voit repoussée au bord de la tranche et une partie est expulsée [26, p. 16]. Une couche de résine plus uniforme est alors obtenue. La combinaison de la vitesse de rotation ω , de la concentration de polymère C (en $g/100\text{ mL}$) contenue dans la résine et de la viscosité intrinsèque η de la résine détermine l'épaisseur finale T . L'équation (3.7) [26, p. 16] est une façon empirique de calculer l'épaisseur finale obtenue.

$$T = \frac{KC^\beta\eta^\gamma}{\omega^\alpha} \quad (3.7)$$

Où K est une constante dite de calibration et les facteurs exponentiels (α, β, γ) sont obtenus expérimentalement. Cette équation est valide pour un temps de rotation assez long pour que la résine atteigne l'épaisseur désirée et que le solvant soit évaporé en quantité suffisante.

Il existe d'autres variables que celles incluses dans l'équation (3.7) qui influencent l'épaisseur résultante. L'adhérence entre la résine et le substrat, la température et l'humidité sont d'autres paramètres qui influencent l'épaisseur résultante et la qualité de dépôt [26, p. 17].

3. Décapage de perle au bord

Durant la rotation, une partie de la résine s'accumule sur les rebords à cause de la combinaison entre la force centrifuge qui l'amène au bord et la tension de surface qui la retient. La résine est ainsi plus épaisse à cet endroit et perle sur le bord et sous la tranche. Ce phénomène porte le nom de perle au bord (traduction libre de « Edge Bead ») et est illustré à la Figure 3.4. Une étape subséquente de brève rotation à haute vitesse aide à se débarrasser du surplus de résine par force centrifuge [36]. Un solvant qui dissout la résine peut être appliqué au bord ou sous la tranche pour nettoyer le dessous et retirer la perle au bord [37].



Figure 3.4 : Résine présentant des perles au bord de la tranche.

À cause des forces de tension de surface et de gravité, la résine déposée par-dessus des structures profondes peut mal recouvrir les coins, tel que présenté à la Figure 3.5 [38].

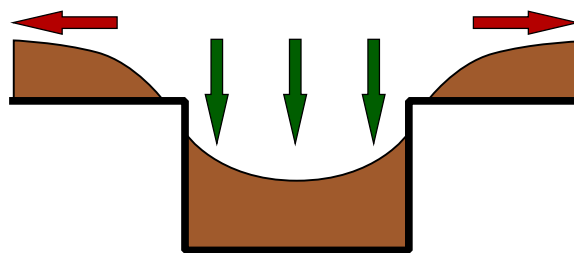


Figure 3.5 : Représentation des forces agissant sur la résine déposée par-dessus une structure profonde.

L'étape de dépôt de résine par tournette est suivie d'une cuisson douce (section 3.2.7) avant de passer à l'exposition. Ceci, principalement pour faire évaporer le solvant de la résine.

3.2.4 Exposition aux UV

Tel que mentionné à la section 3.2.1, l'exposition aux UV définit des zones solubles et insolubles dans la photorésine. La longueur d'onde, le temps d'exposition et la dose d'exposition sont des paramètres de l'exposition permettant d'ajuster la résolution.

1. Longueur d'onde

La longueur d'onde doit faire partie du spectre sensible de la résine exposée, c'est-à-dire que la lumière doit être absorbée par la résine [31].

2. Temps d'exposition

Les résines positives constituées d'un sensibilisateur de type DNQ absorbent les UV, mais après réaction, elles y deviennent transparentes [31]. Ceci dit, pour une résine épaisse, le temps d'exposition doit être plus long afin de faire réagir la résine sur toute son épaisseur.

3. Dose d'exposition

La dose d'exposition correspond à l'énergie déposée par unité de surface sur la tranche. Elle doit être suffisamment élevée pour que la photoréaction puisse être réalisée. Pour une résine positive, la vitesse de développement augmente avec la dose d'exposition. Si cette dernière est trop faible, un temps de développement plus élevé est requis, ce qui génère plus d'érosion. Par contre, si la dose d'exposition est trop élevée, les phénomènes de diffusion et de diffraction de la lumière au

sein de la résine s'intensifient et peuvent mener à un élargissement des ouvertures du masque lors du développement [31]. La dose d'exposition optimale se trouve souvent à la suite de tests par essais et erreurs [39], bien qu'elle puisse être calculée.

4. Résolution

La résolution R constitue la plus petite dimension que peuvent avoir les motifs à définir dans la résine. Pour un système simple d'un masque au-dessus d'une tranche, la résolution est approximée ainsi [26, p. 54] :

$$R \approx \frac{3}{2} \sqrt{\lambda \left(s + \frac{z}{2} \right)} \quad (3.8)$$

Où λ est la longueur d'onde d'exposition, s est la distance entre le masque et la surface de la résine et z est l'épaisseur de la résine.

L'équation (3.8) reste une approximation de la résolution qui est affectée par la diffraction de la lumière, le parallélisme du masque par rapport à la tranche, les irrégularités de surface de la tranche et les contaminants [26, p. 54]. Si $s = 0$, on parle d'une exposition par contact. Sinon, c'est une exposition dite en proximité. Dans le cas où un système de lentilles est ajouté entre le masque et la tranche, l'équation (3.8) n'est plus valide et on parle alors d'exposition par projection. Les 3 types d'exposition sont illustrés à la Figure 3.6.

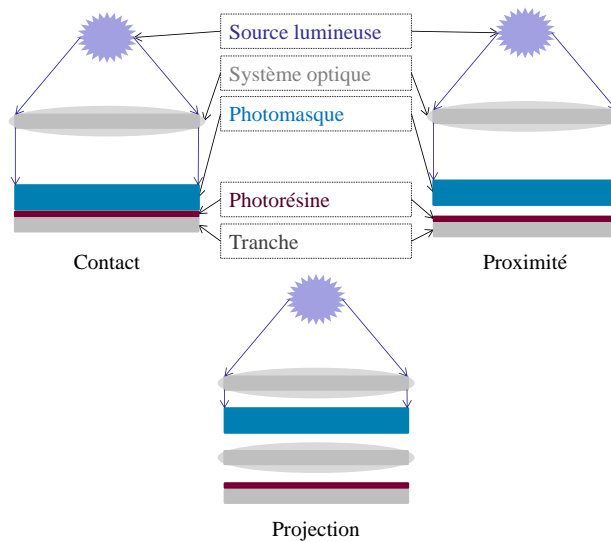


Figure 3.6 : 3 types d'exposition en photolithographie. Image provenant d'Excelitas, modifiée et utilisée avec la permission de Mme. Fatou Binetou Koné.

3.2.4.1 Exposition par contact

Lors de l'exposition par contact, le masque est en contact direct avec la tranche. Dans l'équation (3.8), $s = 0$. La résolution est donc minimisée et prend la forme de l'équation (3.9).

$$R \approx \frac{3}{2} \sqrt{\lambda \frac{z}{2}} \quad (3.9)$$

Lors du contact, la résine présente sur la tranche peut se coller au masque et ainsi le contaminer. La tranche peut donc devenir mal protégée et la reproductibilité du procédé se voit affectée par les résidus de résine sur le masque. Un nettoyage régulier du masque s'impose donc pour ce type d'exposition afin de maintenir la qualité et la reproductibilité du procédé. [26, p. 54,55]

À Excelitas, les expositions par contact sont réalisées à l'aide d'un aligneur par contact, qui peut aussi effectuer une exposition en proximité si utilisé dans un mode spécial.

3.2.4.2 Exposition en proximité

En mode proximité, le masque est maintenu à distance de la tranche à exposer. Il se salit ainsi beaucoup moins rapidement que par contact, puisque la résine ne peut pas venir se coller dessus.

Le trajet optique entre le masque et la tranche est toutefois suffisant pour limiter la résolution à cause de la diffraction des rayons UV. Comme montré par l'équation (3.8), plus le masque s'éloigne de la tranche, moins la résolution est bonne. Dans le cas très éloigné ($s \gg z$) :

$$R \approx \frac{3}{2} \sqrt{\lambda s} \quad (3.10)$$

Pour bénéficier d'une bonne reproductibilité et d'une meilleure résolution, un système de lentilles peut être ajouté entre le masque et la tranche; c'est l'exposition par projection. [26, p. 54,55]

3.2.4.3 Exposition par projection

L'exposition par projection est le cas où le masque et la tranche sont séparés par un système de lentilles qui focalise et redresse les rayons UV. L'exposition par projection possède les avantages des deux autres types d'exposition et ce, sans leurs désavantages. Il n'en reste pas moins que l'exposition par projection est une technique complexe qui requière un système de photolithographie coûteux. [26, p. 54,55]

À Excelitas, un « stepper » permet d'effectuer une exposition par projection de façon automatisée. Les masques utilisés pour le « stepper » sont nommés « réticules ». Au lieu d'avoir un dessin complet de tous les motifs à exposer, les réticules ne possèdent typiquement qu'un seul champ contenant ces motifs et sont exposés plusieurs fois en balayant la tranche. Le fonctionnement est expliqué à la section 5.1.6.3.

Une cuisson post-exposition (section 3.2.7) est effectuée entre l'exposition aux UV et le développement humide de la photorésine.

3.2.5 Développement humide de la photorésine

Le développement de la photorésine permet de retirer la partie soluble de la résine grâce à un solvant (ou développeur). Pour des résines positives, le solvant est généralement une solution alcalino-aqueuse, alors que les résines négatives sont développées dans des solvants organiques. En industrie, il existe généralement un développeur par sorte de résine, puisque chaque développeur est chimiquement optimisé pour développer dans le plus court laps de temps possible. [26, p. 25]

Il existe deux façons d'effectuer un développement humide de la photorésine : 1) par vaporisation à l'aide de jets de solvant et 2) par immersion dans un bain de solvant [26, p. 24]. La vaporisation est la technique utilisée dans ce projet de maîtrise. Plus précisément, le procédé utilisé dans le projet est un procédé dit « puddle », qui est traduit ici comme un procédé « flaque » (traduction libre). Le procédé « flaque » de base comprend quatre étapes : vaporisation, flaque, rinçage et séchage. Il existe aussi le procédé « double-puddle », qui est traduit ici comme le procédé « double-flaque » (traduction libre). Le procédé « double-flaque » est le même que le procédé « flaque », sauf que les étapes de vaporisation et de flaque sont faites à 2 reprises : vaporisation, flaque, vaporisation, flaque, rinçage et séchage.

Pour empêcher la redondance du terme, le développement est, dans le cadre de ce travail, implicitement effectué par vaporisation.

1. Vaporisation

Comme à l'étape de dépôt de résine, la tranche est maintenue par aspiration sur une tournette. En tournant la tranche, le développeur est vaporisé sur la surface et commence à dissoudre la partie

soluble du masque de résine (partie exposée de la résine positive; partie non exposée de la résine négative).

2. Flaque (« puddle »)

La tranche s'arrête de tourner et une flaque de développeur se forme à la surface. En l'absence de forces centrifuges, cette phase permet au développeur d'entrer plus aisément à l'intérieur des structures de résine. Pour empêcher une saturation du développeur par la présence de résine dissoute, la tranche effectue de courtes rotations lentes pour renouveler le solvant à la surface de la résine. À la fin de cette étape, une rotation rapide est effectuée afin de retirer par force centrifuge un maximum de développeur.

3. Rinçage

Des résidus de développeur dans les ouvertures du masque de résine peuvent générer un phénomène d'érosion et amincir la résine environnante. De l'eau déionisée est donc projetée sur la tranche tournante pour optimiser le retrait du développeur qui n'est plus utile au développement.

4. Séchage

La tranche est asséchée en tournant à haute vitesse. Un jet d'azote peut aussi être utilisé.

Une cuisson forte (section 3.2.7) se retrouve entre le développement humide de la photorésine et le nettoyage.

3.2.6 Rinçage-séchage

À la fin de la photolithographie, un rinçage à l'eau déionisée suivi d'un séchage est effectué dans un rinceur centrifuge afin d'optimiser le retrait de toute matière résiduelle, développeur ou autres, à la surface de la tranche.

3.2.7 Types de cuisson

La résine peut subir trois types de cuisson : la cuisson douce, la cuisson post-exposition et la cuisson forte. Ces cuissons sont respectivement effectuées suite aux étapes de dépôt de résine, d'exposition aux UV et de développement.

3.2.7.1 Cuisson douce

La cuisson douce (ou SB pour l'anglais « Softbake ») est effectuée juste après le dépôt de résine. La SB permet de faire évaporer le solvant contenu dans la résine pour ainsi [40] :

- améliorer l'adhérence de la résine au substrat;
- aider à prévenir l'amincissement de la partie insoluble de la résine en minimisant le phénomène d'érosion provoqué durant le développement;
- éviter la formation de bulles dans la résine durant l'exposition et les procédés subséquents à plus haute température;
- augmenter la photosensibilité de la photorésine.

Il est recommandé d'utiliser une plaque chauffante plutôt qu'un four, puisque 1) c'est moins contaminant et 2) dans un four, une croûte imperméable se forme à la surface de la résine et peut emprisonner le solvant à l'intérieur de la résine. Dans le cas d'une plaque chauffante, la chaleur progresse à partir du bas du substrat et permet donc d'évaporer du solvant avant que la croûte imperméable ne se forme à la surface. [26, p. 22]

3.2.7.2 Cuisson post-exposition

La cuisson post-exposition (ou PEB pour l'anglais « Post-Exposure Bake ») est effectuée entre l'exposition et le développement. La PEB permet de [26, p. 24], [39], [40] :

- Catalyser la photoréaction de certaines sortes de résines dites « amplifiées chimiquement », pour lesquelles la température favorise la photoréaction;
- réduire les contraintes mécaniques générées durant la cuisson douce;
- améliorer la résolution des ouvertures du masque après développement;
- améliorer la qualité des parois de la résine développée (parois plus lisses);
- améliorer la résistance à la gravure « sèche » (définition à la section 3.3).

La propriété monochromatique de l'exposition UV entraîne des interférences qui provoquent l'apparition d'ondulations sur les parois de la résine positive développée. La cuisson post-exposition permet au sensibilisateur de la photorésine positive de diffuser et de corriger ces ondulations, de sorte à obtenir des profils plus lisses [26, p. 24], [39]. Pour des photorésines

positives et surtout si elles sont épaisses, un temps d'attente entre l'exposition aux UV et la PEB peut être nécessaire pour 1) laisser l'eau contenue dans l'air participer à la photoréaction afin d'obtenir une bonne solubilité de la partie exposée de la photorésine [33] et 2) laisser les molécules N_2 du sensibilisateur DNQ être libérées en quantité suffisante pour prévenir la génération de contraintes mécaniques importantes au sein de la photorésine [40].

3.2.7.3 Cuisson forte

La cuisson forte (ou HB pour l'anglais « Hardbake ») est effectuée directement après le développement. La HB permet de [39], [40] :

- faire évaporer des résidus de solvant et de développeur;
- augmenter la stabilité thermique, chimique et physique de la résine en la durcissant;
- améliorer l'adhérence de la résine au substrat durant les gravures humides;
- améliorer la résistance à la gravure « sèche » (définition à la section 3.3).

Une résine stabilisée par une cuisson forte est plus difficile à retirer, ce qui est bon pour la protection du substrat, mais peut s'avérer problématique pour l'étape de décapage du masque. Un second désavantage de la cuisson forte est que la résine peut se fragiliser au point où se fissurer, surtout dans le cas de résines épaisses. La formation de tels défauts peut être réduite en augmentant progressivement la température ou en abaissant lentement la tranche vers la plaque chauffante. La cuisson forte peut aussi mener à des parois courbées (« coins ronds »). [40], [41]

3.2.8 Photostabilisation après développement

La photostabilisation consiste à exposer la résine aux UV à température élevée après développement afin de [32] :

- corriger certains défauts de parois aux ouvertures;
- figer les profils et les dimensions des ouvertures;
- augmenter la sélectivité de la gravure en rendant la résine plus résistante à la gravure;
- rendre la résine plus stable thermiquement et donc réduire, voire éliminer les chances de faire brûler ou faire réticuler la résine lors de procédés à haute température.

Les photorésines positives qui contiennent un sensibilisateur de type DNQ comme celles utilisées dans le projet peuvent passer par une étape de photostabilisation. Comme mentionné à la section 3.2.1, lorsque ce type de photorésine est exposé à des rayons UV, le DNQ se reconfigure en cétène en libérant une molécule d'azote (N_2). Ensuite, s'il n'y a pas de molécules d'eau pour s'attacher au cétène, il se forme une liaison polymérique entre ce dernier et la résine. Ce composé insoluble permet à la résine d'être plus résistante à la gravure. Pour favoriser la formation de ces liaisons polymériques, la température peut être augmentée, ayant pour effet d'abaisser l'humidité dans l'air. Une élévation graduelle de la température pendant la photostabilisation permet de faire évaporer le solvant résiduel dans la résine sans déformer les motifs. [32]

Pour résumer les différences générées dans la composition chimique de la résine par la photostabilisation :

- le solvant résiduel est évaporé;
- les molécules de DNQ sont, en absence d'azote (N_2), reconfigurées en cétène;
- il y a présence de liaisons polymériques entre la résine et ces molécules de cétène.

3.3 Introduction sur la gravure et ses caractéristiques

La gravure constitue l'étape de retrait complet ou en partie d'un ou plusieurs composants spécifiques du système en cours de procédé. Lors d'une gravure, toute la surface d'un échantillon exposée à l'agent de gravure est sujette à être retirée. Pour effectuer la gravure de motifs spécifiques, un matériau qui subsiste au procédé de gravure recouvre la partie complémentaire aux motifs et porte le nom évident de « masque ». Différents types de masque sont utilisés en industrie et le choix du type utilisé affecte non seulement le procédé de gravure, mais aussi le résultat final de la gravure. Les masques en photorésine ont fait leurs preuves pour la structuration de microsystemes grâce à la photolithographie [18], [42], [43]. La combinaison de photolithographie et de gravure est vue comme un « transfert de motifs », puisqu'à la surface de la tranche, les motifs gravés dépendent de ceux du masque, comme illustré à la Figure 3.7.

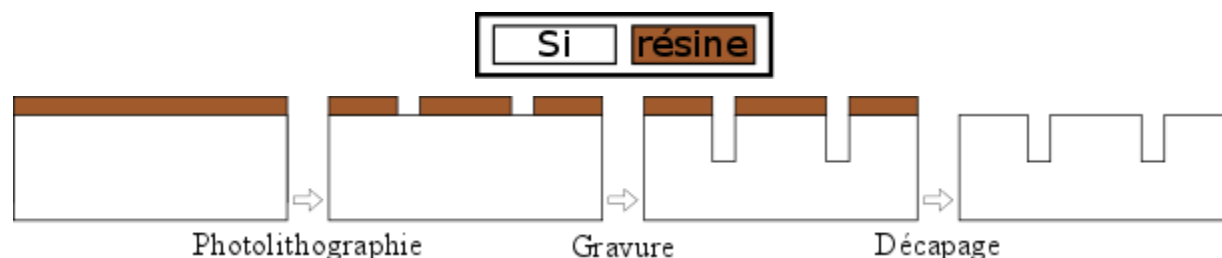


Figure 3.7 : Transfert de motifs.

Le décapage est une forme de gravure pour retirer un masque de résine. Certaines caractéristiques de la gravure peuvent faire différer les motifs gravés de ceux du masque.

Il existe un nombre élevé de méthodes de gravure catégorisées en fonction de la nature des réactions utilisées : chimique, physique et physico-chimique. Lorsque l'agent de gravure utilisé est sous forme de solutions réactives, la gravure est dite humide (section 3.4); sinon elle est dite sèche (exemple : gravure au plasma, section 3.5) [18]. La méthode de gravure est techniquement choisie en fonction de la nature de ce qui doit être gravé, de la nature de ce qui protège ce qui ne doit pas être gravé (i.e. celle du masque) et des caractéristiques structurales désirées.

Cette section traite des caractéristiques qui distinguent les procédés de gravure. Le Tableau 3.1 représente une synthèse de caractéristiques de gravure, suivies chacune d'une courte description.

Pour des fins pratiques, une gravure dite humide est considérée, dans le cadre de ce mémoire, implicitement chimique. Dans la littérature, le terme « spontané » est aussi utilisé pour parler d'une gravure chimique [18].

Tableau 3.1 : Courtes descriptions de caractéristiques de gravure.

Caractéristiques	Courte description	Section
Contrôlabilité d'arrêt	Fidélité au critère d'arrêt de gravure (ou de fin d'attaque)	3.3.1
Degré d'anisotropie	Directionnalité de la gravure	3.3.2
Produits de gravure	Résidus formés	3.3.3
Profil de surface	Qualité de la surface et des parois	3.3.4
Facteur de forme	Rapport de la profondeur sur la largeur	3.3.5
Reproductibilité	Capacité à graver de la même façon peu importe la tranche	3.3.6
Sélectivité	Rapport des taux de gravure entre deux matériaux (le matériau à graver et son masque par exemple)	3.3.7
Topographie de gravure	Forme finale de la structure gravée	3.3.8
Taux de gravure	Vitesse de retrait de la matière	3.3.9
Uniformité sur la tranche	Capacité à graver de la même façon peu importe l'endroit sur une même tranche	3.3.10

3.3.1 Contrôlabilité d'arrêt

La contrôlabilité d'arrêt est définie ici comme la capacité d'un procédé à s'arrêter à une profondeur donnée. Une bonne contrôlabilité d'arrêt nécessite un bon critère d'arrêt de gravure (synonyme de fin d'attaque). Plusieurs méthodes d'arrêt peuvent être utilisées. Par exemple [26, p. 257] :

- Évaluation d'un temps fixe;
- Utilisation d'une couche d'arrêt de haute sélectivité;
- Utilisation d'un système de détection de fin d'attaque.

Il est possible, après des tests, de déterminer un temps après lequel la gravure doit être arrêtée et de fixer ce temps pour toutes les tranches à graver [26, p. 257]. La nature du procédé de gravure

peut par contre influencer sa reproductibilité (section 3.3.6) et donc, la contrôlabilité d'arrêt établie de cette façon.

Il existe un autre moyen plus efficace d'augmenter la contrôlabilité d'arrêt, mais qui ne fonctionne que dans le cas où toute l'épaisseur de la cible doit être retirée. Il s'agit de placer une couche d'inhibition, c'est-à-dire de haute sélectivité, au niveau de la profondeur désirée, comme l'illustre la Figure 3.8.



Figure 3.8 : Exemple d'arrêt de gravure par une couche enterrée de haute sélectivité.

De ce fait, le taux de gravure est réduit au niveau de cette couche de haute sélectivité et donc, il est possible d'atteindre une contrôlabilité d'arrêt élevée [26, p. 257].

De surcroît, il existe des systèmes de détection de fin d'attaque qui permettent de savoir quand arrêter la gravure. Par exemple, par l'identification des produits de gravure qui changent en fonction du matériau exposé (spectrométrie) [18], [26, p. 257].

3.3.2 Degré d'anisotropie

L'anisotropie est la dépendance à la direction. Par exemple, la dilatation thermique d'un corps qui se fait préférentiellement selon une direction est un phénomène anisotrope. À l'inverse, un phénomène isotrope ne dépend pas de la direction. C'est le cas par exemple du mouvement de diffusion d'un corps dans un espace vide. Le degré d'anisotropie d'une gravure d_{aniso}° caractérise le rapport du taux de gravure horizontal v_x par rapport au taux de gravure vertical v_y selon l'équation (3.11). L'abscisse et l'ordonnée sont placées de telle sorte que le taux de gravure maximal instantané est vertical ($v_y \geq v_x$) [18], [42]. Le degré d'anisotropie est adimensionnel.

$$d_{aniso}^{\circ} := 1 - \frac{v_x}{v_y} \quad (3.11)$$

Puisque par définition $v_y \geq v_x$, alors $d_{aniso}^{\circ} \in [0, 1]$. Selon la valeur de d_{aniso}° , la gravure est considérée anisotrope ou isotrope :

- $v_x = 0 \Rightarrow d_{aniso}^{\circ} = 1 \Rightarrow$ gravure totalement anisotrope;
- $v_x = v_y \Rightarrow d_{aniso}^{\circ} = 0 \Rightarrow$ gravure isotrope.

La Figure 3.9 illustre des structures de différents degrés d'anisotropie.

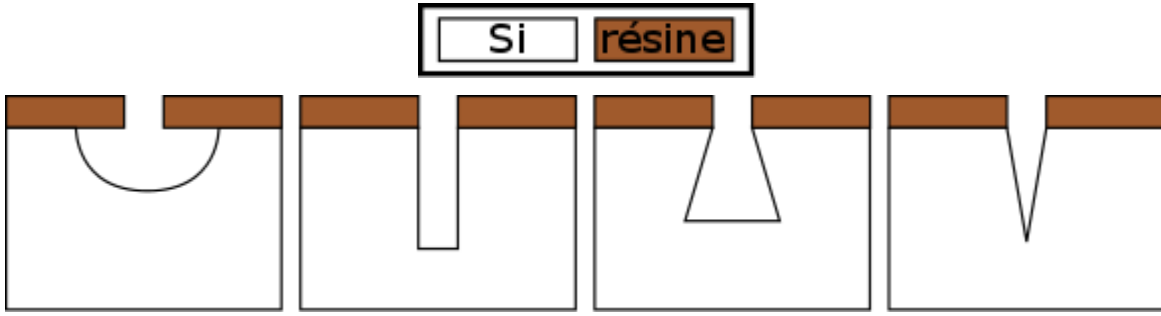


Figure 3.9 : Structures de différents degrés d'anisotropie (de gauche à droite : 0, 1,]0,1[,]0,1[).

Généralement, les gravures humides, gouvernées par l'attaque d'espèces réactives neutres, sont considérées isotropes du fait de leur mouvement de diffusion, mais d'autres dépendent des plans cristallins du matériau gravé et sont donc anisotropes [18], [42]–[44].

Plusieurs facteurs influencent le degré d'anisotropie, notamment : l'énergie des espèces non-réactives responsables de dommages mécaniques, le dépôt d'une couche d'inhibition de gravure et le dopage du matériau gravé [26, p. 185–189]. La gravure au plasma permet de contrôler le degré d'anisotropie en jouant sur divers paramètres qui influencent les propriétés du plasma et son interaction avec la surface à graver (voir section 3.5).

3.3.3 Produits de gravure

Les produits de gravure sont les résidus de l'interaction entre l'agent de gravure et le matériau gravé et dépend intrinsèquement de la nature de ces deux derniers. Pour effectuer une gravure, il faut autant que possible que ces résidus soient volatils pour qu'ils se retirent de la surface à graver. Dans certains cas, les produits de gravure peuvent ne pas être volatils ou être de nature

polymérique et se redéposer sur la surface, sur les parois de la structure gravée ou encore sur les parois du réacteur de gravure. [18], [42], [45]

3.3.4 Profil de surface

Le profil de surface est décrit dans ce mémoire comme l'état visuel de la surface gravée, comme sa rugosité. Par exemple, à la section 4.1.2.5, il est question d'ondulations topographiques (« scallops »), ou encore à la section 4.1.2.9, de « micro-herbage ».

3.3.5 Facteur de forme

Le facteur de forme AR représente un rapport entre la profondeur p d'une structure gravée (qui inclue le masque) et son ouverture Φ (sa largeur ou son diamètre) [42] :

$$AR := \frac{p}{\Phi} \quad (3.12)$$

Le facteur de forme influence les caractéristiques de la gravure, notamment le taux de gravure et le degré d'anisotropie. Une gravure anisotrope implique un changement du facteur de forme à mesure que la gravure progresse et affecte donc les caractéristiques de gravure en fonction du temps. Dans la littérature, cet effet porte l'acronyme ARDE (gravure dépendante du facteur de forme, traduction libre de « Aspect Ratio Dependant Etching ») dans le cas d'une gravure ionique réactive pour lequel sa vitesse diminue pour un facteur de forme qui augmente (section 4.1.2.7).

3.3.6 Reproductibilité

La reproductibilité d'un procédé de gravure est la capacité de l'équipement utilisé à reproduire les mêmes résultats peu importe la tranche. Sous les mêmes conditions de gravure, avec le même type de tranche à graver et le même équipement, le procédé avec une reproductibilité idéale est totalement indépendant du nombre de tranches qui sont gravées précédemment. En l'occurrence, dans un réacteur de gravure ionique réactive profonde, la reproductibilité est influencée par le dépôt de polymères sur les parois du réacteur qui consomment les espèces réactives du plasma utiles à la gravure (phénomène de « macroloading »). Dans ce cas, un nettoyage régulier des parois du réacteur est de mise pour améliorer la reproductibilité. [18], [45]

3.3.7 Sélectivité

La sélectivité S est le rapport entre le taux de gravure d'un matériau v_g (par exemple, celui à graver) et un autre v_m (son environnement, le masque) par le même précédé de gravure [42] :

$$S = \frac{v_g}{v_m} \quad (3.13)$$

La notion de sélectivité est utilisée particulièrement pour le transfert de motifs. En effet, le masque utilisé doit, de préférences, être sélectif (plus résistant) par rapport au matériau à graver, afin de protéger adéquatement les parties complémentaires aux motifs du design. Une meilleure sélectivité est atteinte lorsque $v_g \gg v_m$ et donc $S \gg 1$. D'ailleurs, une haute sélectivité est un des avantages de la gravure chimique. [18], [42], [43]

3.3.8 Topographie de gravure

La topographie de gravure est la forme structurale obtenue. En vue de coupe (de profil), elle peut par exemple avoir la forme d'un demi-cercle (gravure isotrope), d'un rectangle (gravure anisotrope) ou encore avoir une forme qui varie avec la profondeur, comme illustrées à la Figure 3.9. Un profil en « V », dont la largeur diminue en profondeur, est un profil dit « positif », alors qu'un profil en « A », dont la largeur augmente en profondeur, est un profil dit « négatif ». D'ailleurs, un profil en « V » facilite le remplissage d'une structure, mais peut mener à un étouffement (arrêt) de la gravure. [42], [43]

La topographie de gravure peut se distinguer du design souhaité des microsystèmes notamment par des phénomènes parasites qui déforment la structure. « L'undercut » et le « bowing » sont des exemples de défauts topographiques et sont expliqués dans le cadre des défis lors de formation des TSV à la section 4.1.2.

3.3.9 Taux de gravure

Le taux de gravure moyen v_g est la vitesse à laquelle une épaisseur de matière z est retirée dans un temps donné t : équation (3.14).

$$v_g := \frac{z}{t} \quad (3.14)$$

Elle est généralement exprimée en nm/min ou en Å/min [18], [43]–[46] et est principalement influencée par la nature de l’agent de gravure et celle de la cible. Les industries tentent de trouver les taux de gravure les plus hauts possibles, car ceci implique une économie de temps plus important pour les industries en microfabrication. Toutefois, il faut considérer que le taux de gravure instantané ($t \rightarrow 0$) change en fonction du temps de gravure, notamment à cause des produits de gravure, des défauts induits et du changement du facteur de forme [18].

3.3.10 Uniformité sur la tranche

Dans le cadre de ce mémoire, l’uniformité d’une gravure est la capacité de celle-ci à reproduire les mêmes résultats peu importe où sur une tranche. Par exemple, les gravures ioniques réactives ne gravent généralement pas de la même façon et à la même vitesse sur le bord qu’au centre de la tranche étant donné l’inhomogénéité des espèces au sein du plasma et la non-directionnalité des ions causée par la courbure de la « gaine » (section 3.5.4.4) entre le plasma et la tranche [26, p. 177], [42].

L’équation (3.16) permet de calculer l’uniformité de gravure U sur une tranche.

$$U = 1 - \frac{\max(p_i) - \min(p_i)}{\max(p_i) + \min(p_i)} \quad (3.15)$$

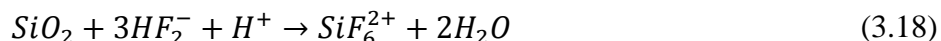
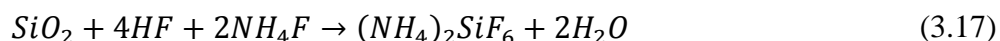
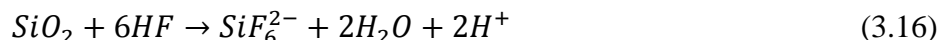
Où les opérateurs $\max()$ et $\min()$ correspondent respectivement au maximum et au minimum des profondeurs p_i . Les profondeurs p_i doivent correspondre à différents endroits sur la tranche.

3.4 Gravure humide

Dans le cadre du projet, la gravure humide n’est utilisée que dans le cadre du retrait d’oxyde de silicium et de nettoyages. La présente section se restreint aux solutions utilisées dans le cadre du projet.

Les étapes de retrait d’oxyde de silicium sont effectuées dans une solution de BOE (solution de gravure d’oxyde tamponnée). Cette solution est composée de HF et de NH_4F . Bien que le HF lui-même seul permet la gravure d’une couche de SiO_2 par la réaction (3.16), le NH_4F est ajouté afin de

maintenir constante la concentration de H^+ (pH constant) et d'ions fluorhydriques dans la solution pour des caractéristiques de gravure stables. La gravure humide du SiO_2 par une solution de BOE est gouvernée par les réactions suivantes [26, p. 245, 250] :



Pour le projet, le nettoyage des tranches est effectué grâce à un procédé régulier d'Excelitas confidentiel qui n'est pas présenté dans ce mémoire.

3.5 Gravure au plasma

La gravure au plasma se distingue des autres types de gravure notamment par la nature de ses interactions avec la surface d'un solide qui peut être à la fois chimique et physique. Cette nature provient de la composition particulière du plasma et varie en fonction du système et des paramètres posés [44]. Cette liberté de modifier la nature de la gravure permet un contrôle directionnel qui peut mener à l'obtention de profils de gravure droits, même à l'échelle submicronique et constitue d'ailleurs l'avantage principal de la gravure au plasma par rapport à la gravure humide [18]. Par exemple, la taille des puces fabriquées peut être réduite grâce à l'usage des parois verticales, comparativement aux méthodes habituelles de gravure humide anisotrope qui donnent des parois qui peuvent être inclinées à cause de leur forte dépendance à l'orientation des plans cristallins [43].

Cette section traite d'abord de la définition d'un plasma et des interactions entre les électrons et les molécules de gaz qui permettent de le générer, puis des interactions entre le plasma et la surface d'un matériau à graver. L'emphasis est mise ensuite sur l'aspect pratique dans l'industrie de la microfabrication et donc sur les systèmes exploitant les interactions discutées dans le cadre de deux méthodes physico-chimiques :

- gravure ionique réactive (ou RIE pour « Reactive Ion Etching »);
- gravure ionique réactive profonde (ou DRIE pour « Deep Reactive Ion Etching »).

Finalement, cette section termine sur les paramètres de ces deux méthodes et leurs influences sur les caractéristiques structurales obtenues. Un plan de la section est schématisé à la Figure 3.10.

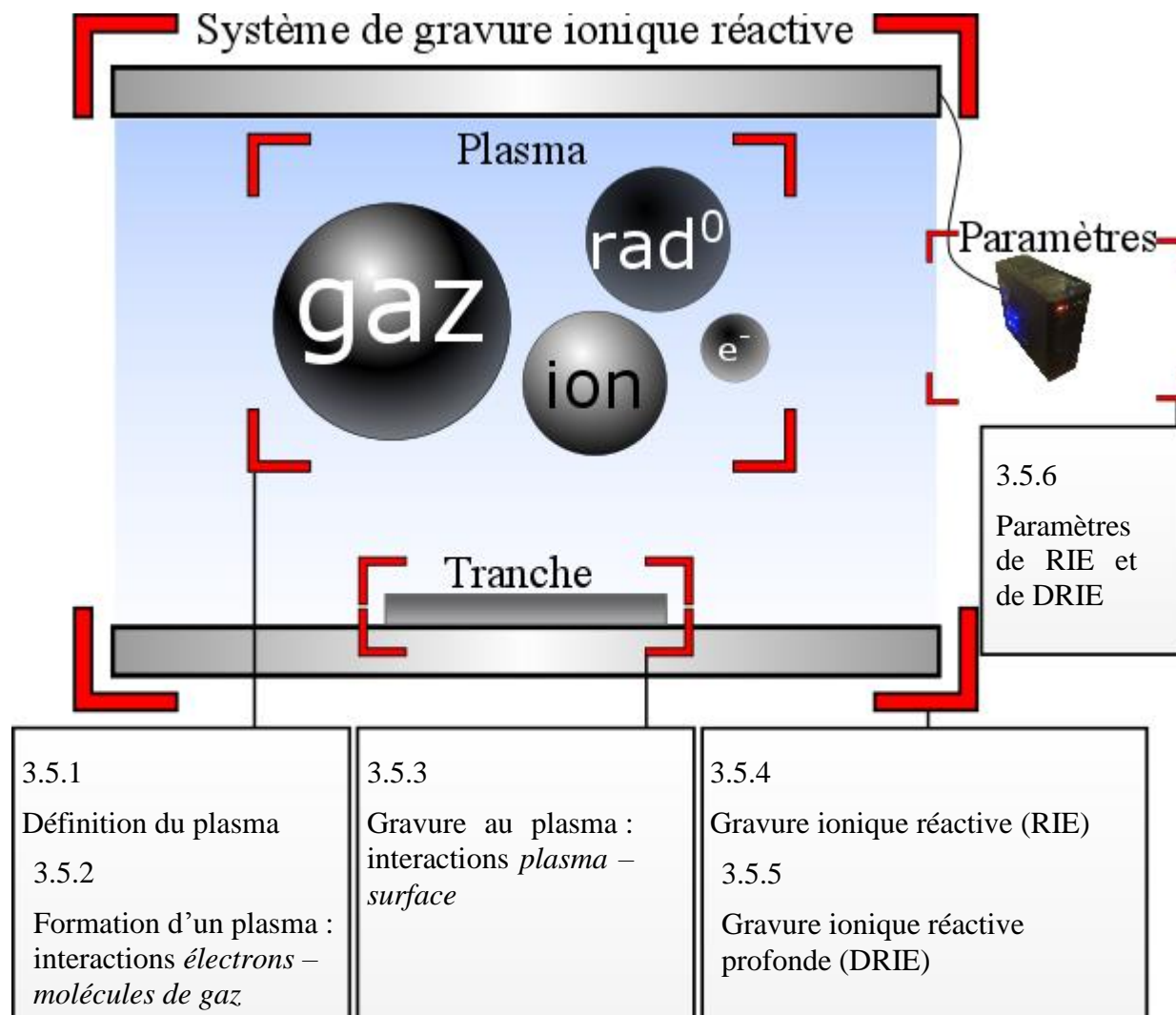


Figure 3.10 : Plan schématique de la section sur la gravure au plasma.

3.5.1 Définition du plasma

Le plasma est considéré comme le quatrième état de la matière et est constitué de 4 composants de masse : molécules (neutres), radicaux libres (espèces neutres réactives), ions (atomiques ou moléculaires) et électrons. Il est à l'origine un gaz qui, soumis à une source d'excitation externe, se retrouve suffisamment ionisé pour que son comportement diffère de celui d'un gaz neutre [42], mais qui reste électriquement neutre à cause du nombre égal de charges négatives et de charges positives. Bien que le plasma constitue 99% de l'univers, la nature instable de ses composants

font que sur Terre, sa présence naturelle se restreint à peu de phénomènes comme la foudre et les aurores boréales [18]. On peut toutefois le retrouver sous forme artificielle pour de nombreuses applications comme l'éclairage (écrans à plasma et lampes néon par exemple), le dépôt de couches minces (exemple : PECVD, section 3.1.3), la gravure de microsystemes, etc. [47]

Les caractéristiques d'un plasma sont présentées en Annexe B.

3.5.2 Formation d'un plasma : interactions *électrons – molécules de gaz*

Un plasma est généré lorsque des molécules d'un gaz sont frappées par des électrons d'énergie suffisamment élevée sous l'influence d'un champ électrique. Les trois principaux types d'interaction entre les électrons et les molécules du gaz qui provoquent la formation d'un plasma de gravure sont : l'ionisation, l'attachement électronique et la dissociation [45]. Ces interactions sont illustrées à la Figure 3.11 et définies par la suite [45], [48], [49], suivant des exemples avec le plasma SF_6 [50, p. 162, 405].

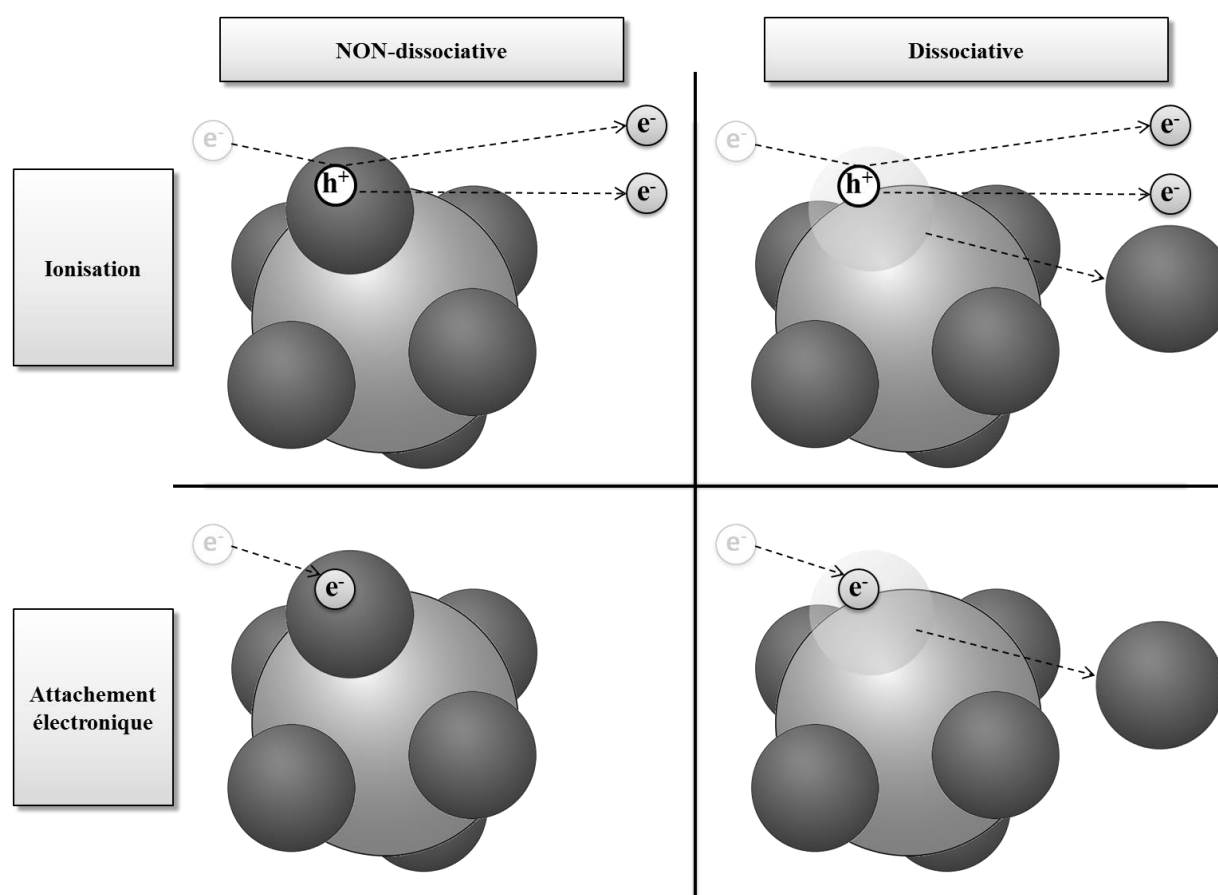


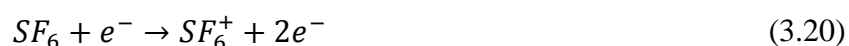
Figure 3.11 : 4 interactions possibles entre un électron et une molécule de gaz.

Dans les équations chimiques qui suivent, la lettre « M » désigne une molécule ou un atome de gaz quelconque. Le plasma SF_6 est choisi comme exemple étant donné son utilisation dans le projet de maîtrise et sa popularité en gravure du silicium pour la grande volatilité de la molécule SiF_4 formée [43].

1. Ionisation



Exemple :



L'ionisation est le cas pour lequel l'électron arrache un électron de la molécule et rend cette dernière positive. Pour que la réaction se produise, l'électron doit avoir une énergie supérieure ou égale à l'énergie d'ionisation de la molécule. Le nouvel électron libre peut aussi contribuer à la formation du plasma.

2. Attachement électronique



Exemple :



L'attachement électronique est l'interaction pour laquelle la molécule capture l'électron et devient un ion négatif. Les ions négatifs ne participent pas autant à la gravure que les ions positifs pour des raisons évoquées à la section 3.5.4.4.

3. Dissociation



Exemple d'ionisation dissociative :



Exemple d'attachement électronique dissociatif :



Une interaction de dissociation est une séparation d'une molécule en deux qui permet la génération d'ions et de radicaux libres. Ces radicaux libres, identifiés ici par l'exposant 0, sont des espèces très réactives du plasma : leur instabilité chimique les force à réagir rapidement avec la matière en vue de retrouver un état stable. C'est pourquoi ils participent grandement à la chimie d'une gravure au plasma (section 3.5.3.1).

Les radicaux libres se retrouvent en plus grand nombre que les ions étant donné que leur temps de vie est plus long et que l'ionisation est souvent dissociative (mène à un radical libre) [26, p. 179]. La pression du gaz doit être suffisamment élevée pour générer un nombre élevé de collisions, mais pas trop élevée pour ne pas trop abaisser le libre parcours moyen des constituants. En effet, un libre parcours moyen élevé permet aux constituants d'acquérir une énergie plus élevée avant impact et donc de mieux contribuer à la formation du plasma [49].

3.5.3 Gravure au plasma : interactions *plasma – surface*

La gravure au plasma est un procédé permettant de graver à la fois par réactions chimiques dues à l'adsorption des espèces réactives du plasma et physiquement (ou mécaniquement) à l'aide de bombardements ioniques. La gravure est provoquée lorsque les radicaux libres et ions du plasma interagissent avec la surface d'un matériau.

Cette section se restreint uniquement aux interactions entre un plasma et la matière qui mènent directement à la gravure.

3.5.3.1 Interactions radicaux libres – surface et synergie ions – radicaux

Le principe fondamental de la gravure chimique par un plasma est la transition de l'état solide de la matière vers l'état gazeux amorcée principalement par l'adsorption des radicaux libres, même si les ions peuvent aussi y contribuer [18]. Trois étapes sont requises pour engendrer la gravure chimique suite au contact entre les radicaux libres et la surface d'un matériau : adsorption, formation d'un produit de gravure volatil et désorption de ce produit. La présence d'ions catalyse ces réactions grâce à une synergie *ions – radicaux*. Ces réactions sont présentées à la Figure 3.12 et expliquées par la suite.

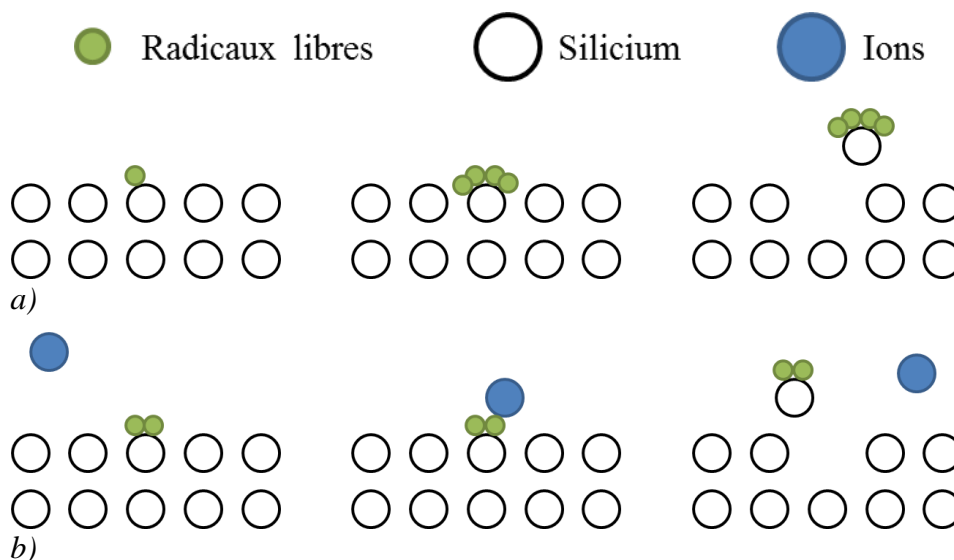


Figure 3.12 : Gravure par radicaux libres a) sans assistance par les ions et b) avec assistance par les ions. De gauche à droite : adsorption, formation d'un produit de gravure volatil, désorption.

1. Adsorption

L'adsorption est l'adhérence de radicaux libres à la surface. Elle est facilitée lorsqu'un grand nombre de sites d'adsorption s'y retrouvent. Ce nombre de sites d'adsorption peut augmenter suite au bombardement d'ions de haute énergie qui produisent des aspérités surfaciques à l'échelle atomique ou qui retirent par pulvérisation une couche non-volatile inhibitrice, libérant des liaisons pendantes. [44], [48]

2. Formation d'un produit de gravure volatil

Suite à l'adsorption, des liaisons atomiques se créent entre les radicaux libres et les atomes de la surface pour former une molécule. Si les conditions ambiantes le permettent, cette molécule est apte à transiter vers l'état gazeux et donc à subir la désorption. Dans certains cas, la formation de ces molécules à l'état gazeux peut être catalysée par le bombardement ionique en réduisant l'énergie d'activation des réactions chimiques. [26, p. 179], [44], [48]

3. Désorption

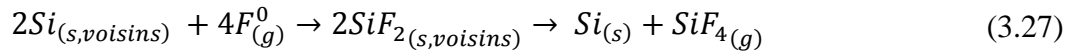
À l'inverse de l'adsorption, la désorption est le retrait d'une substance à la surface : le produit de gravure volatil, c'est-à-dire la molécule formée à partir des radicaux et des atomes surfaciques, se déloge de la surface et diffuse. Les ions peuvent faciliter, voir amorcer la désorption par collisions avec la molécule restée ou redéposée en surface. [44], [48]

Le choix de la composition chimique du gaz pour une gravure au plasma est fait en partie en fonction de la volatilité des produits de gravure [51]. Par exemple, pour la gravure de silicium, les gaz à base de fluor sont préférés étant donné la haute volatilité de la molécule SiF_4 formée [43]. Voici un exemple de gravure chimique par radicaux libres : *plasma* SF_6 – *surface* Si [18].



Les indices (s), (g) correspondent respectivement aux états solide et gazeux.

Dans cet exemple, il n'est pas nécessaire que les quatre radicaux libres soient adsorbés au même atome de Si. Le produit volatil (SiF_4 , mais peut aussi être du SiF_2 [52]) peut aussi être formé dans le cas où deux atomes de Si voisins sont fluorés par deux radicaux libres chacun [18] :



De surcroît, comme mentionné à la fin de la description de chaque étape d'interactions décrites précédemment pour une gravure chimique par les radicaux libres, il existe une synergie *ions – radicaux* qui accélère la gravure au plasma. Cette synergie a été démontrée dans l'expérience de Coburn et Winters publiée en 1979 [53] en séparant les trois natures de la gravure sèche : chimique, physico-chimique et physique. L'expérience a démontré que la synergie entre les ions et les radicaux libres dans la gravure au plasma mène à un taux de gravure 10 à 30 fois supérieur à celui d'une gravure sèche strictement chimique ou physique [18].

3.5.3.2 Interactions *ions – surface*

Les radicaux libres ne sont pas les seuls à pouvoir engendrer une gravure chimique : les ions de faible énergie agissent comme espèces réactives et peuvent aussi être adsorbés. À haute énergie, les ions pulvérisent le matériau et provoquent plutôt une gravure de nature physique.

Le caractère physique (ou mécanique) de la gravure plasma est explicitement gouverné par les ions qui interagissent avec la surface d'un matériau et qui brisent de façon purement mécanique les liaisons atomiques. Toutefois, les ions peuvent aussi contribuer chimiquement à la gravure, soit par catalyse des réactions entre les radicaux libres et la surface (section précédente : 3.5.3.1) ou par adsorption à la surface. La nature de l'interaction entre les ions et la matière dépend de l'énergie cinétique des ions (énergie de bombardement; voir Figure 3.13) [54].

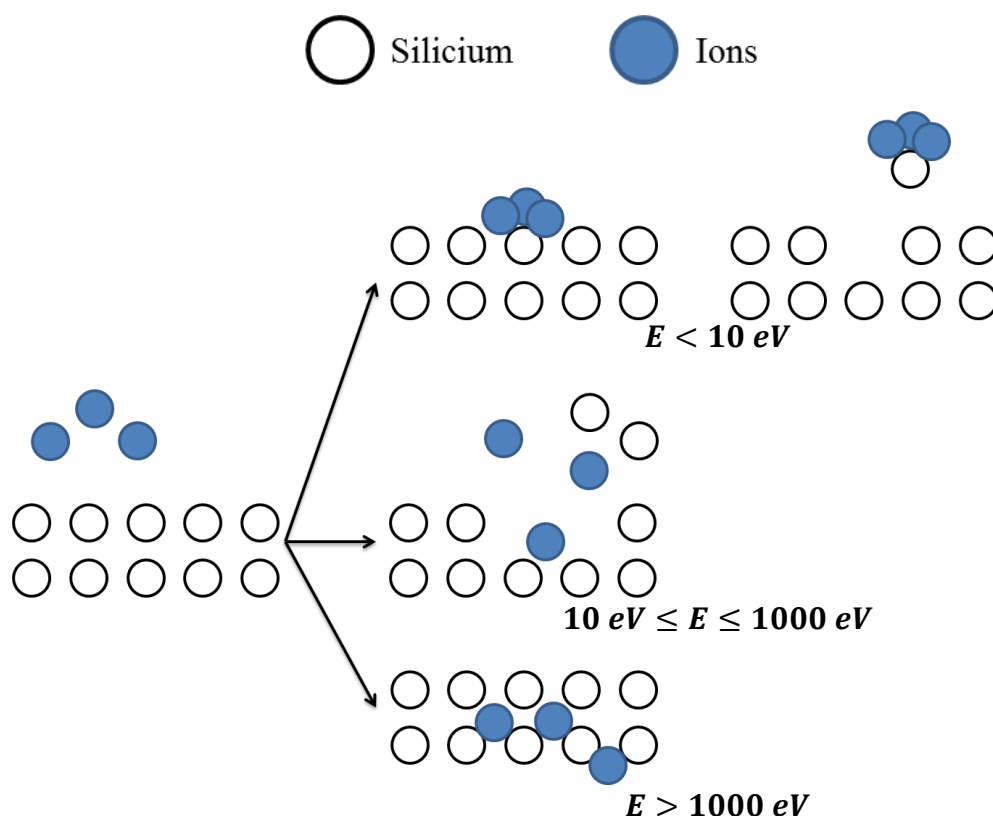


Figure 3.13 : Interactions *ions – surface* pour différents intervalles d'énergie des ions.

1. Ions de faible énergie ($E < 10 \text{ eV}$)

À la surface d'un matériau, les ions agissent comme des espèces réactives, de façon similaire à des radicaux libres, et peuvent participer à la gravure chimique. Le principe de gravure répond alors aux mêmes lois qu'énoncées à la section 3.5.3.1.

2. Ions d'énergie élevée ($10 \text{ eV} \leq E \leq 1000 \text{ eV}$)

Une énergie suffisante permet aux ions de briser les liaisons atomiques à la surface et de provoquer la gravure physique. Comparativement à la gravure chimique, la gravure physique est généralement très peu sélective et plus lente [44].

3. Ions d'énergie très élevée ($E > 1000 \text{ eV}$)

Dans le cas d'ions d'énergie trop élevée, la surface devient « invisible » au sens où ceux-ci passent au travers et se logent dans les interstices du matériau. L'utilisation d'ions très énergétiques est d'ailleurs une approche utilisée pour le dopage de matériaux par implantation ionique.

À haute pression, la nature de la gravure par plasma est davantage chimique que physique à cause de l'énergie des ions qui est réduite par les collisions. Par contre, à basse pression ou sous l'influence d'une source d'excitation électromagnétique suffisamment puissante, les ions ont une énergie plus élevée. On parle dans ce dernier cas de gravure ionique réactive (RIE, section 3.5.4), dont une des variantes est la gravure ionique réactive profonde (DRIE, section 3.5.4).

3.5.4 Gravure ionique réactive (RIE)

La RIE est une variante physico-chimique de gravure au plasma pour laquelle une différence de potentiel entre un gaz et le matériau à graver est générée pour faire intervenir efficacement des ions dans la gravure.

3.5.4.1 Configuration CCP (plasma à couplage capacitif) typique d'un système de RIE

Dans les systèmes typiques de RIE (Figure 3.14) configurés en CCP (plasma à couplage capacitif), un gaz se change en plasma par couplage capacitif grâce à deux plaques métalliques parallèles qui sont placées de part et d'autre du réacteur et qui font office d'électrodes. Une d'elle, l'anode, est mise à la masse ($V = 0$). L'autre, la cathode, plus petite en surface (voir la raison en Annexe C), est branchée à un générateur RF par l'entremise d'un système capacitif représenté à la Figure 3.14 comme une simple capacité (condensateur de blocage). Le choix des termes « anode » (+) et « cathode » (-) provient de la différence de tension mutuelle engendrée lors de la RIE, expliquée plus bas. Les parois du réacteur sont mises à la masse et la tranche à graver est maintenue simplement par gravité ou par force mécanique ou électrostatique [43] sur l'électrode alimentée par le circuit RF. Dans ce mémoire, cette électrode alimentée par un circuit RF, la cathode, est aussi appelée « plateau ».

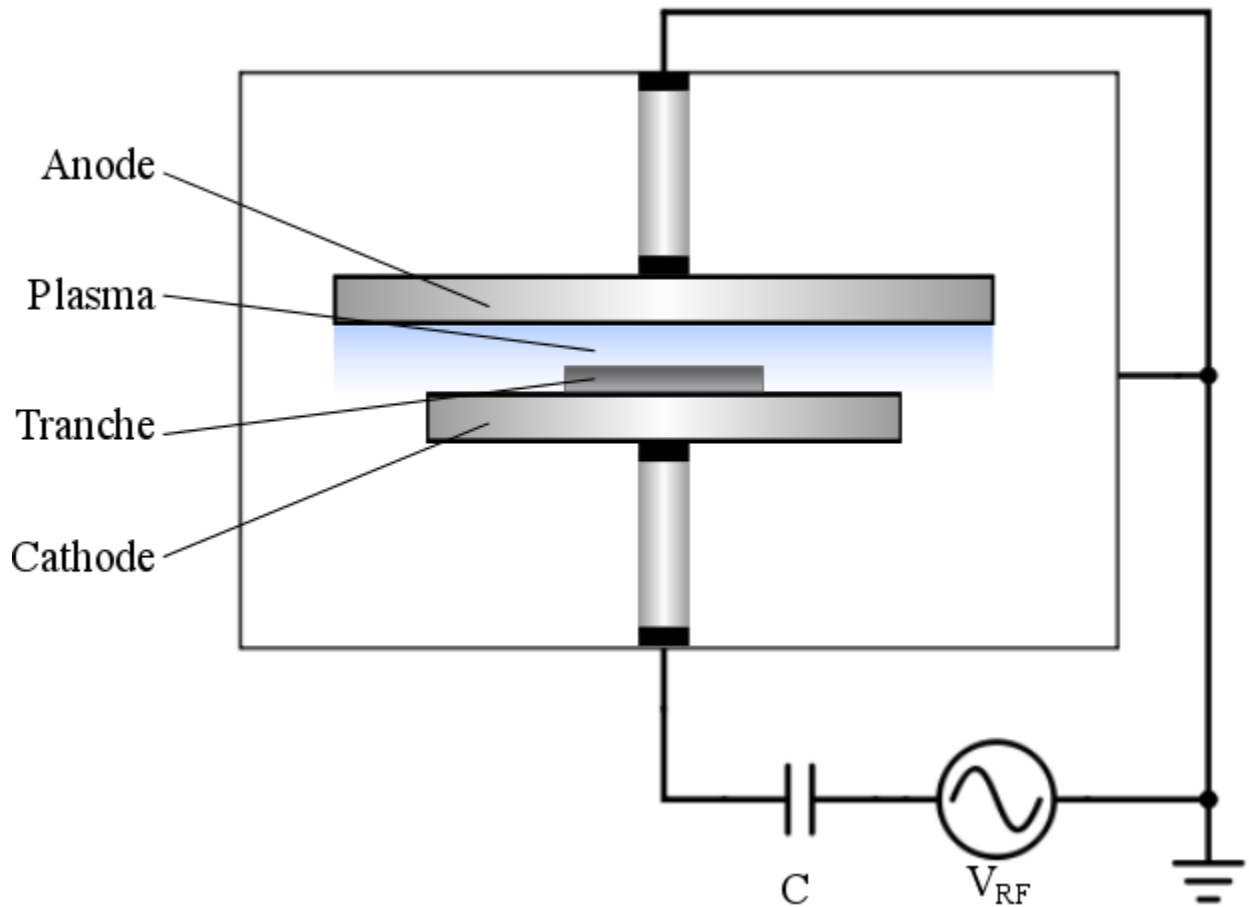


Figure 3.14 : Schéma simplifié de la configuration CCP d'un réacteur de RIE typique.

Dans le but d'alléger le schéma, certains composants mécaniques (pompe, débitmètres, gauge de pression, vannes, etc.) ne sont pas présentés à la Figure 3.14.

Au départ, alors que le générateur RF n'est pas encore activé, la tension à la cathode $V_{plateau}$ est nulle (celle à l'anode reste toujours nulle étant donné sa mise à la masse). Lorsque les gaz sont dans la chambre à pression stable, le générateur RF est activé et engendre une tension sinusoïdale V_{appl} . La tension $V_{plateau}$ grimpe alors initialement de la même façon que V_{RF} , étant donné que le condensateur de blocage laisse passer le courant alternatif. Ceci génère dans la chambre un champ électrique qui, pour les raisons décrites à la section 3.5.1, ionise (partiellement) le gaz qui devient un plasma. À polarité positive ($V_{plateau} > 0$), les électrons du plasma sont attirés vers le plateau et chargent la tranche négativement (à condition que celle-ci ne soit pas conductrice). À polarité négative ($V_{plateau} < 0$), ce sont les ions qui sont attirés vers la tranche et qui sont responsables de la gravure physique. [55]

3.5.4.2 Tension d'autopolarisation

Les porteurs de charge (électrons et ions) qui arrivent au plateau sont arrêtés par le condensateur de blocage branché en série qui bloque tout flux de courant continu. Puisque les électrons sont plus mobiles que les ions (rapport de masse élevé), la majorité des charges qui arrivent au plateau pendant les premiers cycles RF sont les électrons. Ceci mène à une accumulation progressive d'électrons au plateau, générant une tension négative dite d'autopolarisation. Au fur et à mesure que les cycles RF se poursuivent, de moins en moins d'électrons sont attirés vers le plateau, mais de plus en plus d'ions le sont, respectivement à cause de la répulsion et l'attraction coulombiennes.

En revanche, le condensateur de blocage est considéré comme un circuit fermé devant un courant alternatif. La tension au plateau $V_{plateau}$ est donc égale à la tension appliquée au plateau V_{appl} , mais abaissée par une valeur égale à la tension absolue d'autopolarisation V_{auto} [46].

$$V_{plateau} = V_{appl} - |V_{auto}| \quad (3.28)$$

La tension au plateau est donc à la même fréquence que la tension appliquée, mais est décalée verticalement d'une valeur égale à la tension d'autopolarisation. Sa valeur crête-à-crête ne change pas. La Figure 3.15 met en évidence cet effet.

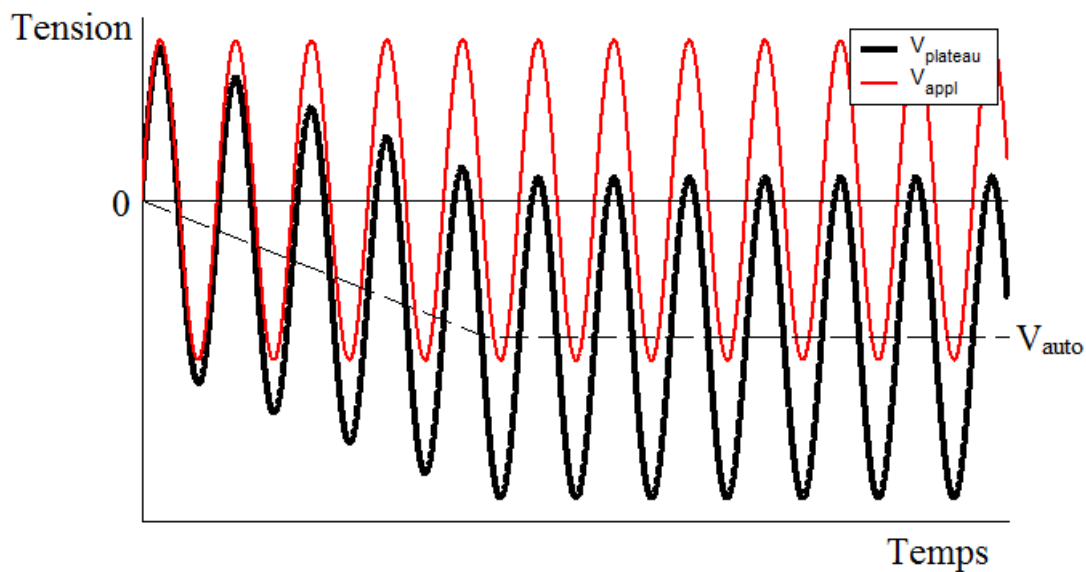


Figure 3.15 : Abaissement de la moyenne de tension au plateau par génération d'une tension d'autopolarisation durant les premiers cycles RF d'une tension appliquée (configuration CCP).

La décroissance de la tension d'autopolarisation n'est pas parfaitement linéaire comme illustrée sur la Figure 3.15, mais elle atteint effectivement une valeur finale V_{auto} .

Il ne faut que quelques cycles RF pour que la tension d'autopolarisation atteigne une valeur stable telle que, pendant un cycle RF complet, le flux d'électrons au plateau égale celui des ions [55]. Pour un système typique de RIE (section 3.5.4.1), cette valeur stable se calcule ainsi [26, p. 168] :

$$V_{auto} = \frac{k_B T_e}{2e} \ln \left(\left(\frac{T_e}{T_i} \right) \left(\frac{m_i}{m_e} \right) \right) < 0 \quad (3.29)$$

k_B : Constante de Boltzmann ($k_B = 8,617 \times 10^{-5} \text{ eV} \cdot \text{K}^{-1}$)

$T_{e,i}$: Température des électrons (e) ou des ions (i)

$m_{e,i}$: Masse des électrons (e; $m_e = 9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}$) ou des ions (i; dépend de la composition chimique du plasma)

e : Charge d'un électron ($e = -1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$)

Le plasma dans les réacteurs de gravure n'est pas à l'équilibre thermodynamique : les électrons sont toujours plus chauds que les ions (Annexe B; $T_e/T_i > 10$) et donc, le logarithme dans l'équation (3.29) n'est jamais négatif. Ceci confirme la compatibilité des mathématiques avec le critère physique que la tension d'autopolarisation est négative.

La tension d'autopolarisation joue un rôle important dans un procédé de RIE, puisque l'énergie des ions en est affectée directement (section 3.5.6.1).

3.5.4.3 Tension plasma

La tension au plateau et la tension appliquée partagent la même fréquence (Figure 3.15). Ceci est également le cas pour la tension au sein du plasma qui change en fonction du va-et-vient des électrons et ions, comme illustré à la Figure 3.16. Toutefois, celle-ci se distingue par sa plus faible amplitude et sa polarité toujours positive ($V_{plasma} > 0$). Dans la configuration CCP décrite précédemment, la moyenne temporelle de la tension plasma \bar{V}_{plasma} à l'équilibre s'approche ainsi [46] :

$$\bar{V}_{plasma} \approx \frac{\hat{V}_{appl} - |V_{auto}|}{2} \quad (3.30)$$

Où \hat{V}_{appl} est l'amplitude de la tension appliquée V_{appl} .

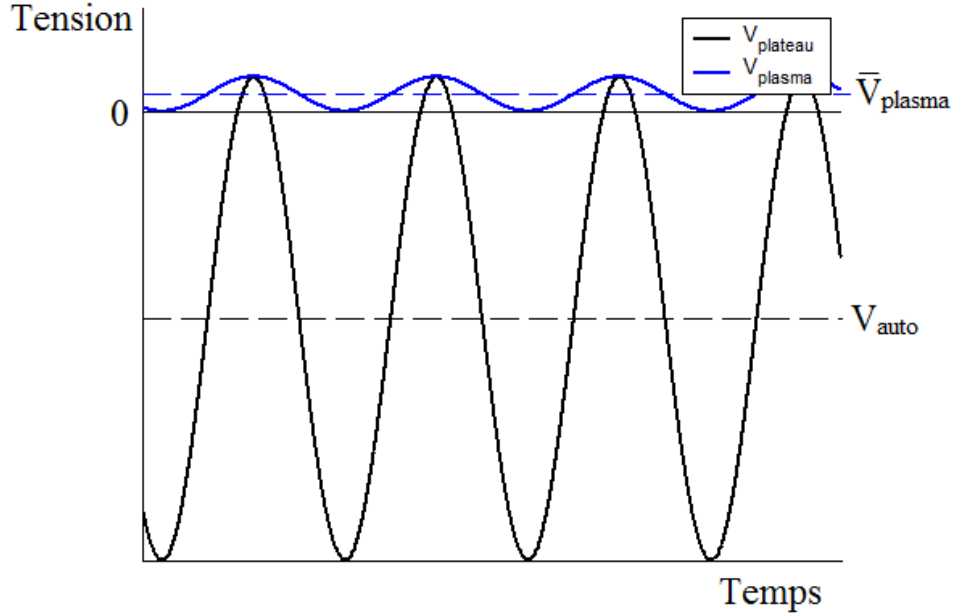


Figure 3.16 : Tension au plateau et tension plasma en fonction du temps dans un régime stable (configuration CCP).

3.5.4.4 Gaine

Près d'une surface de tension différente, la tension plasma ne varie plus de la même façon et l'équation (3.30) pour calculer sa moyenne \bar{V}_{plasma} n'est plus valable. Les zones près des surfaces portent le nom de « gaines » et se distinguent du reste du plasma notamment de par leur faible conductivité électrique causée par un déficit d'électrons [26, p. 170].

Lorsqu'un matériau d'un potentiel inférieur à celui du plasma (rappel : $V_{plasma} > 0$) entre en contact avec le plasma, les électrons et ions positifs du plasma sont respectivement repoussés et attirés vers la surface du matériau. Par contre, étant donné la mobilité supérieure des électrons, les ions restent plus longtemps dans la gaine. Par exemple, les murs d'un réacteur de RIE sont mis à la masse ($V = 0$) et sont donc séparés du plasma par une gaine.

L'effet est le même que dans le cas d'un isolant qui entre dans le plasma : les électrons et les ions chargent celui-ci, mais à cause de la différence des mobilités, la charge nette résultante est négative [26, p. 169], [45], [55]. Le cas de l'isolant se rapporte alors au cas précédent (matériau de potentiel inférieur à celui du plasma).

La gaine agit comme un milieu accélérateur des ions positifs, car plus ces derniers s'approchent d'une surface à tension négative, plus ils acquièrent de l'énergie cinétique [26, p. 169]. Ceci explique pourquoi :

- Les ions positifs contribuent efficacement à la gravure (accélérés et dirigés) [45], [53];
- Les ions négatifs participent difficilement à la gravure (repoussés) [56];
- La gaine n'est pas équipotentielle [26, p. 168], [46]; c'est là que se trouve le champ électrique qui accélère les ions (voir Figure 3.17).

La distribution du potentiel au sein d'une configuration CCP typique d'un système de RIE correspond à ce qui est illustré à la Figure 3.17.

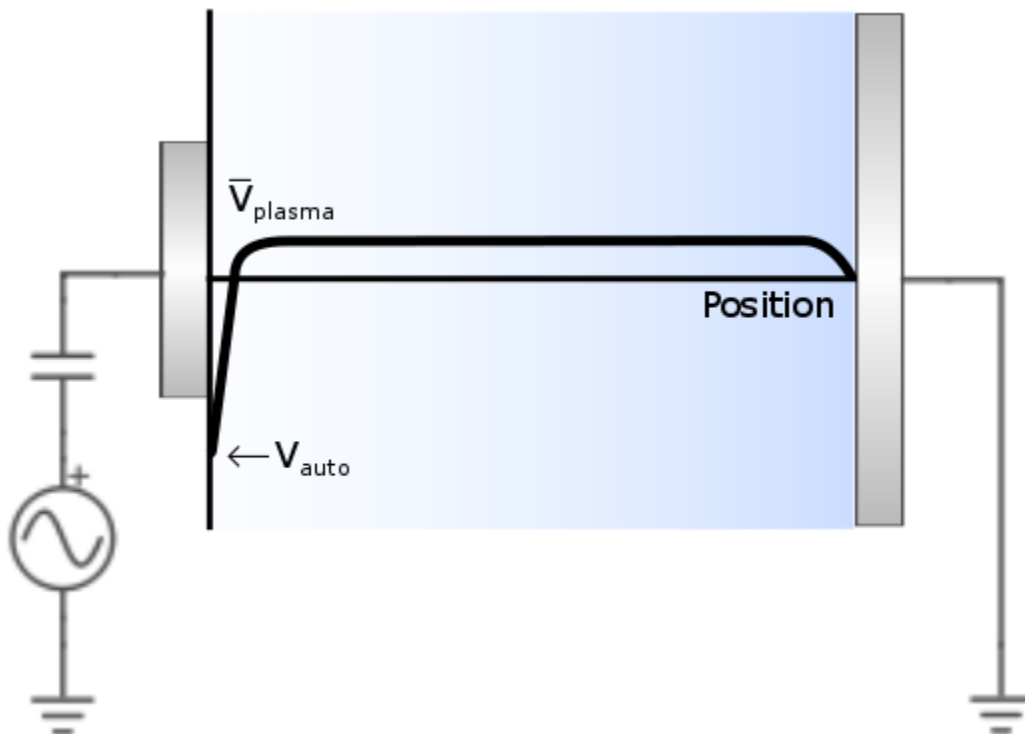


Figure 3.17 : Moyenne temporelle de la tension entre les électrodes d'une configuration CCP.

Inspirée de [26, p. 168], [46].

Le graphique de la Figure 3.17 est valable dans le cas idéal où les ions ne subissent aucune collision. La faible concentration d'électrons et les rares collisions dans la gaine résultent en peu de phénomènes d'excitation, responsables de l'émission de photons, donc celle-ci apparaît sombre. C'est d'ailleurs pourquoi dans la littérature, le terme « région sombre » (traduction libre de « dark space ») est parfois utilisé pour représenter la gaine [26, p. 169], [55].

En ce qui concerne l'anode et les parois du réacteur de RIE, celles-ci sont aussi séparées du plasma par une gaine. Les ions (positifs) sont donc aussi accélérés et peuvent alors les endommager. Une façon de réduire cet effet consiste à utiliser des électrodes de tailles différentes : avec une cathode (plateau) plus petite que l'anode (voir Annexe C).

En pratique, l'épaisseur de la gaine qui accélère les ions présente une inhomogénéité qui perturbe la trajectoire des ions qui la traversent. En outre, la topographie de surface de la tranche elle-même courbe la gaine et implique aussi une non-uniformité locale de la gravure. [26, p. 177]

3.5.5 Gravure ionique réactive profonde (DRIE)

Dans les cas où la profondeur de gravure est très grande, la RIE n'est plus une option valable de gravure à cause de la faible sélectivité avec le masque. Les procédés de DRIE offrent des sélectivités plus importantes et permettent donc d'atteindre des profondeurs de gravure de 500 μm ou plus [43]. Cette section traite de la configuration typique d'un système de DRIE, du procédé Bosch et d'une variante à 3 phases du procédé de Bosch qui est utilisée dans la cadre du projet de maîtrise.

3.5.5.1 Configuration CCP+ICP (plasma à couplages capacitif et inductif) typique d'un système de DRIE

Au lieu de n'avoir qu'une configuration CCP comme pour le réacteur de RIE où les électrodes servent à former le plasma ET à accélérer les ions, la configuration d'un réacteur de DRIE est hybride : le plasma est formé par couplage inductif (ICP : plasma à couplage inductif), mais les ions sont accélérés et dirigés vers le substrat par couplage capacitif (CCP : plasma à couplage capacitif). La Figure 3.18 illustre une telle configuration CCP+ICP.

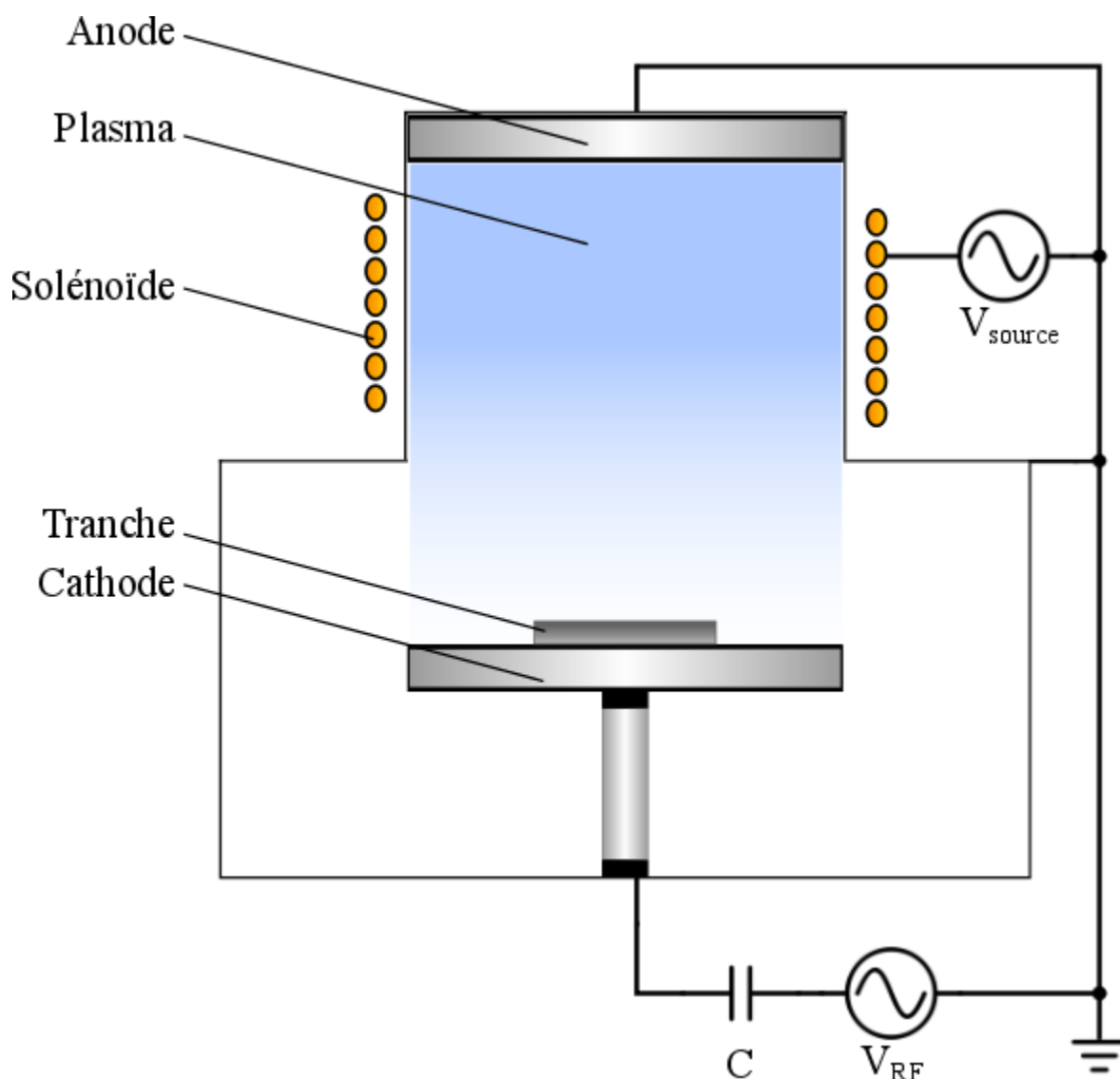


Figure 3.18 : Schéma simplifié de la configuration CCP+ICP d'un réacteur de DRIE typique.

Dans le cas du réacteur utilisé dans le projet, c'est la « shower head » (composant mécanique par où entrent les gaz, situé en haut de la chambre, parallèle au plateau) qui agit comme anode. Dans le but d'alléger le schéma de la Figure 3.18, certains composants mécaniques (« shower head », pompe, débitmètres, gauge de pression, vannes, etc.) ne sont pas présentés sur le schéma.

Un plasma formé par couplage inductif est très dense, parce que le champ magnétique engendré influence la trajectoire des électrons en leur attribuant un comportement hélicoïdal (les ions sont trop lourds pour avoir un tel comportement), ce qui a pour effet d'augmenter le nombre de collisions entre les électrons et les molécules de gaz [26, p. 173]. Un plasma formé par couplage

capacitif est peu dense, car le courant généré dans le plasma est limité par l'impédance des gaines formées au-dessus de la surface des électrodes [43].

Le couplage capacitif est nécessaire pour l'intervention mécanique des ions dans la gravure en augmentant leur énergie cinétique. Par contre, cette dernière (CCP) peut être retirée, en éteignant par exemple le générateur du plateau, afin d'obtenir une gravure exclusivement gouvernée par les espèces réactives et donc plus isotrope et plus sélective au masque. L'indépendance entre la formation du plasma et le bombardement ionique permet d'avoir un contrôle accru sur plusieurs caractéristiques de la gravure.

La température affecte certaines caractéristiques comme l'anisotropie et l'uniformité et donc, un système de refroidissement est nécessaire pour maintenir la température de la tranche à une valeur stable [23], [26, p. 197], [42]. Dans certains réacteurs, comme dans le cas du projet, le refroidissement est véhiculé par de l'hélium [23], [26, p. 197], [28] envoyé sous la tranche à deux endroits différents : au centre et au bord de la tranche gravée. Finalement, une pompe et des tuyaux servent respectivement à vider la chambre et à envoyer un débit contrôlé de différents gaz.

Pour obtenir un meilleur degré d'anisotropie tout en gardant une vitesse de gravure élevée, deux méthodes peuvent être appliquées : le procédé cryogénique et le procédé Bosch [42]. La méthode utilisée dans le cadre du projet de maîtrise pour la formation des tranchées d'isolement et des TSV est une variante de la seconde : le procédé Bosch à trois phases. La méthode cryogénique n'est pas expliquée ici.

3.5.5.2 Procédé Bosch

Le procédé Bosch consiste en la répétitions de plusieurs cycles de trois phases successives : la passivation, le retrait de polymère et la gravure [28], [43], [57], comme schématisées à la Figure 3.19a. Dans la littérature, le procédé Bosch commence parfois par une phase de gravure [18], [26, p. 197], [42], [58]. D'autres variantes existent [23], [59], [60]. Dans le cadre du projet, nous utilisons le procédé Bosch « à 3 phases » illustré à la Figure 3.19b.

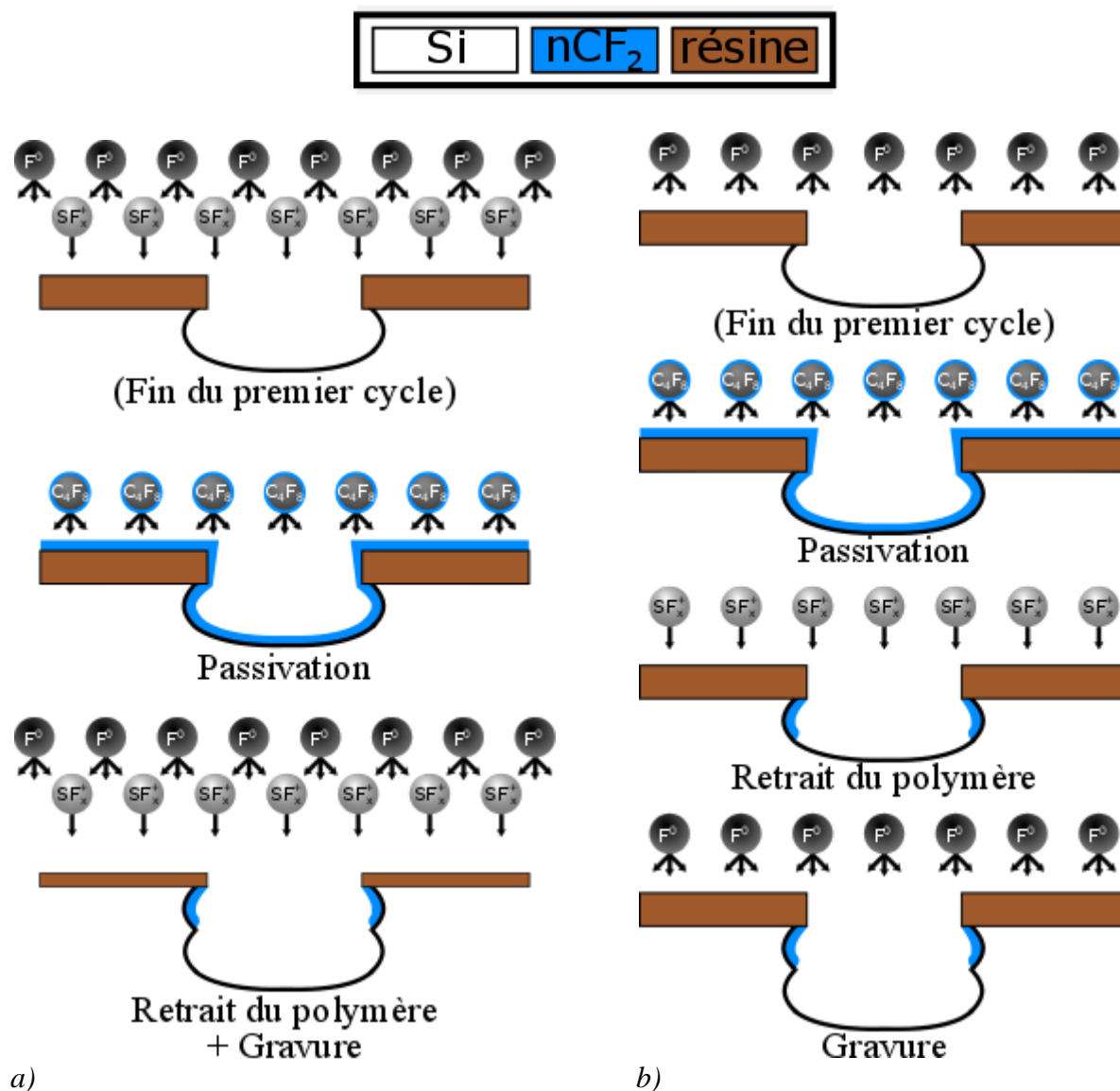


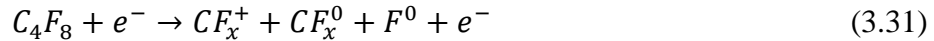
Figure 3.19 : Procédé Bosch a) à 2 phases et b) à 3 phases.

À la Figure 3.19a, la résine est intentionnellement montrée comme étant rétrécie à la dernière phases pour mettre en évidence que la variante à 3 phases de la Figure 3.19b procure une meilleure sélectivité (explication plus bas).

1. Passivation

La première phase consiste à déposer une couche de polymère sur la surface entière de l'échantillon de façon conforme (parois incluses) par PECVD (section 3.1.3). Seul le générateur du solénoïde (ICP) est activé et est utilisé seulement pour dissocier les molécules du gaz en vue de les condenser sous forme de polymère.

Le gaz utilisé doit être polymérisant. Dans le cas du silicium par exemple, le C_4F_8 peut être utilisé. La couche de passivation se retrouve alors sous la forme nCF_2 suivant les réactions (3.31), (3.32) et (3.33) [28].



2. Retrait de polymère

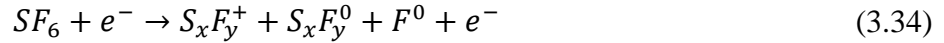
La deuxième phase consiste d'abord à retirer physiquement le polymère déposé sur les surfaces perpendiculaires à l'angle d'incidence des ions. Pour ce faire, des puissances RF sont appliquées au plateau (CCP) et au solénoïde (ICP). À cause de la directionnalité du bombardement ionique et la propriété inhibitrice des polymères par rapport aux radicaux libres, seul le polymère déposé sur les surfaces perpendiculaires à la direction des ions est retiré. Cette étape peut donc être vue comme une gravure anisotrope verticale de la couche de passivation.

3. Gravure

La troisième phase consiste à graver de façon isotrope la surface exposée du matériau.

- Procédé Bosch classique : les phases de retrait de polymère et de gravure partagent les mêmes paramètres. Les puissances RF sont appliquées au plateau (CCP) et au solénoïde (ICP). Dans cette phase de gravure, les masques de polymère verticaux protègent les parois des structures. Contrairement à la phase de retrait des polymères, les radicaux libres participent à la gravure qui est donc isotrope.
- Variante utilisée dans le cadre du projet de maîtrise : les phases de retrait de polymère et de gravure ne partagent pas les mêmes paramètres. Comme différence importante, le générateur de puissance au plateau est éteint durant la phase de gravure. Seule la puissance RF au solénoïde (ICP) est appliquée. La gravure est donc de nature exclusivement chimique, gouvernée seulement par les radicaux libres (donc sélective).

Le gaz doit être gravant. Dans le cas du silicium par exemple, du SF_6 peut être utilisé. Les radicaux libres et ions sont produits par la réaction (3.34) (formation du plasma). La réaction (3.35) est associée à la gravure chimique par les radicaux libres.



Les ondulations topographiques des parois sont mieux connues sous le nom de « scallops » [18], [26, p. 197], [42], [43] et sont visibles sur la Figure 3.19. C'est d'ailleurs ce terme qui est utilisé dans la suite de ce mémoire pour décrire ce type d'ondulations. Le fait que la seule étape de gravure du procédé soit de nature isotrope est la cause de ce phénomène.

La variante utilisée dans le cadre du projet de maîtrise permet de réduire le rapport de la contribution de la gravure physique par les ions sur la totalité d'un cycle complet de Bosch. Cette prédominance de la nature chimique sur la nature physique de la DRIE permet d'obtenir une meilleure sélectivité (par rapport au masque) et une meilleure uniformité de gravure, mais ne permet pas d'éviter la formation des scallops.

Les tuyaux, la pompe et les autres composants mécaniques associés (pompe, débitmètres, gauge de pression, vannes, etc.) permettent une alternance efficace des phases du procédé Bosch. La succession de ces phases de courtes durées (de l'ordre de la seconde) mène à une gravure rapide de haute sélectivité avec le masque et permet l'obtention d'un profil structurel globalement droit [18], [26, p. 197], [42], [43], [57]. Le procédé Bosch possède quand même deux faiblesses notables en lien aux caractéristiques structurelles obtenues : la formation des scallops et la distribution angulaire non-uniforme des ions (aussi une faiblesse de la RIE, à cause des collisions dans la gaine : section 3.5.6.3).

3.5.6 Paramètres de RIE et de DRIE

Comme expliqué à la section 3.5.3.2, c'est le bombardement ionique qui gouverne le pouvoir mécanique de la gravure et ce sont les radicaux libres qui y contribuent le plus chimiquement. Les systèmes de RIE, et encore plus les systèmes de DRIE, ont un nombre élevé de paramètres modifiables qui influencent les caractéristiques structurelles obtenues.

Cette section introduit d'abord l'évaluation de l'énergie des ions qui bombardent l'anode et la cathode dans la configuration CCP. Les paramètres réglables suivants sont ensuite abordés : les puissances appliquées au plateau (CCP) et au solénoïde (ICP), la pression, le débit des gaz, la durée de gravure et les temps de cycles de Bosch en DRIE. Cette section se restreint aux cas des systèmes de RIE et de DRIE détaillés aux sections 3.5.4 et 3.5.5, dont les configurations sont illustrées respectivement à la Figure 3.14 et la Figure 3.18. La température et le débit des gaz ne sont pas évoqués, parce qu'il est difficile de les séparer des autres paramètres [51].

3.5.6.1 Contrôle sur l'énergie des ions

L'énergie des ions n'est pas un paramètre qui est réglable directement, car lui-même dépend de plusieurs autres, mais constitue un élément-clé pour l'établissement des caractéristiques de gravure désirées. L'énergie des ions E_i participe directement à la nature de la gravure au plasma et influence donc plusieurs caractéristiques du procédé comme le taux de gravure, la sélectivité, le degré d'anisotropie et le profil de surface [46]. Pour acquérir de l'énergie, les ions doivent passer dans un champ électrique produit par une différence de potentiel. Ainsi, comme illustré à la Figure 3.17, la tension d'autopolarisation implique que le gain d'énergie le plus important se trouve dans la gaine au-dessus de la tranche à graver, puisque c'est là que se retrouve la plus forte chute de tension. L'énergie moyenne des ions \bar{E}_i qui arrivent à la cathode et qui bombardent la tranche est directement proportionnelle à la différence de potentiel moyen entre le plasma et le plateau. En absence de collision dans la gaine, la moyenne de tension au plateau est égale à la tension d'autopolarisation V_{auto} , alors [26, p. 169] :

$$\bar{E}_{i,cathode} = e(\bar{V}_{plasma} + |V_{auto}|) \quad (3.36)$$

Car $V_{auto} < 0$.

Pendant les cycles positifs de tension au plateau, c'est l'anode qui est bombardée par des ions d'énergie moyenne égale à [26, p. 169] :

$$\bar{E}_{i,anode} = e\bar{V}_{plasma} \quad (3.37)$$

car celle-ci est mise à la masse.

Pour maximiser l'énergie du bombardement ionique sur la cathode (où se trouve la tranche) et minimiser l'endommagement de l'anode, les (3.36) et (3.37) montrent qu'il faut une valeur absolue de tension de polarisation $|V_{auto}|$ maximale et une tension plasma V_{plasma} minimale. Pour ce faire, un premier moyen est de modifier la configuration intrinsèque au système, notamment en changeant le rapport entre les surfaces des électrodes (Annexe C). Pour un cas typique de configuration CCP, il est aussi possible de contrôler l'énergie des ions principalement par la modification de deux paramètres : la puissance RF appliquée et la pression.

3.5.6.2 Puissance RF appliquée au plateau

La puissance RF appliquée au plateau influence l'énergie des ions qui arrivent à la tranche en changeant la valeur de tension plasma, comme le montre l'équation (3.30). Plus la tension générée est élevée, plus la tension plasma est élevée. Le potentiel dans la gaine, qui correspond à la différence de potentiel entre le plateau et le plasma, est par conséquent aussi augmenté et accélère donc plus intensément les ions qui traversent la gaine. À faible puissance RF appliquée au plateau, la gravure devient davantage de nature chimique et donc plus sélective au masque et plus isotrope [18]. À haute puissance RF, c'est l'inverse : la gravure devient davantage de nature physique et donc moins sélective au masque et plus anisotrope. À haute puissance RF, les ions parviennent aussi à mieux atteindre le fond des structures de haut facteur de forme [43].

Dans un réacteur de RIE, l'ionisation du gaz est explicitement réalisée par la configuration CCP. Dans ce cas, la puissance RF appliquée au plateau joue alors un rôle crucial pour la formation du plasma et des espèces nécessaires à la gravure. Sans puissance RF, la gravure au plasma est inexistante, parce que le plasma n'est tout simplement pas généré [61]. En revanche, dans un réacteur de DRIE, l'ionisation du gaz est réalisée grâce à la configuration ICP; la puissance RF appliquée au plateau, plus faible en amplitude et en fréquence, a peu d'influence sur la densité d'espèces dans le plasma. Dans les deux cas, la puissance RF appliquée au plateau est un paramètre qui permet de contrôler directement l'énergie des ions grâce à son influence sur la tension d'autopolarisation [45].

À haute fréquence (13,56 – 156 MHz [51]), les ions qui bombardent le fond d'une structure qui serait isolant (comme dans le cas d'une tranche de type « silicium sur isolant ») pourraient s'accumuler peu à peu localement au fond de la structure, créer un champ électrique local et dévier les ions vers les parois. On parle alors d'un phénomène de « notching ». Pour empêcher ce

phénomène, l'utilisation de basses fréquences (~ 380 kHz [43]) est donc de mise : à chaque partie de cycle où le potentiel au plateau est négatif, les ions accumulés sur la surface peuvent être équilibrés par les électrons du reste du cycle (potentiel positif). [43]

3.5.6.3 Pression

La pression des gaz influence principalement le taux de gravure [44], [57], [62], le profil de surface [57], [60], le degré d'anisotropie [18], [55], [60] et l'uniformité de gravure à travers une tranche [55], [63].

Tout d'abord, une augmentation de la pression diminue le libre parcours moyen des constituants du plasma. Les constituants du plasma entrent alors en collision plus souvent entre eux et avec la surface de la tranche. Ceci a pour conséquences :

1. Un plus grand nombre d'espèces qui participent à la gravure. [44], [62]

Un plus grand nombre de molécules de gaz sont ionisées en facilitant leur collision avec les électrons.

2. Une consommation accrue des espèces en haut des structures gravées. [26, p. 177], [55], [60]

Les espèces du plasma entrent plus facilement en contact avec la surface de la tranche, mais se rendent plus difficilement au fond des structures sans collision avec leurs parois. Cette difficulté entraîne un effet ARDE (gravure dépendante du facteur de forme, section 4.1.2.7) plus prononcé et un facteur de forme final limité [18]. De plus, les collisions génèrent une distribution angulaire plus étendue des ions, surtout en haut des structures gravées [26, p. 177], et leur mouvement devient donc moins anisotrope [55].

3. Dépôt subséquent des produits de gravure. [44]

Le transport des produits de gravure vers l'extérieur des structures est réduit par une fréquence plus élevée des collisions.

4. Ions d'énergie moins élevée. [18], [44], [55], [57], [60], [62]

Une partie de l'énergie cinétique des ions est convertie en chaleur durant les collisions. La gravure devient davantage chimique et donc plus sélective au masque et plus isotrope.

5. En DRIE, épaisseur de la couche de polymères lors des étapes de passivation du procédé Bosch. [57], [60]

Les espèces polymériques entrent plus facilement en contact avec la surface de la tranche. Cet effet jumelé à la réduction de l'énergie des ions lors des étapes de gravure intensifie le phénomène de « micro-herbage » sur le profil de gravure (section 4.1.2.9).

À l'inverse, une réduction de la pression réduit le nombre d'espèces qui participent à la gravure, permet à celles-ci d'atteindre le fond des structures avant de subir une collision, facilite le mouvement des produits de gravure vers l'extérieur des structures, augmente l'énergie des ions et mène à une couche de polymères plus mince et plus inhomogène. Ainsi, l'effet ARDE (section 4.1.2.7) est diminué, le facteur de forme limitant est plus élevé et la gravure est davantage de nature physique, donc moins sélective et plus anisotrope. L'inhomogénéité de la couche de passivation en DRIE peut toutefois mener à des aspérités ondulées sur les parois des structures [57].

Au bilan, la variation du taux de gravure en augmentant la pression est causée à la fois par l'augmentation du nombre d'espèces qui participent à la gravure et par la diminution de l'énergie des ions. Ces deux causes entrent en conflit, puisqu'elles génèrent respectivement une augmentation et une réduction du taux de gravure. Dans les cas où l'énergie des ions domine sur la gravure, une augmentation de la pression diminue le taux de gravure, alors que dans les cas contraires, elle l'augmente [62]. Peu importe le cas, la pression doit toutefois être suffisante pour permettre la formation d'un plasma. En effet, une pression trop basse peut mener à un tel manque de collisions que le plasma peut s'éteindre [26, p. 161].

3.5.6.4 Temps des cycles de Bosch (DRIE)

Le rapport de temps entre les cycles d'un procédé Bosch influence plusieurs caractéristiques de gravure comme : le degré d'anisotropie, le taux de gravure et la topographie résultante. Définissons le rapport du temps de gravure t_g sur le temps de l'étape de passivation t_p dans un procédé Bosch comme le rapport R_{Bosch} :

$$R_{Bosch} := \frac{t_g}{t_p} \quad (3.38)$$

Si le rapport R_{Bosch} est trop bas (temps de passivation trop important) ou que le temps de retrait de polymère est trop faible, une couche trop épaisse de passivation est déposée au fond des structures gravées et peut gêner, voir étouffer la gravure. À l'inverse, un rapport R_{Bosch} trop élevé (temps de gravure trop important) mène à une surgravure latérale due au manque de protection des parois et peut produire un profil négatif (en « A ») avec des scallops de hautes dimensions [26, p. 197], [43].

3.5.6.5 Puissance RF appliquée au solénoïde (DRIE)

Dans un réacteur de DRIE, c'est la puissance RF appliquée au solénoïde (aussi appelée « puissance source » dans la littérature [18] et dans le vocabulaire de l'équipe de support aux procédés à Excelitas) qui permet l'ionisation du gaz et donc de transformer celui-ci en plasma afin d'obtenir les espèces nécessaires à la gravure (ou à la passivation dans un procédé Bosch). Le générateur RF du solénoïde est indépendant de celui du plateau, qui sert lui à contrôler la direction et l'énergie des ions. Plus la puissance source augmente, plus il y a d'espèces pour la gravure et donc plus le taux de gravure augmente. Toutefois, certains mélanges chimiques de gravure mènent à une puissance source de saturation. Au-delà de cette puissance, le taux de gravure peut chuter énormément étant donné la formation d'une couche inhibitrice de gravure formée au fond des structures gravées. Dans le cas de la gravure du silicium par un plasma de gravure contenant de l'oxygène par exemple, une couche d'oxyde peut se former plus rapidement qu'elle en est retirée par les ions et peut donc mener à un étouffement complet de la gravure [18]. Dans le cas de gaz de passivation, une augmentation de la puissance source peut entraîner à une couche de polymère plus épaisse, ralentir (voire étouffer) la gravure et modifier le degré d'anisotropie en donnant davantage un profil positif (en « V ») [43].

Étant donné le nombre élevé de paramètres d'une DRIE, le travail pour l'obtention de structures de haut facteur de forme, par exemple des TSV, peut s'avérer complexe.

CHAPITRE 4 TROUS D'INTERCONNEXION À TRAVERS LE SILICIUM (TSV) ET TRANCHÉES D'ISOLEMENT

Les TSV et les tranchées d'isolement constituent les deux types de structures d'intérêt formées dans le cadre du projet de maîtrise. Cette section traite de la description et des défis reliés à ces deux types de structures.

4.1 TSV

Cette section traite des étapes de formation principales d'un TSV, des défis qui y sont associés, de certaines applications dans lesquelles sont utilisées les TSV et finalement, d'une brève littérature sur des TSV produits ailleurs.

4.1.1 Formation des TSV

Le procédé de formation des TSV dépend de plusieurs aspects comme : leurs spécifications, les autres étapes de procédé (qui pourraient être incompatibles avec la méthode employée), le budget et les équipements disponibles du fabricant, l'application souhaitée, etc. Il existe par contre trois lignes directrices de procédé qui catégorisent l'ensemble des TSV selon trois types communément appelés : « via-first », « via-middle » et « via-last ». La nomenclature de ces types de TSV est simplifiée en séparant d'abord en deux groupes la majeure partie des autres étapes de microfabrication : FEOL (« Front-End-Of-Line » en anglais) et BEOL (« Back-End-Of-Line » en anglais). [7], [18], [58]

4.1.1.1 FEOL vs BEOL

Les étapes de FEOL constituent les étapes pour lesquelles les motifs des microsystèmes sont imprimés. Ceci inclut toutes les étapes de microfabrication (dépôt, gravure, dopage, lithographie, etc.) qui mènent à l'obtention des dispositifs, sans les lignes de connexion métallique. [7], [18], [58]

Les étapes de BEOL constituent les étapes de connexion entre les dispositifs structurés lors des étapes de FEOL. Ceci inclut toutes les étapes d'assemblage (dépôts métalliques pour les connexions, découpage des puces, etc.). [7], [18], [58]

4.1.1.2 Via-first vs via-middle vs via-last

Les « via-first » sont des TSV fabriqués avant ou au début des étapes FEOL. Ils offrent l'avantage d'un procédé de microfabrication flexible étant donné l'absence d'autres structures sur la tranche, mais le matériau de remplissage doit être compatible avec les étapes FEOL. Ainsi, plutôt que du métal, le polysilicium dopé est un bon candidat [58], mais est moins bon conducteur que les métaux. Dans le cadre du projet de maîtrise, l'approche des « via-first » est choisie pour son procédé flexible. [18], [58]

Les « via-middle » sont des TSV fabriqués une fois toutes les étapes FEOL complétées et avant ou au début des étapes BEOL. Les via-middle peuvent être remplis par du métal, comme du cuivre ou du tungstène. [18]

Les « via-last » sont des TSV fabriqués après les étapes BEOL. Leur procédé de formation est démontré comme moins coûteux et plus simple que celui des via-middle, mais la densité des TSV est plus limitée. Les via-last peuvent être remplis par du métal, comme du cuivre ou du tungstène. [18], [58]

4.1.1.3 Étapes subséquentes à la formation d'un TSV

Avant de remplir les TSV d'un matériau conducteur (généralement du métal : Cu ou W [58]) pour les lignes de conduction électrique, ceux-ci doivent être revêtus de couches d'isolation, de diffusion et d'adhérence.

La couche d'isolation sert à empêcher les charges qui circulent dans les TSV de diffuser vers le substrat. Le SiO_2 peut être utilisé comme couche d'isolation [7], [58]. La qualité de la couche de SiO_2 est cruciale aux propriétés électriques d'un dispositif et dépend de la méthode de dépôt (CVD) ou de croissance (oxydation thermique) choisie [64].

La couche de barrière de diffusion sert à empêcher les ions métalliques de diffuser vers le substrat, ce qui pourrait modifier les propriétés électriques du dispositif. Le TiN [28], [58], [65], le TaN [65], [66] et le TiW [67] sont des exemples de composés qui peuvent être déposés pour former la couche de barrière de diffusion.

La couche d'adhérence sert à obtenir une interface propre et uniforme entre les parois des TSV et le matériau conducteur déposé par la suite [66]. Le TiN [28], [58], [68], le SiN [68] et l'Au [68] sont des exemples de composés qui peuvent être déposés pour former la couche d'adhérence.

4.1.2 Défis dans la formation des TSV par DRIE

Dans le cadre de la formation de TSV, la DRIE avec un masque de résine implique de nombreux défis pour l'obtention de caractéristiques structurales souhaitées. La Figure 4.1 illustre les effets qu'a un procédé de DRIE sur les caractéristiques structurales d'un TSV en cours de formation avec un masque de résine. Les phénomènes en lien sont expliqués par la suite.

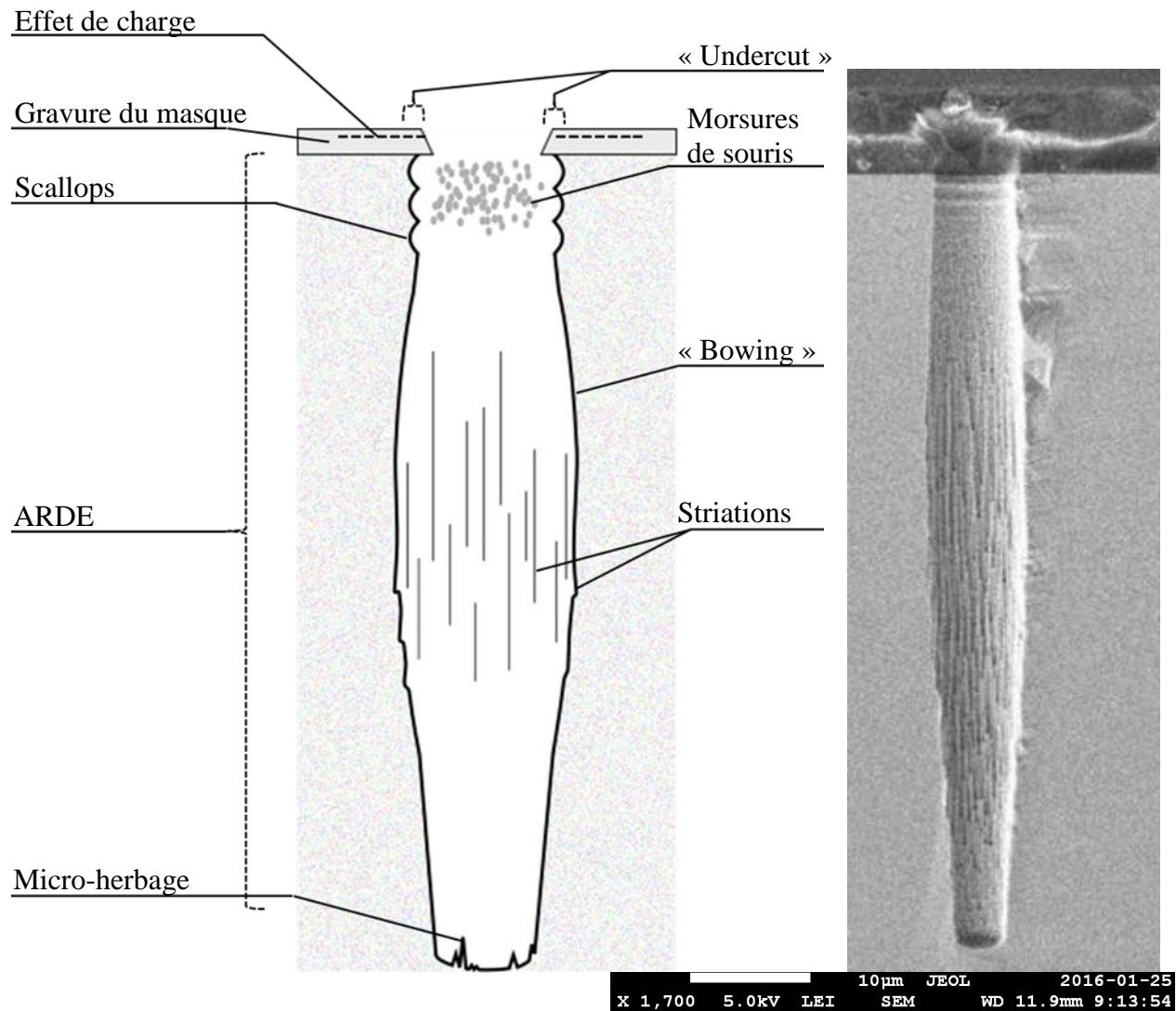


Figure 4.1 : Défauts structuraux formés par DRIE avec un masque de résine dans le cas d'un TSV en cours de formation. L'image de droite est prise au SEM (microscope électronique à balayage) durant le projet et sert de comparaison au schéma de gauche.

Les défauts comme « l'undercut », les scallops, le micro-herbage, les striations, les morsures de souris et le « bowing » nuisent au remplissage des TSV, parce que 1) la couche d'adhérence peut présenter des discontinuités et 2) des zones vides peuvent subsister après le remplissage [18], [23], [42], [69].

4.1.2.1 Effet de charge

L'effet de charge est la déviation d'espèces chargées (ions) due à l'accumulation de charges au sein d'un matériau isolant [70]. À la Figure 4.1, elle est représentée par des signes négatifs (-) dans le masque de résine. Dans le cas d'une DRIE, le masque de résine (si tel est le cas) et la couche de passivation se chargent négativement par les électrons et fait dévier les ions positifs vers les parois des structures gravées [70]. La déviation des ions par effet de charge sur un masque de résine est illustrée à la Figure 4.3a. L'effet de charge contribue entre autres au « bowing » (section 4.1.2.6) et aux striations (section 4.1.2.8).

4.1.2.2 Undercut

Traduction libre : « surgravure latérale sous-jacente ».

« L'undercut » correspond à la surgravure latérale directement sous le masque, générant une plus grande ouverture des structures par rapport à l'ouverture du masque. Par exemple, un « undercut » de 1 μm implique un élargissement de 2 μm à l'ouverture de la structure gravée. Dans une DRIE, « l'undercut » est une conséquence de l'isotropie de la gravure générée par les radicaux libres. Pour obtenir des structures avec une ouverture souhaitée, « l'undercut » peut être considéré en utilisant des masques d'ouverture volontairement réduite [42]. La gravure de silicium par un plasma à base de fluor est réputée pour générer de « l'undercut » important étant donné le taux élevé de gravure latéral obtenu par les radicaux libres [51].

4.1.2.3 Gravure du masque

Le masque utilisé doit résister à la gravure, c'est-à-dire que même en fin de gravure, un résidu doit subsister. Dans le cadre du projet de maîtrise, de la résine est utilisée. La résine ne doit pas fissurer afin de bien protéger le substrat [40]. La DRIE peut aussi rendre les résines difficiles à retirer après gravure en les chauffant ou à cause de dépôts de produits de gravure inhibiteurs [71].

Si l'épaisseur de la résine est faible aux ouvertures à cause de facettes inclinées ou de courbures (« coins ronds »), la gravure peut agrandir l'ouverture du masque de même qu'agrandir l'ouverture des structures gravées [55] tout en provoquant la formation de striations (section 4.1.2.8), comme illustré (avec une échelle exagérée) à la Figure 4.2. Aussi, la présence de facettes inclinées fait dévier la trajectoire des ions par réflexion vers les parois des structures et fait accentuer le « bowing » (section 4.1.2.6; Figure 4.3).

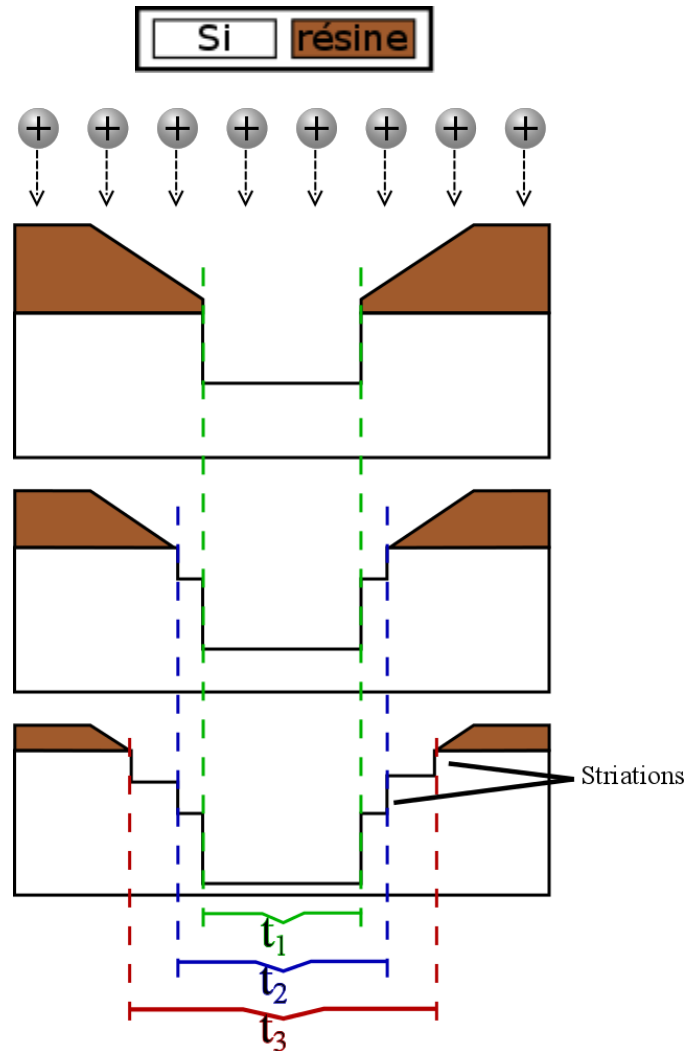


Figure 4.2 : Sous bombardement ionique, formation de striations par élargissement d'une ouverture dans un masque de résine dû à la présence de facettes inclinées. Inspirée de [55], [58].

Finalement, le bombardement ionique mène à une érosion du masque qui peut entraîner l'accumulation de résidus inhibiteurs de gravure au fond des structures, provoquant la formation de micro-herbage et de striations [72].

La résine doit donc être suffisamment épaisse ou résistante pour résister à la gravure. Des étapes optimisées de « Softbake », « Post-Exposure Bake », « Hardbake » et de photostabilisation permettent d'obtenir un masque de résine de bonne topographie et de bonne qualité (section 3.2).

4.1.2.4 Morsures de souris

Les morsures de souris (traduction libre de « mouse bites ») sont des cavités gravées essentiellement dans les parois des structures. Les ions retirent des bouts de polymère et permettent aux radicaux libres de graver de façon isotrope la surface exposée du substrat, formant ainsi des cavités qui ont l'apparence de morsures de souris [73]. Si la couche de polymère est trop mince, mal adhérente aux parois ou qu'elle présente des cavités internes, des morsures de souris peuvent apparaître [69]. Dans la littérature, il est possible de retrouver le terme anglais « Sponge-like surface » pour les représenter [69].

4.1.2.5 Scallops

Traduction libre : « dentelures ».

Comme mentionné à la section 3.5.5, les scallops sont des ondulations topographiques produites par l'alternance des cycles du procédé Bosch (passivation et gravure) à cause de la nature isotrope de la gravure par les radicaux libres. Des ions de plus faible énergie et de distribution angulaire plus répartie (Figure 4.3b), par exemple à cause de collisions dans la gaine [18], [26, p. 177], peuvent contribuer à la gravure isotrope lors de la formation des premières scallops, en haut des TSV [24], [74]. Une façon de réduire la taille des scallops est de diminuer le temps des étapes de gravure isotrope du procédé [24].

4.1.2.6 Bowing

Traduction libre : « effet bouteille », « courbure » ou « bourrelet ».

Le « bowing » correspond à la courbure des parois d'une structure gravée, faisant varier le diamètre d'un TSV en fonction de sa profondeur. La réflexion des ions sur les parois des structures gravées est responsable du phénomène de « bowing » [51]. Une distribution angulaire importante des ions ou une insuffisance de passivation intensifient la courbure générée [74]. L'effet de charge et la présence de facettes inclinées dans la résine peuvent faire dévier les ions vers les parois et accentuer le « bowing » [18], [70] (Figure 4.3). Une autre cause du bowing

provient de la difficulté des composants du plasma à se rendre au fond des structures : une partie d'une structure peut être gravée en forme de « A », mais une partie plus profonde en forme de « V » à cause du changement de facteur de forme au cours de la gravure [51], [58], [74] (effet ARDE, section 4.1.2.7).

Il est important d'obtenir le moins de « bowing » possible pour empêcher la formation d'une cavité lors du remplissage des TSV [42]. Une façon de réduire les effets du « bowing » consiste à abaisser la pression durant les étapes de retrait de polymère du procédé Bosch pour obtenir des ions plus directionnels [22].

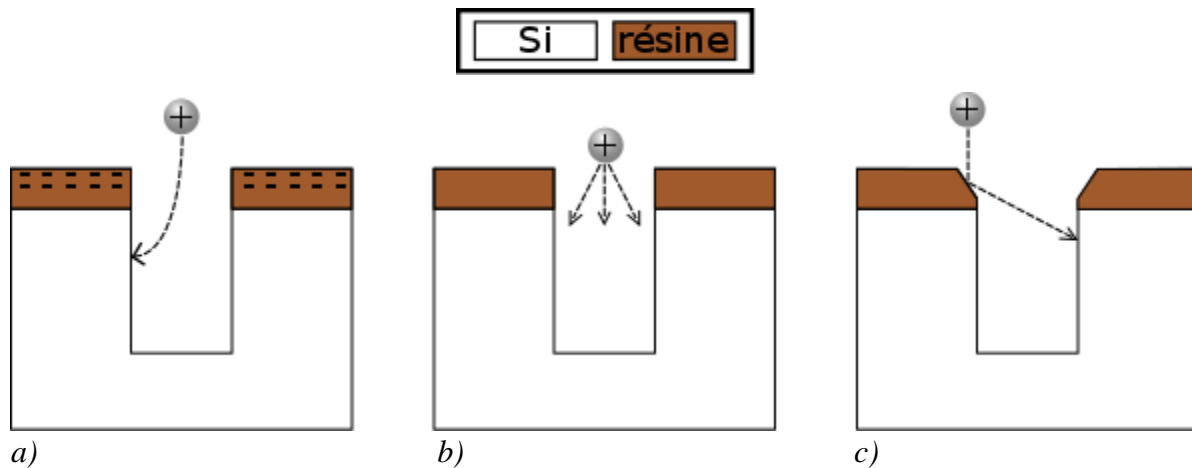


Figure 4.3 : Déviation d'ions a) par effet de charge, b) par collisions dans la gaine (distribution angulaire d'incidence) et c) par réflexion sur une facette inclinée de résine.

4.1.2.7 Effet ARDE

L'effet ARDE (gravure dépendante du facteur de forme, traduction libre de « Aspect Ratio Dependant Etching ») stipule que les motifs de haut facteur de forme sont gravés moins rapidement que les motifs de faible facteur de forme. Un TSV de diamètre élevé est gravé plus rapidement qu'un TSV de faible diamètre à une même profondeur. Pour la gravure anisotrope d'un TSV, le taux de gravure diminue en fonction du temps, parce que son facteur de forme augmente en fonction du temps. L'effet ARDE est conséquence de la densité d'espèces dans une structure qui diffère en fonction de la profondeur à cause de leur interaction avec les parois [51], [58], [74]. Les radicaux libres, qui ne voyagent pas de façon directionnelle comme les ions, se retrouvent consommés en plus grand nombre en haut des structures et contribuent donc en moins grand nombre à la gravure au fond. Le gradient de densité d'espèces généré peut ainsi mener à

une inclinaison des pentes (forme de « V ») [51]. Une façon d'atténuer l'effet ARDE est de modifier progressivement les paramètres du procédé de DRIE à mesure que la profondeur augmente pour prendre en compte l'évolution du facteur de forme [74].

4.1.2.8 Striations

Les striations correspondent visuellement à des égratignures sur les parois des structures. Elles sont des portions de la structure qui ont subi une gravure en retard par rapport à leur environnement à cause de couches inhibitrices qui les ont protégées temporairement, mais qui étaient trop minces ou trop mal adhérentes pour subsister au bombardement ionique [58]. En haut des structures, les striations peuvent être produites par l'agrandissement de l'ouverture du masque de résine dû à la présence de défauts dans les bordures de l'ouverture [58], [72] (Figure 4.2).

Aussi, puisque la couche de passivation déposée dans le procédé Bosch est isolante, elle est assujettie à l'effet de charge lors des bombardements ioniques. Une érosion de la couche de polymère mène à une inhomogénéité de cet effet de charge au sein de la structure et fait dévier les ions, provoquant ainsi les striations. [59], [75]

Finalement, comme mentionné à la section 4.1.2.3, des striations peuvent apparaître par une érosion du masque qui entraîne l'accumulation de résidus inhibiteurs qui peuvent tomber au fond des structures.

Pour diminuer la taille des striations, les méthodes suivantes peuvent être appliquées :

- Abaissement de la pression pendant la gravure (démontrée expérimentalement [74]);
- Diminution du rapport de temps de passivation par rapport au temps de gravure pour empêcher la surpassivation [75];
- Augmentation de la puissance appliquée au plateau pour des ions d'énergie cinétique plus importante. Les ions sont donc plus insensibles à l'effet de charge généré dans le polymère et retirent plus efficacement le polymère pour empêcher la surpassivation [59].

L'emploi de ces méthodes réduit toutefois la sélectivité au masque de résine et pourrait donc mener quand même à la formation de striations en haut des structures si l'ouverture du masque s'agrandit à cause de défauts de bordures d'ouvertures.

4.1.2.9 Micro-herbage

Le micro-herbage constitue des fragments de silicium (ordre du micron [24]) qui auraient dû être gravés, mais qui ne le sont pas, formant des aspérités qui ont l'apparence d'herbage. La formation du micro-herbage s'effectue lorsqu'une portion de silicium est recouverte d'un micro-masque inhibiteur. La partie sous ce micro-masque est protégée de la gravure anisotrope, mais son environnement ne l'est pas, résultant en l'apparence d'un « micro-herbage ». Plusieurs constituants peuvent former un micro-masque : du polymère provenant du cycle de passivation, de la poussière, de l'oxyde natif, etc. [51] L'ajout d'oxygène au gaz de gravure permet de réduire, voire éliminer le micro-herbage formé à partir de micro-masques de polymère, mais réduit la sélectivité de gravure à la résine [24]. Dans la littérature, les termes « black silicon », « grass » et « microstructures colonnaires » peuvent aussi être retrouvés pour désigner le micro-herbage [42].

4.1.3 TSV réalisés ailleurs par DRIE

Pour une liste exhaustive de TSV réalisés en industrie, le lecteur peut se référer à l'ouvrage de Gambino [76]. Il est rare de retrouver des détails approfondis sur les spécifications et le procédé de microfabrication des TSV réalisés en industrie pour des raisons évidentes (i.e. secrets industriels). C'est pourquoi les références présentées ici [22]–[24] se situent dans un contexte de recherche. Le Tableau 4.1 résume quelques caractéristiques des TSV réalisés.

Tableau 4.1 : Caractéristiques de TSV trouvés dans la littérature dans un contexte de recherche.

	[22], [23]	[24]
Dimensions (μm)	3x50	30x142,6
AR	16,7	4,8
Épaisseur initiale du masque de résine (μm)	4	12
Hauteur des scallops (μm)	0,095	< 0,040

Pour de plus amples informations, des images et une étude paramétrée sur les TSV réalisés dans les références du Tableau 4.1, le lecteur peut se référer à leur ouvrage respectif. Au Chapitre 6, le Tableau 6.3 contient les mêmes informations que le Tableau 4.1, mais en y incluant les caractéristiques obtenues dans le projet à titre comparatif.

4.2 Phénomène de diaphonie

Cette section traite de la diaphonie dans les SiPM, de l'utilisation des tranchées d'isolement pour réduire l'intensité de la diaphonie et des dispositifs présentant des tranchées.

4.2.1 Description de la diaphonie

La diaphonie est un phénomène qui se caractérise par la génération d'un photocourant dans une cellule voisine à celle frappée par un photon. La diaphonie optique et la diaphonie électrique sont deux types de phénomène présents dans les SiPM.

La diaphonie optique intervient lorsqu'un porteur photogénéré interagit à grande vitesse avec un noyau atomique et ralentit en libérant un photon (effet Bremsstrahlung [11]). Ce nouveau photon peut alors transiter et déclencher l'avalanche dans une cellule voisine. Le photon incident au SiPM est donc compté plus qu'une fois. Un autre cas de diaphonie optique se présente lorsque le photon incident à une cellule du SiPM est dévié par réflexion vers une cellule voisine [19], [20]. Dans ce cas toutefois, l'avalanche n'est provoquée que dans une cellule et le photon n'est alors compté qu'une fois.

La diaphonie électrique se caractérise plutôt par la diffusion et la dérive des porteurs photogénérés vers une cellule voisine [19], [20]. Ceux-ci génèrent alors l'avalanche dans cette cellule voisine et le photon incident au SiPM est alors compté plus qu'une fois.

4.2.2 Tranchées d'isolement

Des tranchées avec des parois recouvertes d'une couche isolante (SiO_2 par exemple), situées autour des cellules photosensibles, permettent de réduire l'intensité de diaphonie en empêchant les porteurs photogénérés (et photons) d'accéder à une cellule voisine [19], [20].

Les tranchées sont des structures gravées dans le substrat qui séparent des composants d'un microsystème. L'isolation par tranchées est une technique très répandue dans l'industrie de

microfabrication pour diminuer les effets d'un phénomène parasite appelé « diaphonie » entre des composants optoélectroniques.

Le choix de gravure dans le procédé de formation des tranchées influence les caractéristiques structurales obtenues. Dans le cas d'une gravure dans un bain chimique, les tranchées formées peuvent avoir une forme en « V » à cause de la forte dépendance de la gravure à l'orientation des plans cristallins. Dans le cas d'une gravure dans un réacteur de DRIE, les tranchées formées sont verticales. Afin d'éliminer des étapes de gravure humide dans le procédé et, surtout, pour augmenter le facteur de remplissage des SiPM, la DRIE est préférée pour le projet. Les défis de formation des tranchées par DRIE sont les mêmes que pour la formation des TSV par DRIE (section 4.1.2), mais leur facteur de forme jumelé à leur grande ouverture font que les tranchées sont généralement plus faciles à former que les TSV.

CHAPITRE 5 MÉTHODOLOGIE

La méthodologie est divisée en trois sections traitant : des listes d'équipements utilisés, du nettoyage initial, puis des étapes des procédés de test. Pour des raisons de confidentialité, les modèles d'équipements, les noms de photorésines, la procédure de nettoyage et les valeurs exactes des paramètres de procédés de microfabrication constituent des éléments qui ne sont pas divulgués dans ce mémoire. Dans le texte, les termes vagues comme « quelques heures », « haute température », etc. sont donc utilisés volontairement.

5.1 Équipements utilisés

Cette section comporte les équipements utilisés pour les différentes catégories de procédés de fabrication (i.e. rinçage-séchage, photolithographie, CVD et oxydation thermique, gravure et caractérisation), puis leur description.

5.1.1 Rinçage-séchage

Des rinceurs centrifuges sont utilisés lors des étapes dites de « rinçage-séchage » pour rincer les tranches à l'eau déionisée, puis les sécher à l'azote.

5.1.2 Ressources pour les étapes de photolithographie

5.1.2.1 Équipements

Outre le rinçage-séchage, quatre étapes permettent la formation des masques de photorésine : dépôt de HMDS, dépôt de photorésine, photolithographie, puis développement. Ces étapes sont expliquées à la section 3.2. Le Tableau 5.1 relie ces étapes aux équipements utilisés. À ces étapes s'ajoute toujours un rinçage-séchage (section 3.2.6) et parfois aussi une photostabilisation aux rayons UV (section 3.2.8).

Tableau 5.1 : Liste d'équipements de photolithographie.

Étape (section)	Équipement
Dépôt de HMDS	Four HMDS
Dépôt de photorésine	Rail de dépôt
Photolithographie	« Stepper »
	Aligneur par contact
Développement	Rail de développement
Exposition UV	Photoréacteur UV

5.1.2.2 Résines

Deux sortes de résines sont utilisées pour faire les masques : A et B. La résine A est plus aqueuse et est donc appropriée pour la composition d'un masque mince. La résine B est plus visqueuse et est plutôt appropriée pour la composition d'un masque épais. Elles sont toutes les deux positives.

5.1.2.3 Réticules

Trois réticules différents sont utilisés pour produire les masques de résine par photolithographie. Deux sont utilisés dans le « stepper » pour former les tranchées (Figure 5.1b) et les TSV avant (Figure 5.1b). Le réticule de la Figure 5.1c a été utilisé dans le projet, mais il a été éventuellement remplacé par un masque d'aligneur par contact contenant exactement les mêmes motifs, mais 5 fois plus petits, car le « stepper » projette une image réduite d'un facteur 5 des motifs du réticule (voir section 5.1.6.3). Aussi, sur ce réticule (Figure 5.1c), la densité d'ouvertures était intentionnellement réduite à 25% au bord afin de pouvoir observer à quel point les TSV arrière rejoignent les TSV avant, c'est-à-dire en comparant la profondeur d'un TSV avant rejoint à celle d'un TSV avant pas rejoint.

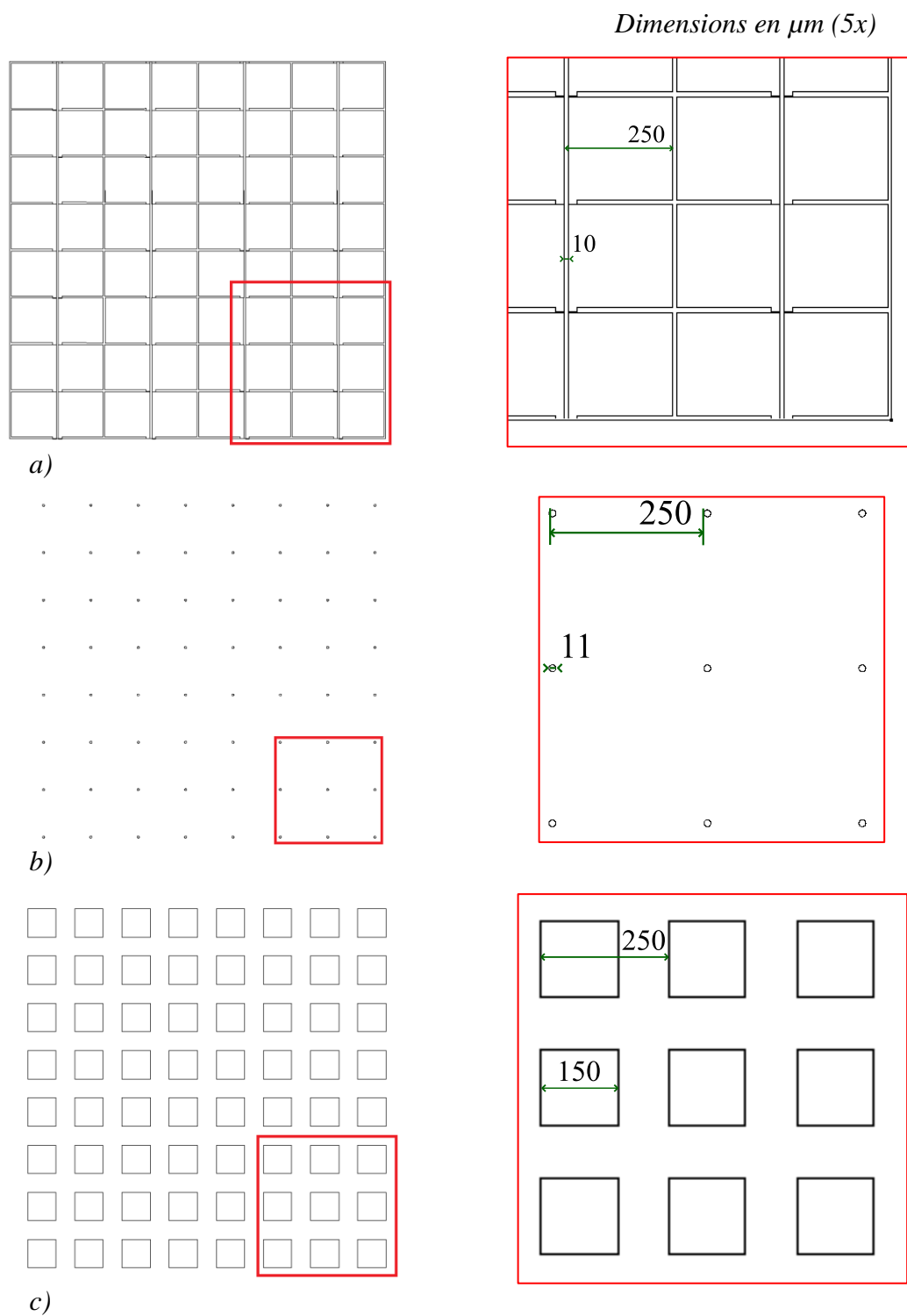


Figure 5.1 : Réticules de « stepper » pour a) les tranchées, b) les TSV avant et c) les TSV arrière.

À gauche, une vue d'ensemble et à droite, une vue agrandie de la partie encadrée.

Sur la Figure 5.1, les dimensions indiquées sont en microns. Elles correspondent à 5 fois ce qui doit être obtenu, étant donné que le « stepper » projette une image réduite d'un facteur 5 des motifs du réticule de photolithographie.

5.1.3 Ressources pour les étapes de CVD et d'oxydation thermique

Les étapes de dépôts et d'oxydation incluent la formation de couches de : polySi (polysilicium), Si_3N_4 , SiO_2 , TiN et W. Le Tableau 5.2 relie ces couches aux équipements utilisés.

Tableau 5.2 : Liste d'équipements de CVD et d'oxydation thermique.

Couche	Équipement
polySi	Tubes LPCVD
Si_3N_4	
SiO_2	Tube d'oxydation
	Barboteur d'eau
TiN et W	(Aucun disponible à Excelitas)

Le tube d'oxydation est utilisé pour les oxydations sèches et humides du silicium. Le barboteur d'eau n'est ajouté au système que pour le cas d'une oxydation humide.

5.1.4 Ressources pour les étapes de gravure

Le Tableau 5.3 associe les types de gravure aux équipements utilisés.

Tableau 5.3 : Liste d'équipements de gravure.

Type de gravure	Équipement
Humide	Bains chimiques
Plasma : RIE	Réacteur de RIE
Plasma : DRIE	Réacteur de DRIE
Plasma : décapage de résine	Réacteur à plasma O_2

5.1.5 Ressources pour la caractérisation

Trois outils de caractérisation sont utilisés pour le projet et sont décrits dans le Tableau 5.4. Dans ce tableau, SEM est un acronyme pour « microscope électronique à balayage ».

Tableau 5.4 : Liste d'outils de caractérisation et de leurs usages.

Outil de caractérisation	Usages
FRT	<ul style="list-style-type: none"> • Épaisseur et topographie de tranche; • Largeur et profondeur de motifs; • Épaisseur de couches minces.
SEM	Observations à haute résolution.
Microscope optique	Observations à basse résolution.

Éventuellement, des techniques de caractérisation de surface devront être mises en place, mais pour le cadre de ce projet, qui repose principalement sur la fabrication des structures, les trois outils de caractérisation du Tableau 5.4 sont suffisants pour étudier la forme des structures.

5.1.6 Descriptions courtes des équipements

Dans cette section, les équipements utilisés dans le laboratoire d'Excelitas sont décrits brièvement afin de mieux saisir la manipulation des tranches de silicium utilisées dans le projet.

5.1.6.1 Four HMDS

Voir section 3.2.2.

5.1.6.2 Rails de dépôt

Le rail de dépôt est équipé de 5 stations identifiées à la Figure 5.2. Chaque station est séparée par un bras robotique qui s'occupe de déplacer une tranche d'une station à la suivante. Un ordinateur permet de programmer les procédés de dépôt et de les activer. Le plateau de chargement permet d'accueillir un lot au complet, mais seulement une tranche peut se retrouver sur une station à la fois. À la station de la tournette de dépôt, le bras de distribution est relié par plusieurs tuyaux à différentes bouteilles de résine. L'envoi d'une résine s'effectue par l'entremise d'une pompe

propre à chaque tuyau qui pompe une quantité calibrée de résine. Pour s'assurer d'obtenir des procédés reproductibles, la plaque chauffante pour la cuisson douce est toujours maintenue à la même température, soit 120°C. La station de détente permet à la fin de laisser refroidir, à température ambiante, une tranche traitée durant quelques secondes avant qu'elle soit placée dans la cassette située sur le plateau de déchargement. Un refroidissement de cette façon permet d'avoir un meilleur contrôle du procédé.

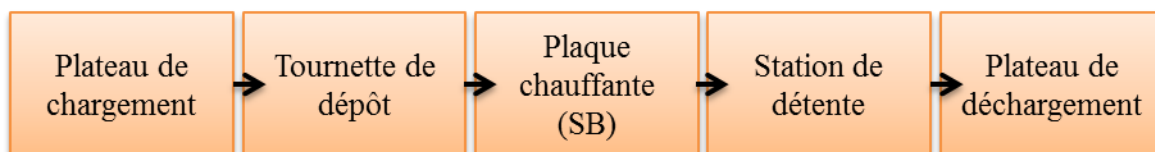


Figure 5.2 : Les 5 stations du rail de dépôt.

5.1.6.3 Stepper

Le « stepper » est une machine automatique de photolithographie par projection à haute résolution. Au lieu d'utiliser des masques avec un dessin complet de tous les motifs à exposer, les réticules (nom donné aux masques du « stepper ») ne possèdent typiquement qu'un seul champ contenant ces motifs. Le reste de l'espace d'un réticule peut contenir plusieurs champs de motifs associés à différents produits, ou à d'autres niveaux du même produit, des structures de test, des marques d'alignement, etc. Ceci permet d'économiser de l'espace de stockage et de l'argent par rapport à l'utilisation de masques réguliers. Pendant l'exposition, des « rideaux » cernent un champ requis pour le design et chaque position programmée à la surface de la tranche est alors exposée par la lumière qui traverse le réticule. La position précise de chaque champ est assurée par un système de positionnement par interférométrie et les spécifications du design souhaité sont programmées sur un ordinateur qui opère le « stepper ».

De plus, le « stepper » est équipé d'un système de lentilles permettant d'exposer des motifs de dimensions 5 fois inférieures à celles des motifs présents sur le réticule. Lors du design des réticules, il faut donc prendre en compte cette réduction en ayant des ouvertures de dimensions 5 fois supérieures à celles des motifs à exposer. Ceci permet de faciliter la fabrication des masques en augmentant la taille et la tolérance des dimensions critiques devant être imprimées, ce qui mène à un gain de résolution.

Finalement, l'alignement des tranches peut s'effectuer soit par détection du méplat, soit par deux motifs de reconnaissances situés de part et d'autre sur le bord des tranches. Cette dernière approche est plus précise, car pour chaque position exposée, le « stepper » repère d'abord les deux motifs de reconnaissance et corrige les désalignements roto-translationnels.

5.1.6.4 Aligneur par contact

L'aligneur par contact est muni de deux caméras placées de chaque côté du plateau d'exposition ou repose la tranche à traiter. Un plateau à vide pivotant maintient le masque de photolithographie en suspension par-dessus le plateau d'exposition.

Avant qu'une tranche ne soit installée, les caméras sont alignées vis-à-vis les motifs de reconnaissance placés de chaque côté du masque de photolithographie. Une image de ces motifs est alors capturée et gardée en fond d'écran avec une opacité réduite pour servir de référence lors de l'alignement des tranches. À ce moment, les positions des caméras sont gardées fixes pour tout le reste du procédé. Ensuite, la première tranche à traiter est posée sur le plateau d'exposition par un bras robotique. L'opérateur doit alors déplacer la tranche grâce à des vis de déplacements horizontaux et verticaux. L'opération est terminée lorsque les motifs de reconnaissance posés de chaque côté des tranches soient alignés à ceux retrouvés dans l'image latente et par conséquent, à ceux contenus sur le masque de photolithographie. Cette technique permet d'aligner des motifs d'une face d'une tranche vis-à-vis ceux de l'autre face.

Les longueurs d'onde d'émission sont sensiblement les mêmes qu'au « stepper », mais sont étalées sur un spectre plus large. Les procédés sont paramétrés et opérés à l'aide d'un ordinateur.

5.1.6.5 Rail de développement

Comme pour le rail de dépôt, le rail de développement est composé de plusieurs stations, chacune séparée par un bras robotique qui transporte une tranche d'une station à la suivante. Les 7 stations sont illustrées à la Figure 5.3. Les plaques chauffantes sont utilisées pour les cuissons post-exposition et forte. Elles sont toujours maintenues à la même température, soit 120°C pour la PEB et 130°C pour la HB. Le rail de développement est sur le même équipement que le rail de dépôt.

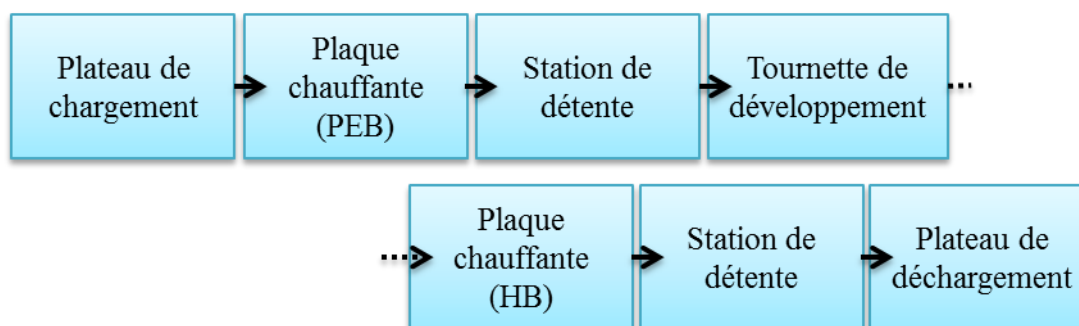


Figure 5.3 : Les 7 stations du rail de développement.

5.1.6.6 Rinceurs centrifuges

Les rinceurs centrifuges sont des machines permettant de rincer et sécher un lot à la fois. Pendant le processus de rinçage-séchage centrifuge, le lot tourne selon un axe transverse aux tranches. De l'eau déionisée est vaporisée sur les tranches qui sont ensuite séchées à l'azote chaud.

5.1.6.7 Photoréacteur UV

Le photoréacteur UV utilisé dans le projet est équipé d'une lampe au mercure et ne possède pas d'élément chauffant. La dose d'exposition est $0,95 \text{ mW/cm}^2$ à une longueur d'onde de 254 nm (DUV). L'absorption dans la résine B est élevée pour cette longueur d'onde. Pour des tranches 100 mm, la capacité maximale du photoréacteur est de 5 tranches à la fois. Un minuteur permet de déclencher et arrêter automatiquement l'exposition.

5.1.6.8 Tubes LPCVD

Les tubes de quartz pour les étapes de LPCVD sont placés horizontalement dans des fours cylindriques préchauffés à température d'opération. Une fois que les tranches sont introduites et que la pression d'opération est atteinte, les gaz sont éjectés dans le tube par des conduits qui y sont rattachés.

5.1.6.9 Tube d'oxydation et barboteur d'eau

Le tube d'oxydation pour les étapes d'oxydation thermique est composé de quartz et est placé horizontalement dans un four cylindrique préchauffé entre 400°C et 600°C avant que les tranches n'y soient insérées. Une fois que les tranches sont à l'intérieur, la température est graduellement élevée jusqu'à celle paramétrée pour l'opération. Des conduits d'azote et d'oxygène sont

connectés au tube : l'azote sert à pousser les molécules d'air indésirables loin des tranches, alors que l'oxygène sert à oxyder. La cinétique des gaz est différente sur les tranches situées aux extrémités du bateau qui les supporte. Ceci dit, pour obtenir une meilleure reproductibilité, les tranches traitées sont protégées par des tranches sacrificielles aux deux extrémités. Un barboteur d'eau peut être connecté au tube afin de procéder à une oxydation humide.

5.1.6.10 Bains chimiques

Les gravures humides sont effectuées dans des bains chimiques contenant des solutions souvent dangereuses. Des cassettes en téflon avec de long support pour la manipulation sont mises à la disposition des opérateurs qui doivent aussi être vêtus en conséquence.

5.1.6.11 Réacteur de RIE

Une configuration simpliste du réacteur de RIE est illustré à la Figure 3.14 et expliquée à la section 3.5.4. Le plateau, qui sert de cathode, supporte la tranche (par gravité). Une seule tranche ne peut se retrouver sur le plateau à la fois.

Le générateur de puissance au plateau est opéré à la haute fréquence de 13,56 MHz pour l'obtention d'un plasma dense. Les gaz sont envoyés par des conduits connectés à la chambre de gravure et sont dirigés et évacués vers le dessous des tranches. Tous les procédés sont paramétrés grâce à un ordinateur branché à l'équipement. Le réacteur de RIE utilisé est muni d'un spectromètre capable de mesurer la longueur d'onde émise par le plasma, qui dépend de sa composition. Ceci permet de détecter le changement de matériau qui se fait graver et donc, de poser un critère de fin d'attaque.

Pour maintenir la tranche à une température raisonnable, le plateau est refroidi par un système de conduits d'eau relié à un refroidisseur. Cette technique est suffisante pour des gravures qui ne durent que quelques minutes, ce qui est généralement le cas pour un procédé de RIE.

5.1.6.12 Réacteur de DRIE

Une configuration simpliste du réacteur de DRIE est illustrée à la Figure 3.18 et expliquée à la section 3.5.5. Le plateau, qui sert de cathode, supporte la tranche par force électrostatique. Une seule tranche ne peut se retrouver sur le plateau à la fois et une seule dimension de tranche est acceptée. Par exemple, si le plateau est configuré pour des tranches 150 mm, une tranche 100 mm

ne peut pas être traitée. Changer la configuration du plateau demande plusieurs heures d'efforts de la part de l'équipe de maintenance et provoque un arrêt de production, un temps de tests de qualification et des risques associés à l'ouverture à l'air libre du réacteur.

Le générateur de puissance au plateau (composante CCP) est opéré à la basse fréquence de 300 kHz, tandis que le générateur de puissance source au solénoïde (composante ICP) est opéré à la haute fréquence 13,56 MHz. Tous les gaz nécessaires à la DRIE sont envoyés en continu dans les tuyaux qui se ferment et s'ouvrent grâce à des débitmètres. Ces tuyaux sont connectés dans le haut du réacteur de DRIE pour que les gaz voyagent du haut de la chambre vers le bas, où se trouve la tranche à graver. Une pompe turbomoléculaire rejette le gaz hors de la chambre par-dessous le plateau. Tous les procédés sont paramétrés grâce à un ordinateur branché à l'équipement.

Pour maintenir la tranche à une température d'opération constante, de l'hélium est envoyé à deux endroits sous celle-ci : au centre et au bord de la tranche. À ces mêmes deux endroits, des capteurs de pressions mesurent la pression d'hélium sous la tranche. Ces pressions doivent correspondre à celles paramétrées. Si à un endroit, la pression mesurée est plus faible que celle paramétrée à cause d'une fuite d'hélium, le débit entrant d'hélium augmente pour réajuster la pression en l'augmentant. Plus la fuite d'hélium est importante, plus la pression mesurée est faible et donc, plus le débit entrant s'élève. Dans le cadre du projet, c'est ce débit d'hélium entrant qui est utilisé pour évaluer le critère d'arrêt de gravure. Il est possible de paramétrer un seuil de débit d'hélium entrant (critère d'arrêt) qui, lorsque dépassé, arrête automatiquement la gravure. La Figure 5.4 illustre les flux d'hélium. Les variables dans cette figure sont définies en-dessous.

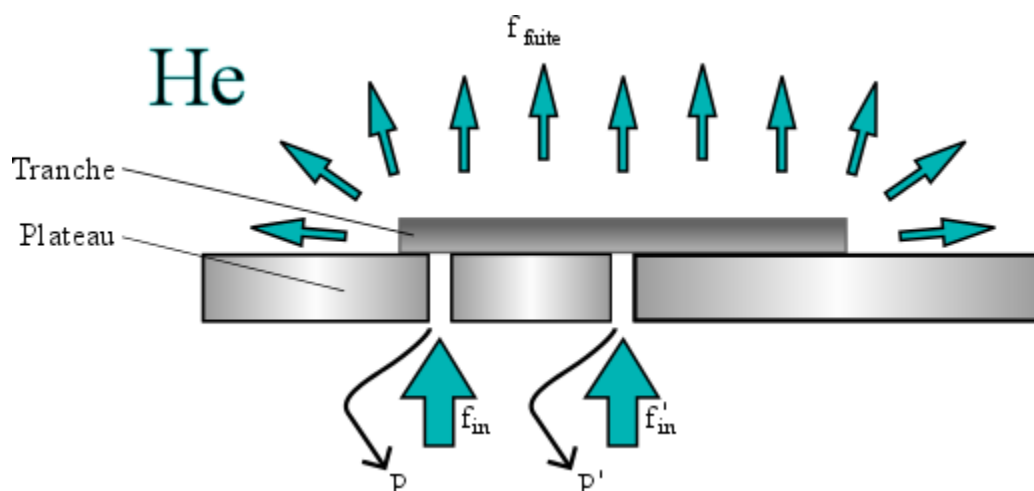


Figure 5.4 : Flux d'hélium envoyé sous une tranche dans le réacteur de DRIE du projet.

f_{fuite} : Débit de fuite d'hélium [*sccm*]

f_{in} : Débit d'hélium entrant au centre de la tranche [*sccm*] (enregistré en fonction du temps)

f'_{in} : Débit d'hélium entrant au bord de la tranche [*sccm*] (enregistré en fonction du temps)

P : Pression d'hélium au bord de la tranche [*Pa*] (paramétrée)

P' : Pression d'hélium au centre de la tranche [*Pa*] (paramétrée)

5.1.6.13 Réacteur à plasma O₂

Le réacteur à plasma est utilisé pour le décapage de la résine. Son fonctionnement complet n'a pas été étudié dans le cadre du projet. Brièvement, le plasma est généré par des micro-ondes. Il n'y a aucune composante CCP, donc la gravure effectuée est purement chimique (isotrope). Ainsi, ce sont les radicaux libres d'oxygène qui gravent de façon sélective la résine.

5.1.6.14 FRT

À Excelitas, nous appelons le système de métrologie de surfaces par le nom de la compagnie qui l'a fabriqué, c'est-à-dire « FRT », mais celui-ci devrait peut-être plus être appelé par son modèle : « MicroProf 200 ». Deux modes d'opération de l'appareil sont utilisés dans le projet grâce à un réflectomètre pour épaisseur de couche mince et un capteur de lumière blanche chromatique. L'échantillon se déplace sous les capteurs à l'aide d'un plateau amovible automatisé.

Le réflectomètre pour épaisseur de couche mince est utilisé pour mesurer des épaisseurs de couches minces. Un faisceau lumineux est dirigé perpendiculairement à la surface de l'échantillon. Une partie du faisceau est réfléchi à la surface de la couche mince et une autre partie à l'interface entre la couche mince et le substrat, générant ainsi un spectre d'interférence. Une courbe de réflectance est obtenue en mesurant le signal total réfléchi en fonction de la longueur d'onde. La réflectance dépend de l'épaisseur de la couche mince et de son indice de réfraction. La courbe est donc comparée à une courbe théorique obtenue pour une épaisseur donnée à partir des valeurs d'indice de réfraction. L'épaisseur de la couche est obtenue de manière itérative par l'appareil.

Le capteur de lumière blanche chromatique permet d'effectuer une caractérisation topographique des tranches. Une lumière blanche guidée par une fibre optique traverse un système de lentilles qui focalise chaque longueur d'onde à différentes longueurs focales sur l'échantillon. Le signal réfléchi est défocalisé (i.e. rayons mis parallèles) et est analysé par un spectromètre optique. Le spectre généré prend la forme d'une impulsion centrée à la longueur d'onde dont le point focal est à la surface de l'échantillon. Puisque chaque longueur d'onde correspond à un niveau de surface, un balayage en 2D de l'échantillon permet d'observer sa topographie.

5.1.6.15 Microscope électronique à balayage (SEM)

Le SEM (microscope électronique à balayage) utilisé est celui du laboratoire (CM)2 de l'école Polytechnique de Montréal. Il est utilisé dans le cadre d'inspection des microsystèmes par détection des électrons secondaires. Un faisceau d'électrons est envoyé sur l'échantillon. Un des effets d'interaction entre l'échantillon et ces électrons primaires est d'ioniser les atomes de l'échantillon et de libérer des électrons (analogue à l'ionisation d'une molécule de gaz, Figure 3.11). Puisque seuls les électrons libres qui sont suffisamment proches de la surface du substrat (quelques nm de la surface [77]) sont ceux qui s'échappent de l'échantillon, alors leur position initiale et donc la topographie de l'échantillon peut être déterminée précisément. Un système de détection permet de les détecter et de les compter.

5.1.6.16 Microscope optique

Les microscopes optiques utilisés dans le projet sont des modèles réguliers. Ils sont munis de plusieurs objectifs et de lentilles de grossissements différents. Des filtres de couleurs, des modes de projection et des lentilles polarisées sont aussi disponibles.

5.2 Nettoyage initial

Le nettoyage initial permet de retirer les contaminants logés sur les tranches de silicium et de graver toute la couche d'oxyde natif présente. Pour le projet, le nettoyage des tranches est effectué grâce à un procédé régulier d'Excelitas confidentiel qui n'est pas présenté dans ce mémoire.

5.3 Étapes du procédé de test

Dans le vocabulaire que nous utilisons dans le cadre du projet, un « procédé de test » est une séquence d'étapes qui reproduit partiellement le procédé de microfabrication d'un dispositif donné. Ceci permet de trouver les bons paramètres de procédé tout en économisant du temps et de l'argent.

Le procédé de test utilisé dans le cadre du projet permet d'optimiser les étapes suivantes :

- formation des tranchées d'isolement verticales;
- formation des TSV;
- remplissage des TSV par du polySi (polysilicium), suivi par leur vidage;
- remplissage des TSV par du W (tungstène);

Les sous-objectifs du procédé de test sont placés en ordre de réalisation dans l'organigramme de la Figure 5.5. Les différentes étapes de microfabrication du procédé de test sont présentées à la Figure 5.6 et sont détaillées dans les sections qui suivent (sections 5.3.1–5.3.3). Les couleurs de l'organigramme peuvent être comparées avec celles des encadrés de la Figure 5.6.

Il est à mentionner que le vidage des TSV et leur remplissage par du W n'ont pas pu être effectuées (voir section 6.9).

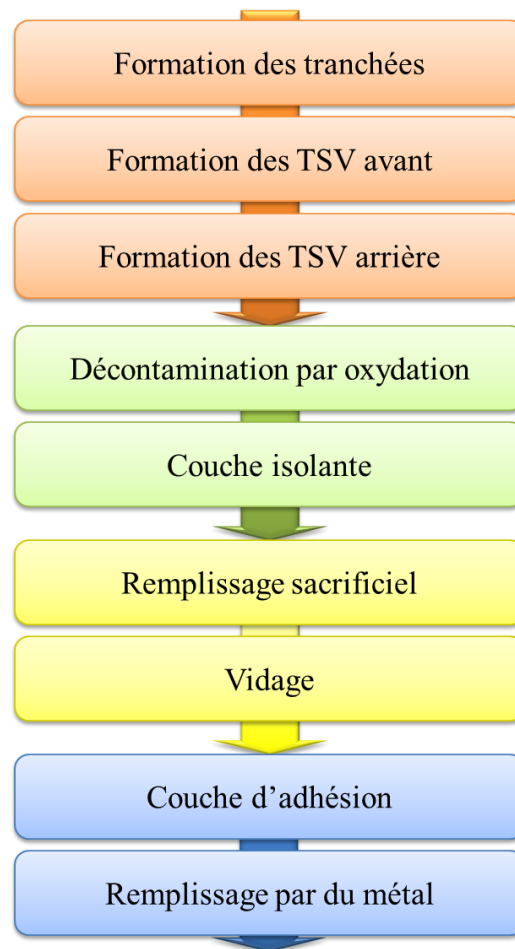


Figure 5.5 : Organigramme des sous-objectifs du procédé de test.

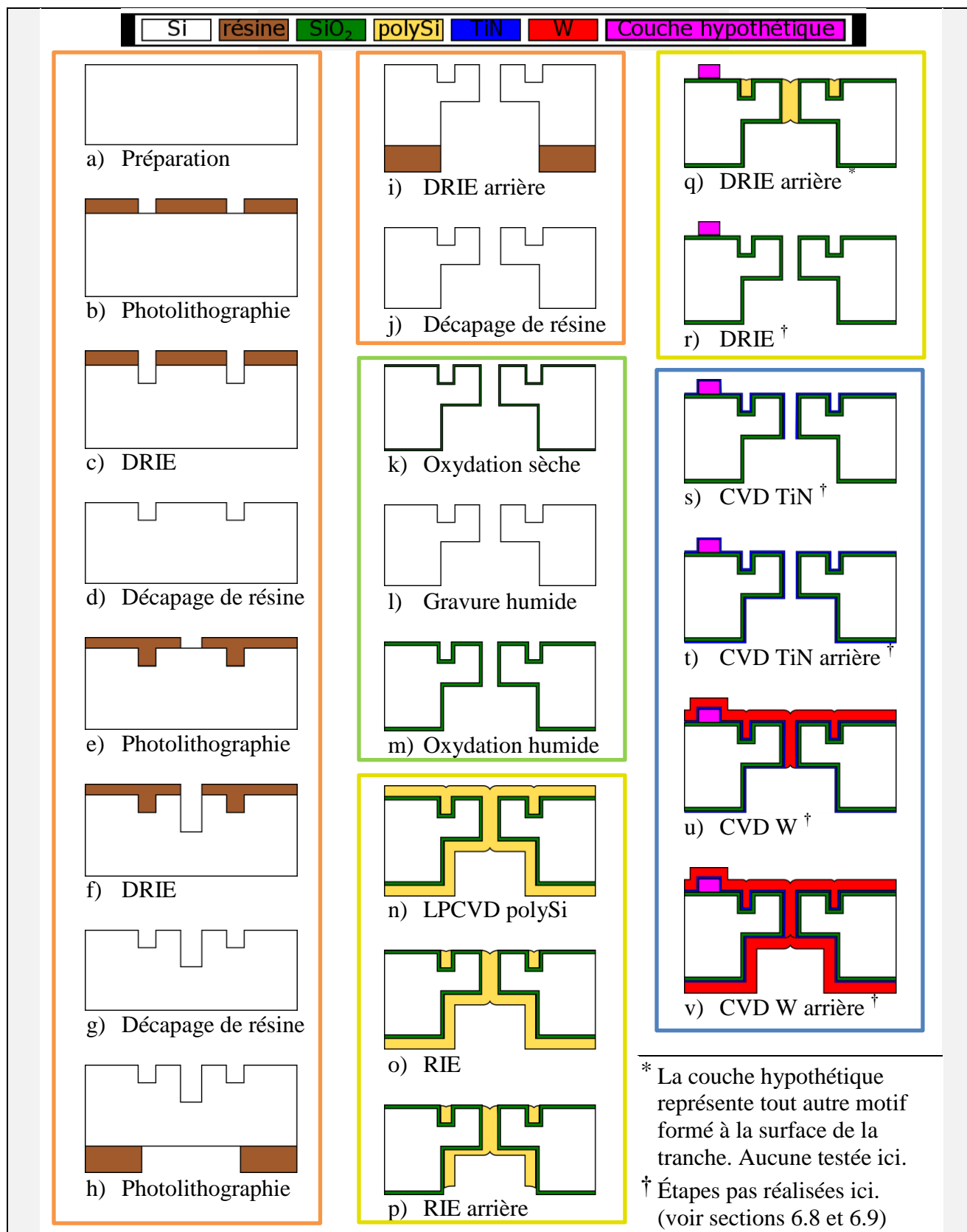


Figure 5.6 : Les 22 étapes de microfabrication du procédé de test.

5.3.1 Formation des tranchées et des TSV (étapes a - j)

La formation des tranchées et des TSV comprend des étapes de DRIE, de dépôt de résine et de RIE, dont les paramètres sont résumés respectivement dans le Tableau 5.5, le Tableau 5.6 et le Tableau 5.7. La méthodologie est expliquée ici en référence à la Figure 5.7.

Tableau 5.5 : Paramètres des différentes recettes de DRIE.

# Recette	Temps total (s)	Phase Bosch*	Temps de cycle (s)	Pression (Pa)	Puissance source (W)	Puissance plateau (W)
1 (tranchées)	2min37s	A	▼	▲ ▲	▶	0
		B	▲	▶	▼ ▼	▶
		C	▶	▼	▼ ▼	0
2 (TSV avant)	20min00s	A	▼	▲ ▲	▶	0
		B	▲	▼	▼ ▼	▲ ▲
		C	▶	▼	▼ ▼	0
3 (TSV arrière)	~1h20min [†]	A	▼	▲ ▲	▲ ▲	0
		B	▲ ▲	▶	▲	▼
		C	▼	▼	▲	0

* Passivation (A), retrait de polymère (B), gravure (C)

[†] Programmé pour un maximum de 1h30min. Arrêt de gravure 2 minutes après que le débit entrant d'hélium au centre de la tranche dépasse un certain seuil (critère d'arrêt).

Les symboles ▼, ▶ et ▲ désignent respectivement une basse, moyenne et haute valeur, relativement aux autres valeurs de la **même colonne** (donc du même paramètre).

Le gaz de passivation est du C₄F₈ (faible débit) et le gaz de gravure est du SF₆ (haut débit).

Tableau 5.6 : Paramètres des différentes recettes de dépôt.

# Recette	Phase 0	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4
1 (tranchées)	Dépôt central Résine A @ 400 tr/min	16.3 s @ 1700 tr/min	5 s @ 2500 tr/min		
2 (TSV avant)	Dépôt radial Résine A @ 160 tr/min	15 s @ 0 tr/min	30 s @ 500 tr/min	25 s @ 0 tr/min	30 s @ 1700 tr/min
3 (TSV arrière)	Dépôt central Résine B @ 400 tr/min	25 s @ 2000 tr/min	17 s @ 4500 tr/min	10 s @ 2000 tr/min	10 s @ 3500 tr/min

Les épaisseurs de résine obtenues sont respectivement (#1-3) : 1,6 μm , 2,8 μm et 8,7 μm .
L'abréviation « tr/min » signifie « tours par minute ».

Tableau 5.7 : Paramètres de RIE pour la planarisation du polySi sacrificiel.

Temps (s)	SF ₆ (sccm)	Pression (Pa)	Puissance plateau (W)
~135*	▲ ▲	▶	▲

* Le temps de RIE nécessaire varie avec les tranches. Après 135 s de gravure, la tranche est soumise à une lumière rasante dans une boîte noire. Ceci permet de voir si le polySi est bien aplani en distinguant les parties rugueuses de la surface. Si la planarisation n'est pas complétée, la tranche repasse en RIE pendant 15 s de plus. Ce cycle se répète jusqu'à ce que la planarisation soit complétée. Éventuellement, une recette de détection de fin d'attaque par spectrométrie devra être faite afin d'automatiser la gravure.

Les symboles ▼, ▶ et ▲ désignent respectivement une basse, moyenne et haute valeur, relativement aux autres valeurs partageant le **même titre de colonne** (donc du même paramètre) dans le Tableau 5.9 (d'autres recettes de RIE).

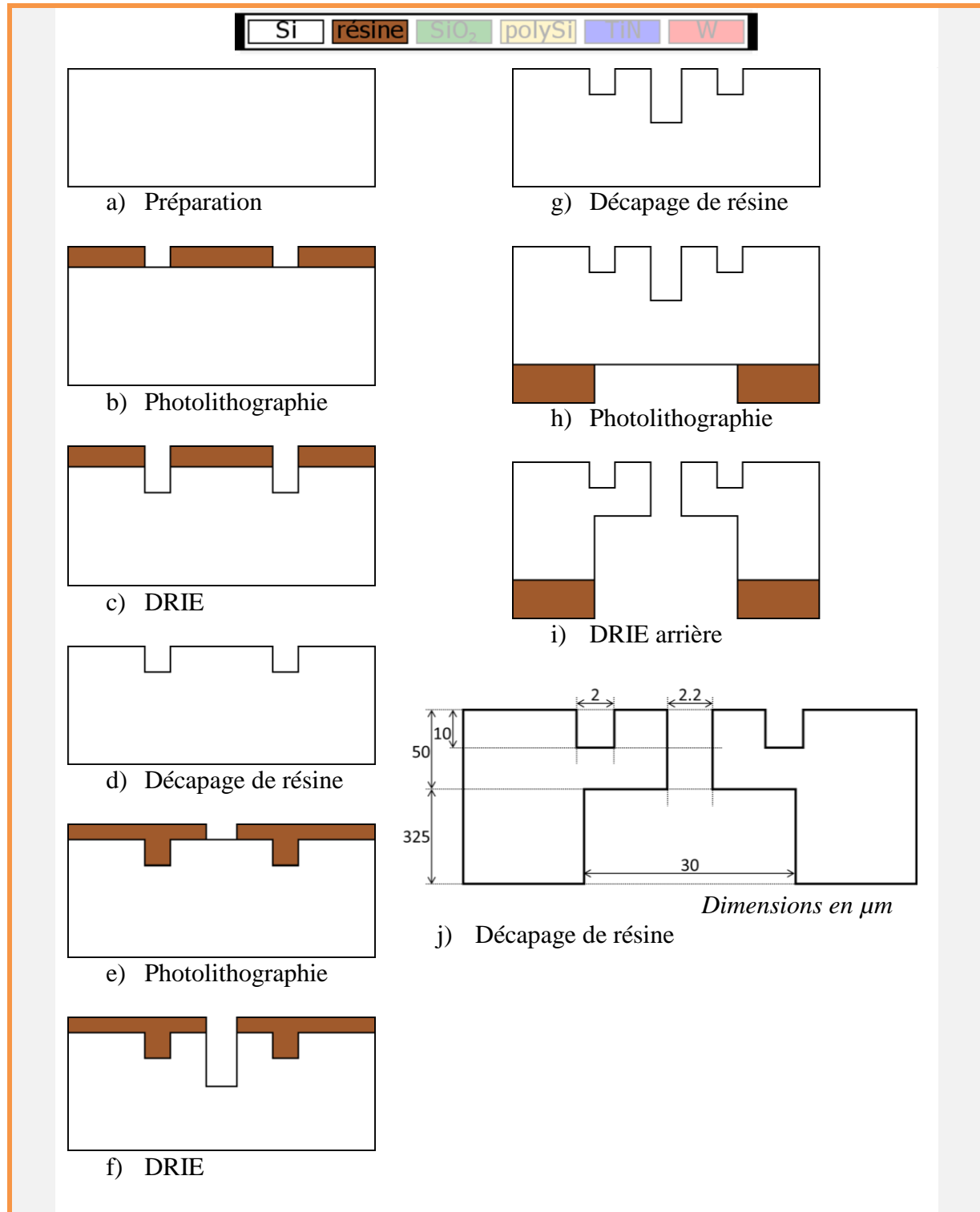


Figure 5.7 : Étapes de microfabrication du procédé de test ayant pour but de tester la formation des tranchées et des TSV.

Pour tester la formation des tranchées, des TSV avant et des TSV arrière de façon indépendante, c'est-à-dire sans aucune autre structure, les étapes identifiées dans le Tableau 5.8 sont réalisées dans l'ordre, sur des tranches à part.

Tableau 5.8 : Étapes de formation des structures formées indépendamment.

Structure formée indépendamment	Étapes à suivre en référence à la Figure 5.7.
Tranchées	a, b, c
TSV avant	a, e, f
TSV arrière	a, h, i

Voici la description de chaque étape de la Figure 5.7.

a) Préparation

Numéroter au laser et nettoyer les tranches de silicium.

b) Photolithographie : masque pour les tranchées

1. Appliquer du HMDS en phase gazeuse dans un four HMDS.
2. Déposer 1.6 μm de résine positive A sur toute la surface grâce à une tournette en suivant les étapes de la recette #1 du Tableau 5.6. Procéder ensuite à une cuisson douce de 120 °C à proximité pendant 50 s pour faire évaporer le solvant contenu dans la résine.

La phase 1 sert à atteindre l'épaisseur voulue sur toute la surface de la tranche. La phase 2 sert à retirer le surplus de résine non figée accumulée sur le bord en expulsant celle-ci hors de la tranche à grande vitesse.

3. Exposer au « stepper » avec le réticule de la Figure 5.1a.
4. Procéder à une cuisson post-exposition à 120°C à proximité pendant 50 s. Développer ensuite au développeur. Procéder ensuite à une cuisson forte de 130°C à proximité pendant 70 s.
5. Rincer et sécher au rinceur centrifuge pour retirer les contaminants et résidus de développeur.

c) DRIE : formation des tranchées

Graver par DRIE à travers 10 μm de silicium au plasma SF_6 avec les paramètres de la recette #1 du Tableau 5.5.

d) Décapage de résine

Décaper au plasma O_2 , puis rincer et sécher au rinceur centrifuge pour retirer les contaminants.

e) Photolithographie : masque pour les TSV avant

1. Appliquer du HMDS en phase gazeuse dans un four HMDS.
2. Déposer 2,8 μm de résine positive A sur toute la surface grâce à une tournette en suivant les étapes de la recette #2 du Tableau 5.6. Procéder ensuite à une cuisson douce de 120°C à proximité pendant 50 s pour faire évaporer le solvant contenu dans la résine.

Le dépôt de la résine (phase 0) se fait dynamiquement en partant du centre vers le bord de la tranche. Simultanément, la tranche tourne lentement pour permettre à la résine de s'étendre sur toute la surface, mais sans trop s'amincir. Une fois déposée, la résine contient encore beaucoup de solvant qui la rend plus liquide qu'à la fin du procédé, où la quantité de solvant évaporé devient plus importante. La phase 1 est statique (sans rotation) et sert à faire pénétrer cette résine liquide dans les tranchées pour bien recouvrir leurs parois et leur fond. La phase 2 sert ensuite à atteindre l'épaisseur voulue sur toute la surface de la tranche. La phase 3, encore statique, sert cette fois à laisser le temps au solvant de s'évaporer pour empêcher un amincissement important à la phase 4. La phase 4 sert finalement à retirer le surplus de résine non figée accumulée sur le bord en expulsant celle-ci hors de la tranche à grande vitesse.

3. Exposer au « stepper » avec le réticule de la Figure 5.1b.
4. Procéder à une cuisson post-exposition à 120°C à proximité pendant 50 s. Développer ensuite au développeur. Procéder ensuite à une cuisson forte de 130°C à proximité pendant 70 s.
5. Rincer et sécher au rinceur centrifuge pour retirer les contaminants et résidus de développeur.
6. Procéder à la photostabilisation dans le photoréacteur UV pendant 1000 s.

f) DRIE : formation des TSV avant

Graver par DRIE à travers 50 μm de silicium au plasma SF_6 avec les paramètres de la recette #2 du Tableau 5.5.

g) Décapage de résine

Décaper au plasma O_2 , puis rincer et sécher au rinceur centrifuge pour retirer les contaminants.

h) Photolithographie : masque pour les TSV arrière

1. Appliquer du HMDS en phase gazeuse dans un four HMDS.
2. Déposer 8,7 μm de résine positive B sur toute la surface grâce à une tournette en suivant les étapes de la recette #3 du Tableau 5.6. Procéder ensuite à une cuisson douce de 120°C à proximité pendant 180 s pour faire évaporer le solvant contenu dans la résine. La descente de la tranche vers la plaque chauffante doit être lente pour permettre au solvant à l'intérieur de la résine de s'évaporer avant qu'une croûte qui l'en empêche ne se forme à sa surface.

La phase 1 sert à atteindre l'épaisseur voulue sur toute la surface de la tranche. La phase 2, rotation très rapide, sert ensuite à mieux uniformiser la résine. Subséquemment, la phase 3, statique, permet de donner plus de temps au solvant de s'évaporer tout en maintenant l'épaisseur voulue. La phase 4 sert finalement à retirer le surplus de résine non figée accumulée sur le bord en expulsant celle-ci hors de la tranche à grande vitesse.

3. Exposer à l'aligneur par contact avec le réticule de la figure Figure 5.1c.
4. Attendre une heure pour laisser l'humidité dans la salle blanche participer à la photoréaction.
5. Procéder à une cuisson post-exposition à 120°C à proximité pendant 150 s. Développer ensuite au développeur. D'après les spécifications de la résine B, aucune cuisson forte n'est nécessaire.
6. Rincer et sécher au rinceur centrifuge pour retirer les contaminants et résidus de développeur.
7. Procéder à la photostabilisation dans le photoréacteur UV pendant 1000 s.

i) DRIE arrière : formation des TSV arrière

Graver par DRIE l'arrière des tranches à travers le silicium au plasma SF_6 avec les paramètres de la recette #3 du Tableau 5.5 de sorte à ce que les TSV arrière rejoignent les TSV avant.

j) Décapage de résine

Décaper au plasma O_2 , puis rincer et sécher au rinceur centrifuge pour retirer les contaminants.

5.3.2 Décontamination et oxydation des tranches (étapes j - m)

La décontamination consiste à d'abord oxyder les tranches, puis à retirer subséquemment le SiO_2 formé par gravure humide. Finalement, une autre oxydation s'ensuit, mais pour former une couche d'oxyde plus épaisse qui elle, subsistera pendant tout le reste du procédé. Cette combinaison oxydation-gravure sert à décontaminer les tranches des résidus métalliques et de ceux polymériques. Grâce à l'oxydation, nous nous assurons de n'avoir aucun polymère à la fin.

Les étapes de décontamination sont expliquées ici, en référence à la Figure 5.7.

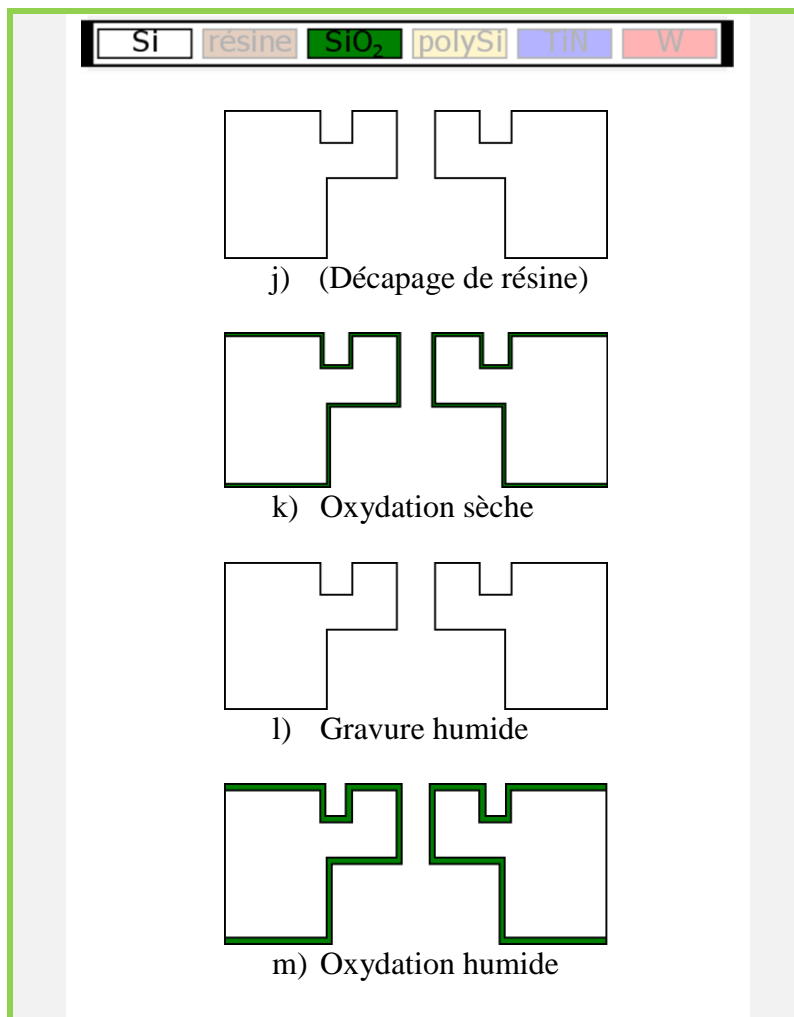


Figure 5.8 : Étapes de microfabrication du procédé de test ayant pour but de décontaminer et tester l'oxydation des tranches.

Voici la description de chaque étape de la Figure 5.8.

j) (Décapage de résine)

Résultat de la section 5.3.1.

k) Oxydation sèche : oxyde sacrificiel

Procéder à une oxydation sèche dans un tube de quartz à haute température pendant quelques heures, afin d'obtenir une couche de 100 nm de SiO_2 .

l) Gravure humide : retrait de l'oxyde sacrificiel

Retirer l'oxyde en baignant les tranches dans une solution de BOE 6:1 pendant quelques minutes.

m) Oxydation humide

Procéder à une oxydation humide dans un tube de quartz relié à un barboteur d'eau à haute température pendant quelques heures, afin d'obtenir une couche de 540 nm de SiO_2 .

5.3.3 Remplissage par du polySi (étapes m - p)

Pour remplir les TSV (et les tranchées) par du polysilicium, celui-ci est déposé sur les deux côtés des tranches par LPCVD. Une planarisation s'ensuit par RIE. Ce polysilicium aplani sert à permettre, sans les perturber, les dépôts de couches subséquentes dans le procédé de microfabrication des cellules de SiPM pour la formation des lignes de résistance et des lignes de métal. Les étapes en lien avec le remplissage par du polysilicium sont expliquées ici en référence à la Figure 5.9.

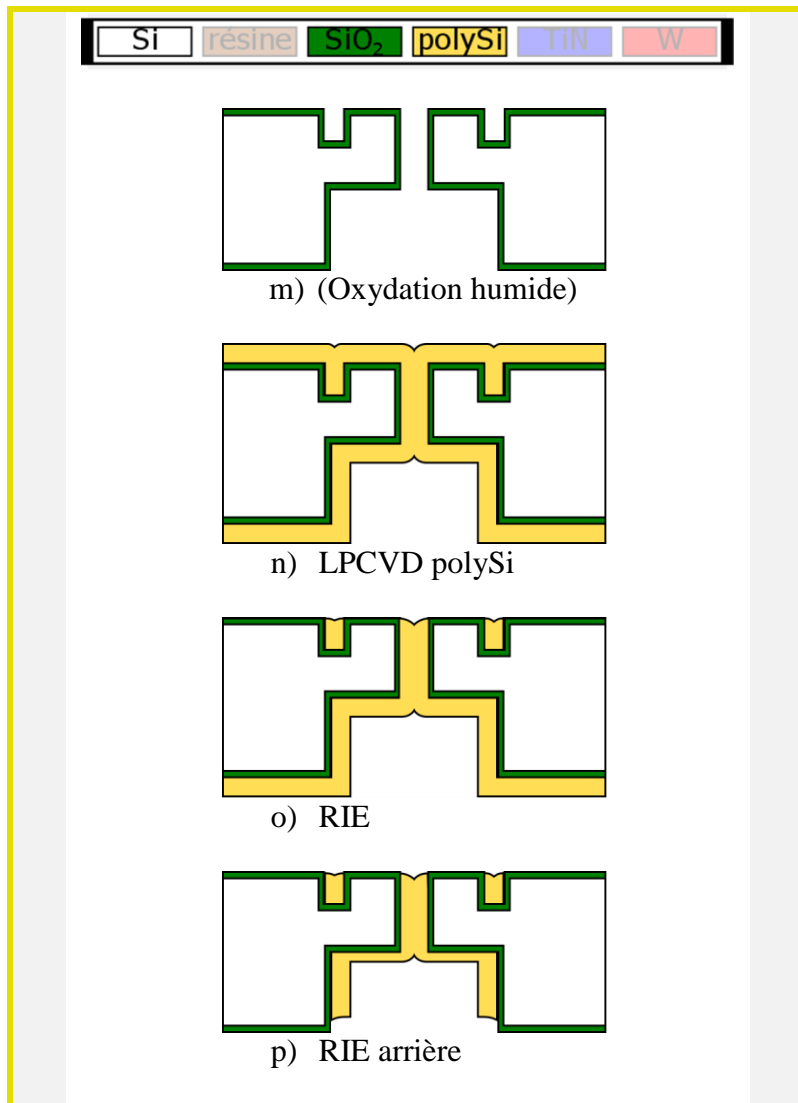


Figure 5.9 : Étapes de microfabrication du procédé de test ayant pour but de tester le remplissage des TSV par du polysilicium sacrificiel et leur vidage.

Voici la description de chaque étape de la Figure 5.9.

m) (Oxydation humide)

Résultat de la section 5.3.2.

n) LPCVD polySi : remplissage

Déposer 2 μm de polysilicium sur les deux côtés des tranches par LPCVD à haute température pendant quelques heures.

o) RIE : planarisation avant

Graver par RIE à travers 2 μm de polySi au plasma SF_6 avec les paramètres de la recette du Tableau 5.7.

p) RIE arrière : planarisation arrière

Graver par RIE l'arrière des tranches à travers 2 μm de polySi au plasma SF_6 avec les paramètres de la recette du Tableau 5.7.

Le polySi aplani permet au procédé de test d'être compatible avec le procédé de microfabrication des cellules de SiPM, puisqu'il permet d'effectuer les dépôts de couches sur la face avant pour la formation des lignes de résistance et des lignes de métal, comme illustré à la Figure 5.6. C'est donc ici, avant le vidage, que ces lignes (motifs) devraient être formées dans un éventuel procédé de microfabrication final.

5.4 Vidage et remplissage par du tungstène

Finalement, le polysilicium est retiré par DRIE, puisque les structures doivent être remplies par du tungstène. C'est d'ailleurs pourquoi le polysilicium est dit « sacrificiel ». Le tungstène est le métal choisi dans le procédé de test pour faire passer le courant électrique généré suite à l'absorption d'un photon dans une cellule de SiPM. Pour que le tungstène adhère bien aux structures et pour empêcher toute diffusion à travers l'oxyde, une couche de TiN doit d'abord être déposée.

De telles étapes n'ont pas pu être réalisées dans le cadre du projet (voir section 6.9), mais devront être testées dans le futur.

5.5 Formation des tranchées avec couches de diélectriques

Dans le procédé de microfabrication des cellules de SiPM, des couches de diélectriques se retrouvent à la surface des tranches. Celles-ci sont constituées dans l'ordre suivant, à partir de la surface des tranches : oxyde, nitrure, polysilicium, nitrure (voir Figure 5.10). La présence de telles couches nécessite alors des étapes de RIE chaque fois qu'une étape de DRIE est requise pour la gravure des tranchées et des TSV. Ainsi, un des défis qui s'imposent est le suivant : le réacteur de RIE nécessaire à la gravure de couches de nitrure et de polysilicium doit, selon les

règles établies par Excelitas, être exempt de toute contamination au métal. Cependant, une fois qu'une tranche a subi une DRIE, celle-ci est considérée contaminée au métal. Il est donc interdit de faire passer une tranche gravée par DRIE sur ce réacteur de RIE. Dans le procédé final, avec l'intégration des tranchées et des TSV, il faudrait donc utiliser exclusivement des réacteurs de RIE qui acceptent la contamination au métal ou trouver une solution pour décontaminer les tranches chaque fois que cela s'impose.

Toutefois, des tests avec des couches de diélectriques ont quand même pu être effectués sur la formation des tranchées. Les paramètres de RIE utilisés se trouvent au Tableau 5.9. La méthodologie pour la formation des tranchées avec présence de couches de diélectriques est expliquée ici en référence à la Figure 5.10.

Tableau 5.9 : Paramètres des différentes recettes de RIE pour graver la couche de diélectriques.

# Recette	Temps total (s)	SF ₆ (sccm)	CHF ₃ (sccm)	He (sccm)	Pression (Pa)	Puissance plateau (W)
1	Partie 1 : 40	▶	0	0	▼	▼
	Partie2 ~65 + 7 *	▼	▲	0	▶	▶
2	100	▲	▼	†	▲ ▲ ▲	▲ ▲ ▲

* Arrêt de gravure 7 secondes après que la couche de Si₃N₄ soit détectée par spectrométrie.

† Le débit de He est beaucoup plus élevé que celui du SF₆ qui lui, est toujours plus élevé que celui du CHF₃.

Les symboles ▼, ▶ et ▲ désignent respectivement une basse, moyenne et haute valeur, relativement aux autres valeurs de la **même colonne** (donc du même paramètre).

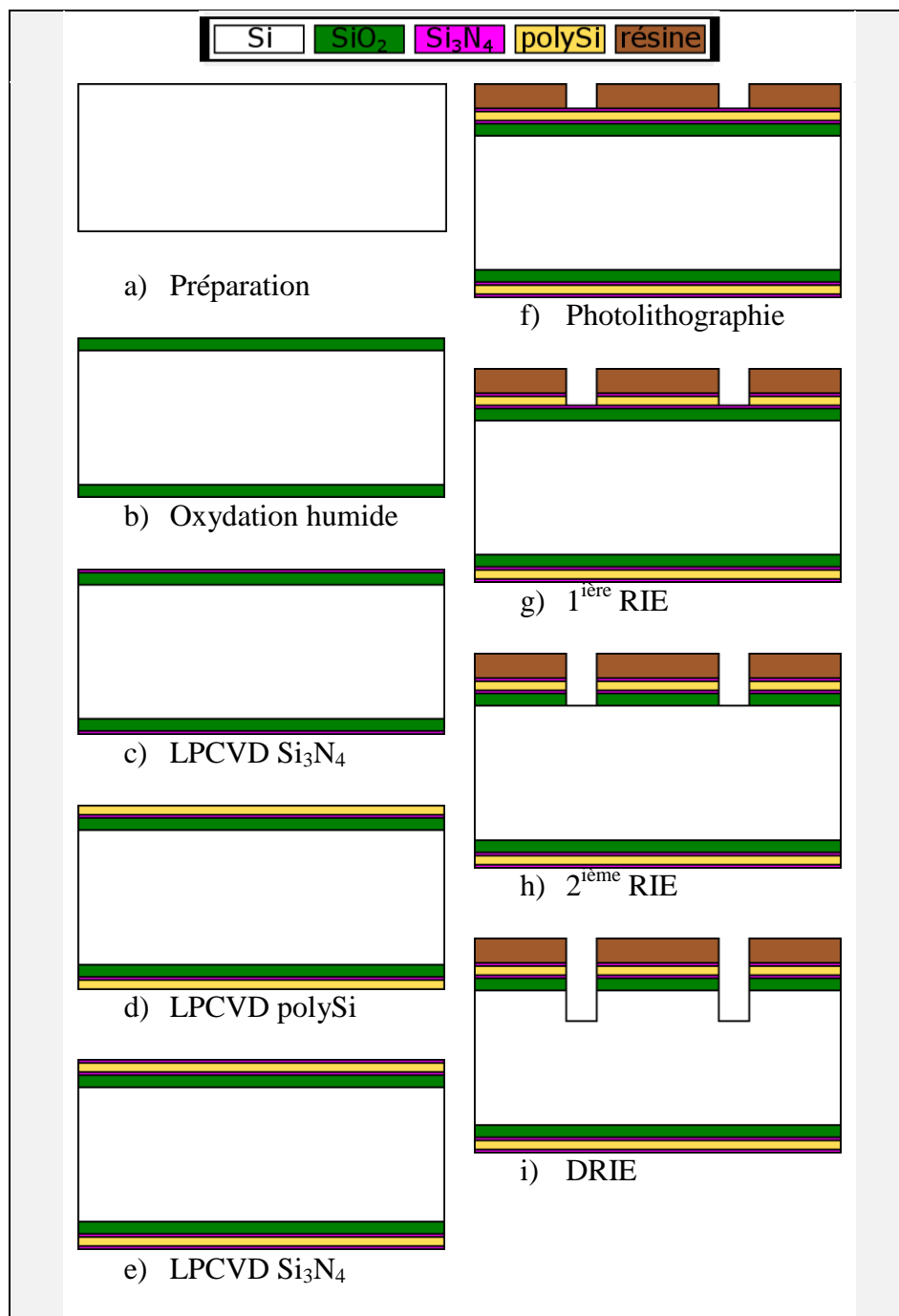


Figure 5.10 : Étapes de microfabrication du procédé de test ayant pour but de tester la formation des tranchées avec la présence de couches de diélectriques.

Voici la description de chaque étape de la Figure 5.10.

a) Préparation

Identique à l'étape a) de la section 5.3.1.

b) Oxydation humide

Procéder à une oxydation humide dans un tube de quartz relié à un barboteur d'eau à haute température pendant quelques heures, afin d'obtenir une couche de 540 nm de SiO_2 .

c) LPCVD Si_3N_4

Déposer du Si_3N_4 sur les deux côtés des tranches par LPCVD à haute température pendant quelques minutes.

d) LPCVD polySi

Déposer du polySi sur les deux côtés des tranches par LPCVD à haute température pendant quelques minutes.

e) LPCVD Si_3N_4

Déposer du Si_3N_4 sur les deux côtés des tranches par LPCVD à haute température pendant quelques minutes.

f) Photolithographie : masque pour les tranchées

Identique à l'étape b) de la section 5.3.1.

g) 1^{ière} RIE

Graver par RIE à travers les couches de Si_3N_4 et de polySi avec les paramètres de la recette #1 du Tableau 5.9. La première et la deuxième partie de la gravure servent respectivement à graver la première couche de Si_3N_4 et le polySi. Du CHF_3 est ajouté au plasma pendant la gravure du polySi pour former une mince couche de polymère sur les parois du polySi, permettant d'obtenir un profil plus droit.

h) 2^{ième} RIE

Graver par RIE à travers les couches de Si_3N_4 et de SiO_2 avec les paramètres de la recette #2 du Tableau 5.9.

i) DRIE : formation des tranchées

Identique à l'étape f) de la section 5.3.1.

CHAPITRE 6 RÉSULTATS, ANALYSES ET DISCUSSIONS

Cette section se sépare en divers éléments du procédé de test. Il est d'abord question des tranchées, des TSV avant et des TSV arrière formés indépendamment, puis de leur assemblage, c'est-à-dire leur formation ensemble sur des mêmes tranches de silicium, en suivant le procédé de test tel que décrit au Chapitre 5. Ensuite, le remplissage des structures par du polySi est présenté, suivi de commentaires sur leur vidage. Le remplissage des TSV par du W est finalement abordé. Au début de chacun de ces éléments, les résultats espérés sont d'abord mis en évidence pour ensuite interpréter l'écart entre l'objectif et ce qui est obtenu et finalement suggérer des solutions.

6.1 Tranchées d'isolement verticales

Pour caractériser les tranchées, le microscope optique et le SEM sont utilisés. Les résultats présentés ici sont : les tranchées obtenues pour deux temps totaux de gravure différents et les conséquences de l'ajout de couches de diélectriques sur leur formation.

6.1.1 Résultat espéré

Les tranchées d'isolement doivent être droites et respecter les dimensions illustrées à la Figure 6.1. Sur cette même figure, les scallops sont volontairement présentées, puisque le procédé Bosch est utilisé pour la DRIE.

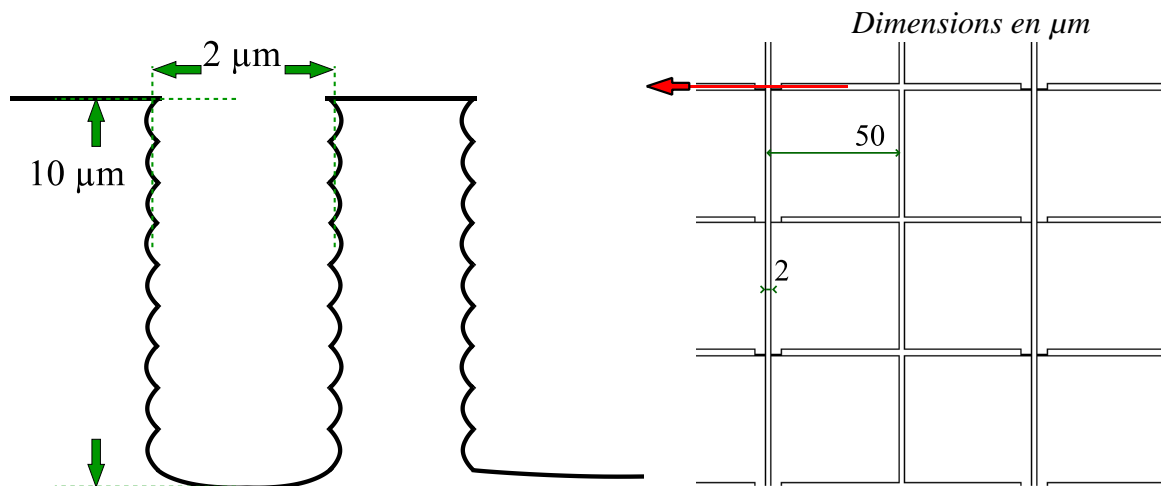


Figure 6.1 : Tranchées espérées, vue de profil (gauche) et vue de surface (droite).

Ces spécifications doivent être les mêmes tout au long du procédé et il est donc important pendant la gravure des TSV avant que la résine protège bien les tranchées (section 6.4.2).

6.1.2 Formes et profondeurs pour deux temps de gravure totaux différents

Avant de trouver que le temps nécessaire pour graver $10\text{ }\mu\text{m}$ de profondeur était de 2min37s (157 s) tel qu'indiqué au Tableau 5.5, un premier temps de gravure total a été essayé : 2min14s (134 s). Ce temps a été calculé suite à une interpolation linéaire de la profondeur en fonction du temps pour une autre recette d'Excelitas. Le temps nécessaire pour la gravure à travers $10\text{ }\mu\text{m}$ a donc ensuite pu être calculé à partir du résultat obtenu expérimentalement (calculs (6.1) à (6.5)). Les images de profil prises au SEM pour les deux temps totaux de gravure sont présentées à la Figure 6.2. La Figure 6.2b montre aussi que les tranchées peuvent être formées même en présence des couches de diélectriques. La Figure 6.3 représente une coupe longitudinale des tranchées pour mettre en valeur le profil des parois.

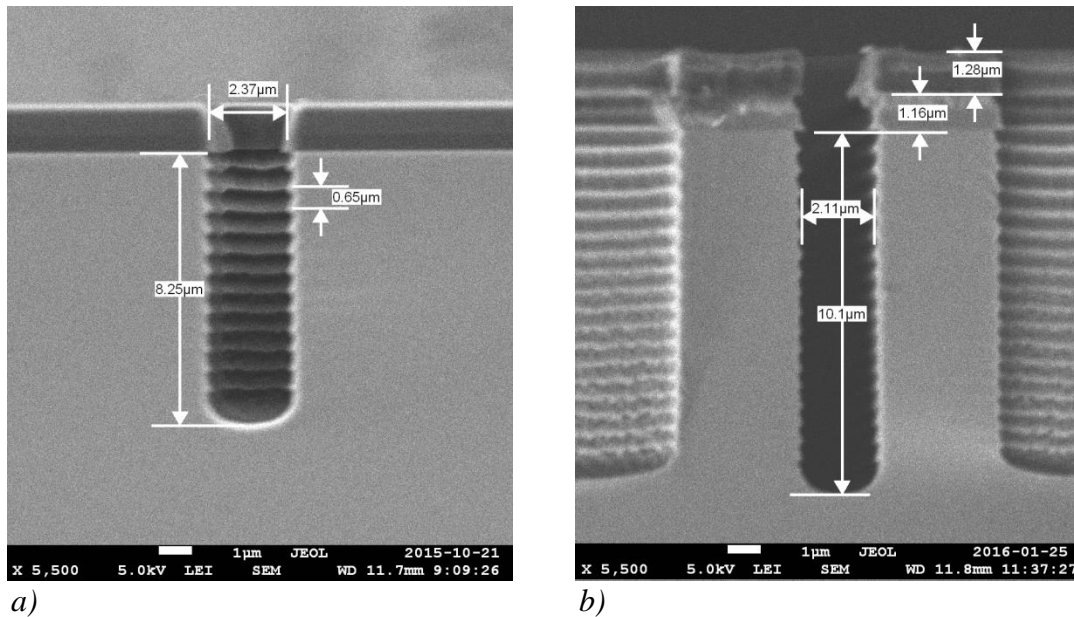


Figure 6.2 : Tranchées obtenues pour des temps de DRIE de a) 2min14s (sans couches de diélectriques) et b) 2min37s (avec couches de diélectriques).

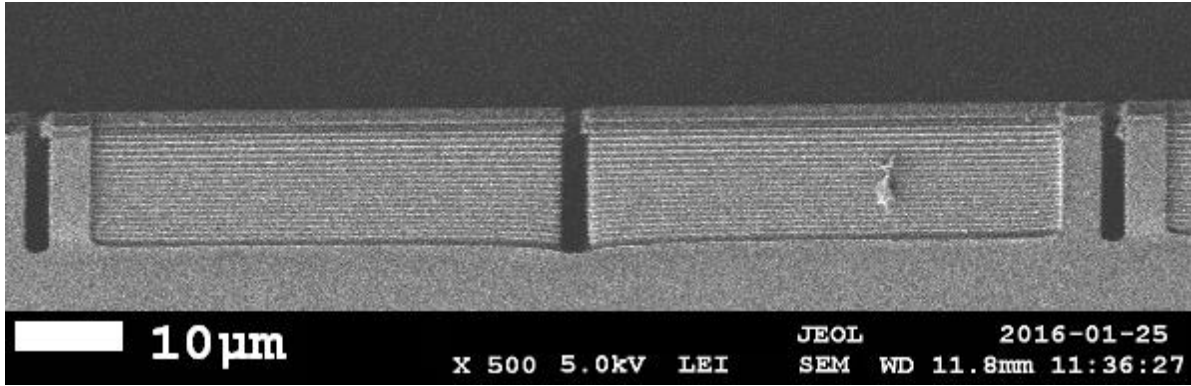


Figure 6.3 : Coupe longitudinale de tranchées en présence de couches de diélectriques après 2min37s de DRIE.

Sur la Figure 6.2a, 14 scallops sont comptées, alors que le nombre de cycles de Bosch réalisés est différent :

$$\frac{t_{TOT}}{t_{passiv} + t_{physico-chimique} + t_{chimique}} = \frac{134}{1.8 + 4 + 3} = 15 \text{ cycles} \quad (6.1)$$

Il y a donc une scallop qui n'apparaît pas certainement à cause de l'oxyde natif qui empêchait le premier cycle de Bosch de se manifester dans le silicium. Pour les calculs qui suivent, nous considérons un total de 14 scallops. Les scallops sont utilisées pour calculer le temps nécessaire à l'obtention d'une profondeur de 10 μm, étant donné que le procédé doit terminer à la fin d'un cycle de Bosch (après une passivation) et qu'il y a donc un nombre entier de scallops. À partir du résultat obtenu après 2min14s de DRIE, le nombre de scallops manquants pour atteindre 10 μm est :

$$\frac{10 - 8,25}{8,25} (14 [\text{scallops}]) = 3 \quad (6.2)$$

Pour former une scallop, un cycle complet de Bosch est requis. Celui-ci dure :

$$1,8 + 4 + 3 = 8,8 \text{ s} \quad (6.3)$$

Il faut donc ajouter un temps de DRIE égal à :

$$3 \times 8,8 = 26,4 \text{ s} \quad (6.4)$$

Puisque le premier test de 2min14s était posé à temps fixe, la gravure s'est arrêtée 3 secondes après le début d'un cycle de Bosch, au lieu de s'arrêter à la fin du cycle. Ces 3 secondes ont donc été retirées du résultat. Le temps de gravure total pour atteindre une profondeur de 10 μm a donc pu être calculé :

$$2\text{min}14\text{s} + 26,4\text{s} - 3\text{s} \approx 2\text{min}37\text{s} \quad (6.5)$$

Les tranchées gravées pendant 2min37s sont bien droites et leur profondeur est d'environ 10 μm . Leur largeur mesurée est aussi proche de l'objectif : 2,1 μm au lieu de 2 μm . Un écart de 5% est jugé acceptable.

Pour confirmer la reproductibilité du procédé, 25 tranches ont été traitées et inspectées, vue de haut, au microscope optique. Un exemple d'une telle vue est présentée à la Figure 6.4.

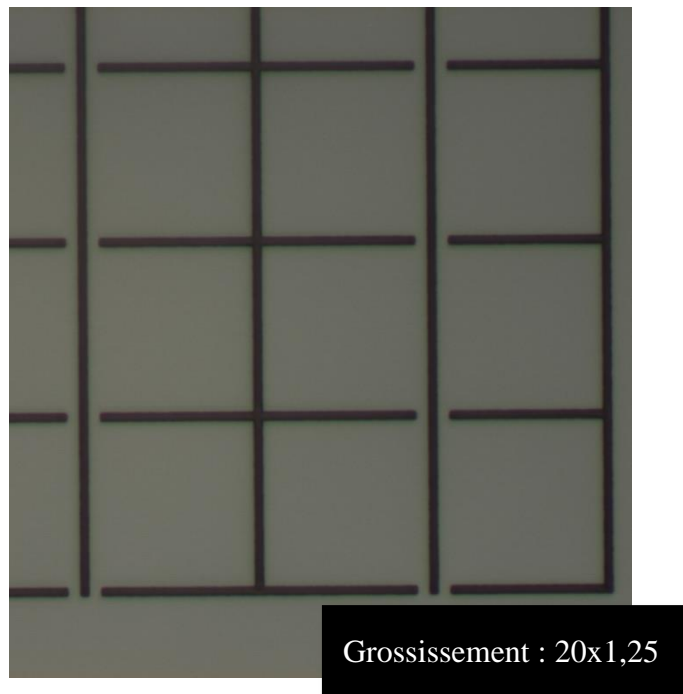


Figure 6.4 : Vue de surface des tranchées après leur formation et un décapage de la résine.

Puisque la formation des tranchées constitue la première étape de gravure de tout le procédé de test, la reproductibilité de l'expérience en termes de profondeur des tranchées a pu être vérifiée en parallèle aux inspections faites en profil durant les autres étapes du procédé.

6.1.3 Influence des couches de diélectriques

La même expérience portée sur des tranches couvertes de couches de diélectriques (méthodologie décrite à la section 5.5) pose un problème de reproductibilité important. En effet, même si sur la plupart des tranches, les résultats sont sensiblement les mêmes qu'obtenus sans les couches de diélectriques, 6 tranches sur 15 ont présenté des tranchées déformées et de faible profondeur. Les deux cas sont présentés à la Figure 6.5. Vue de haut, au microscope optique, les cas de tranchées déformées se distinguent par la présence de « bouts blancs ». Des images prises au microscope optique et au SEM sont présentées à la Figure 6.6.

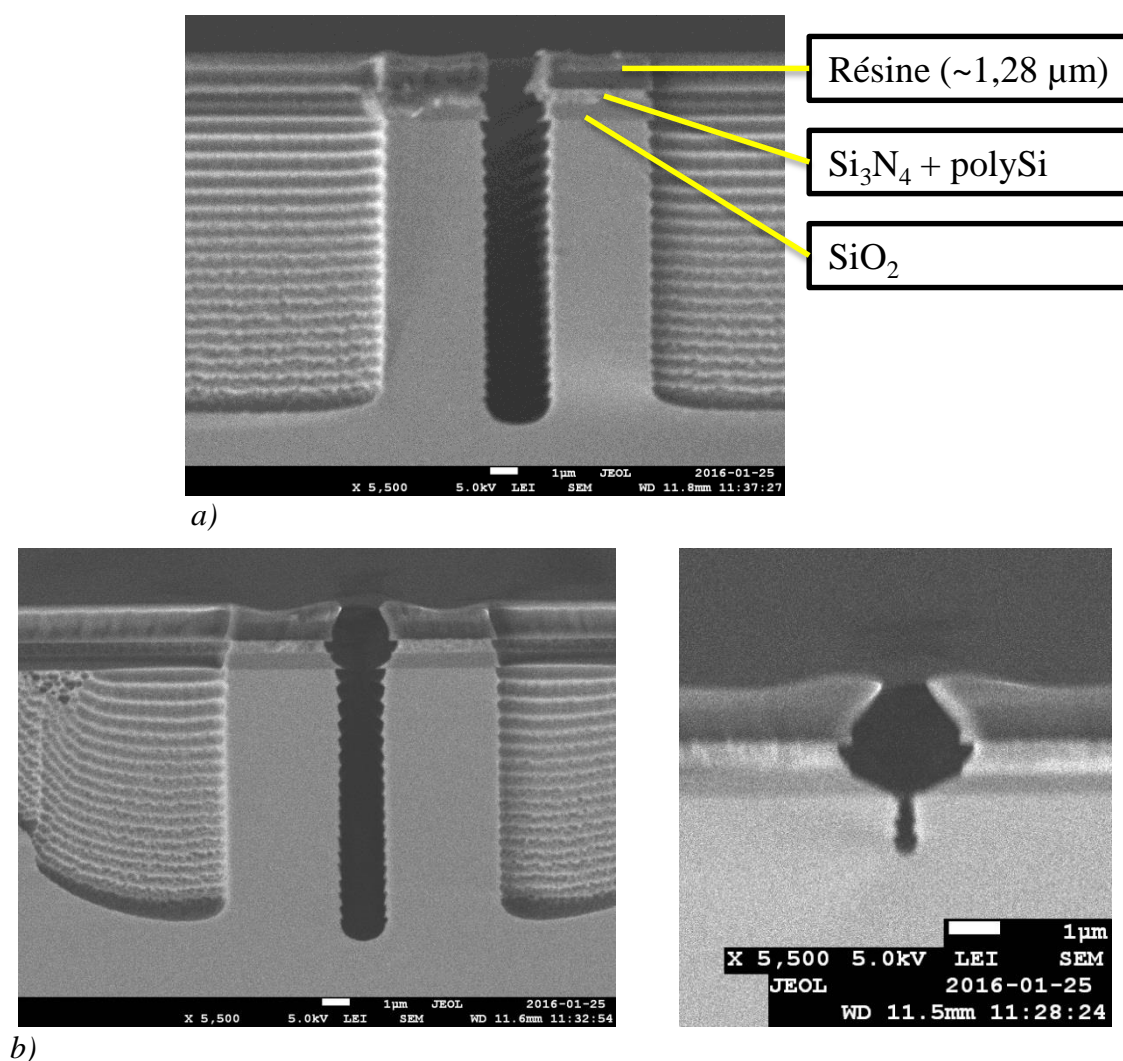


Figure 6.5 : Tranchées en présence de couches de diélectriques pour les cas de formations a) réussies et b) échouées à deux endroits différents.

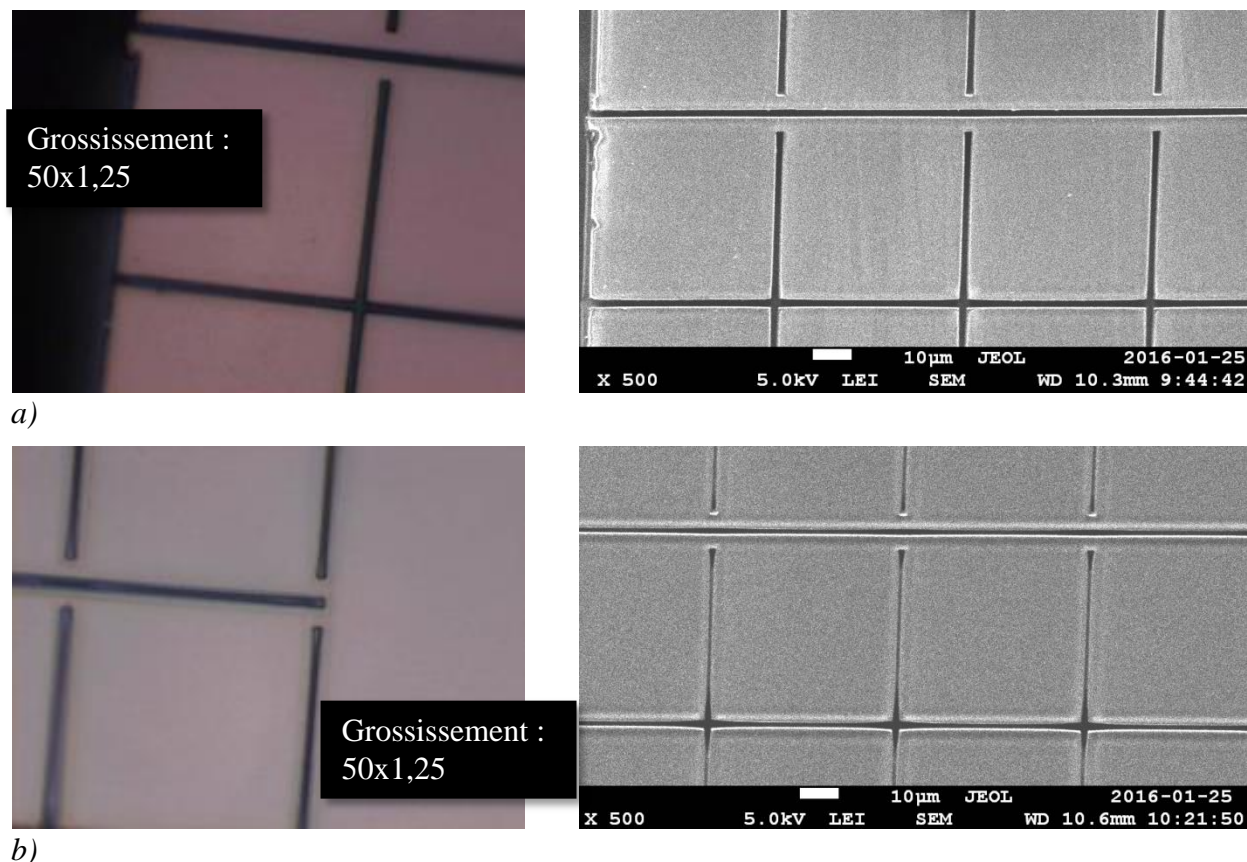


Figure 6.6 : Vue de surface (résine présente) au microscope optique (gauche) et au SEM (droite) des tranchées après DRIE en présence de couches de diélectriques pour les cas où les tranchées a) sont bien formées et b) sont mal formées.

Les paramètres fixés de RIE sont pourtant les mêmes, que les couches de diélectriques soient présentes ou pas. Contrairement à la Figure 6.5a, la Figure 6.5b montre que les parois de la résine ne sont pas droites, que l'ouverture est rétrécie à moins de $1\text{ }\mu\text{m}$ (voir l'échelle) et aussi, que la couche de SiO_2 n'a pas pu être gravée au complet.

Nous savons que ce sont les couches de diélectriques ou les étapes de RIE ajoutées qui constituent la source du problème de formation des tranchées, étant donné que les mêmes étapes de procédé se sont avérées être un succès pour 25 tranches (sur 25) sans les couches de diélectriques. La présence des couches de diélectriques influence donc le profil final de la résine, mais nous ne savons pas exactement pourquoi (hypothèses plus bas), ni à quelle étape du procédé. Des motifs de tests de résolution ont donc été introduits sur les tranches pour voir si les ouvertures du masque de résine sont déformées pendant la RIE de la couche de SiO_2 ou pendant

la DRIE pour la formation des tranchées. Les images des motifs de tests de résolution, prises au microscope optique après RIE et après DRIE, sont présentées à la Figure 6.7.

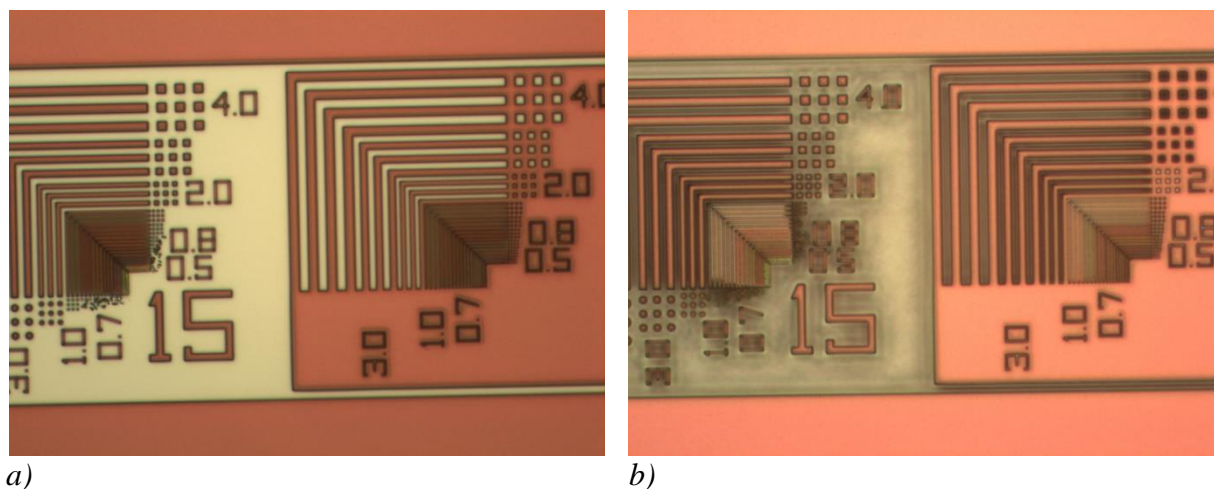
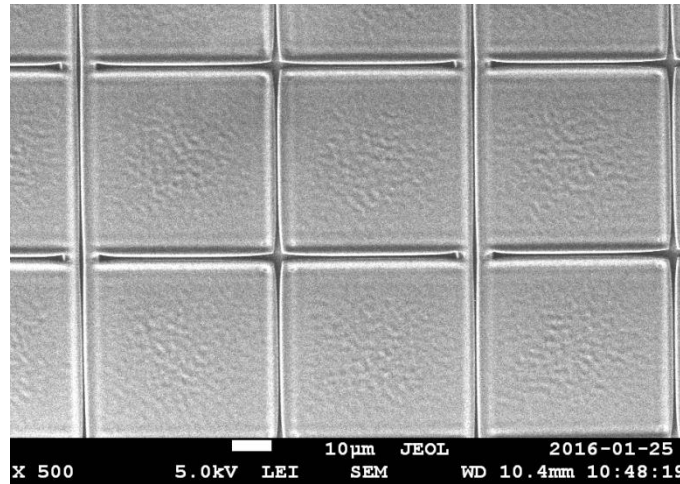


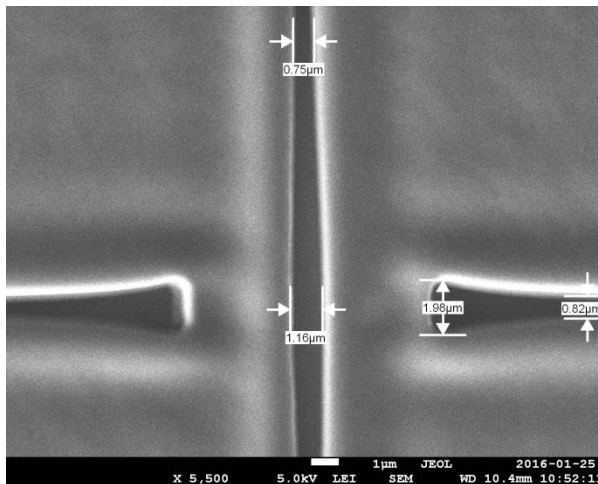
Figure 6.7 : Motifs de tests de résolution dans la résine a) après les deux RIE des couches de diélectriques (avant DRIE) et b) après DRIE pour la formation des tranchées sur une tranche qui présentait des problèmes de formation des tranchées.

Cette figure montre que la résolution obtenue est meilleure que $1\text{ }\mu\text{m}$ et donc, étant donné que les tranchées font $2\text{ }\mu\text{m}$, ce test ne permet pas de dire quelle étape est à l'origine de la déformation des parois des ouvertures du masque de résine. Pour une inspection mieux résolue, un échantillon a été apporté au SEM. Les images obtenues sont présentées à la Figure 6.8.

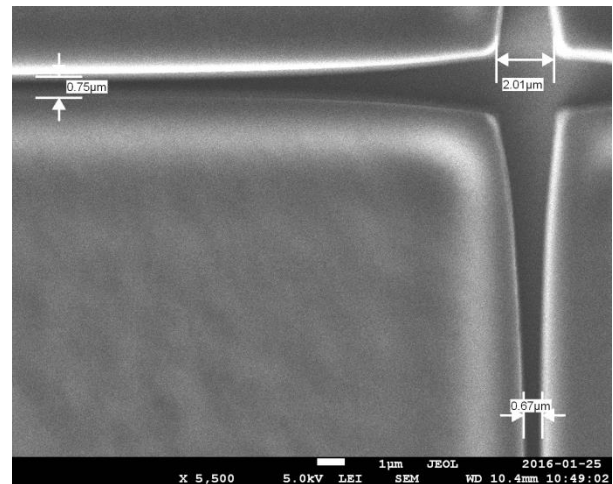
Étant donné 1) l'ouverture partielle du SiO_2 présentée à la Figure 6.5b, 2) le fait que ce problème de formation des tranchées n'apparaît qu'en présence de couches de diélectriques et 3) qu'il survient après RIE avant même d'effectuer la DRIE (Figure 6.8), nous émettons l'hypothèse que la déformation des parois de la résine (qui mène au défaut de formation des tranchées) est causée par une augmentation de la température pendant la RIE. L'effet ne paraît toutefois pas sur la Figure 6.7, probablement parce que les observations en surface au microscope optique ne sont pas suffisamment résolues. La Figure 6.6 et la Figure 6.8 montrent que le SEM est mieux adapté.



a)



b)



c)

Figure 6.8 : Vue de surface des tranchées après RIE (avant DRIE) en présence de couches de diélectriques de tranchées mal formées a) dans l'ensemble, b) à des terminaisons et c) à un point de croisement.

Plusieurs démarches et solutions s'offrent pour relever ce défi. D'abord, des inspections en profil après photolithographie et après première RIE permettraient d'identifier quand exactement la résine se déforme. Si la déformation est liée à la haute température, le procédé de photolithographie peut être modifié : une photostabilisation ou une cuisson forte plus longue peuvent s'avérer être des solutions. L'effet de charge généré dans les couches de diélectriques peut aussi être à investiguer, car la déviation des ions pendant la RIE ou la DRIE peut mener à une gravure moins verticale. Toutefois, cette hypothèse n'explique pas la courbure des parois de la résine (Figure 6.5b) qui fait rétrécir les ouvertures.

6.1.4 Courte conclusion sur les tranchées

Sans les couches de diélectriques, la formation des tranchées s'est démontrée reproductible pour toutes les 25 tranches de silicium testées. Les dimensions obtenues satisfont les exigences du projet, soit de $2,1 \mu m \times 10 \mu m$ (espéré au départ : $2 \mu m \times 10 \mu m$) et les parois sont droites.

Avec les couches de diélectriques toutefois, des étapes de RIE s'ajoutent. Même si sur la plupart des tranches, les résultats sont sensiblement les mêmes qu'obtenus sans les couches de diélectriques, 6 tranches sur 15 ont présenté des tranchées déformées qui n'ont pas pu être formées au complet. Au SEM, les parois de la résine paraissent courbées et la couche de SiO_2 n'est pas ouverte au complet pendant la gravure. Les tranchées résultantes sont donc étroites et incomplètes. Ceci serait dû aux contraintes thermiques générées pendant les étapes de RIE. Des inspections en profil après chaque étape s'imposent pour relever le défi.

Afin de sauver du temps, les tests qui ont suivi ont été faits sans les couches de diélectriques.

6.2 TSV avant

Pour caractériser les TSV avant, le microscope optique et le SEM sont utilisés. Le procédé de DRIE pour la formation des TSV avant est basé sur celui pour la formation des tranchées avec quelques différences : augmentation de la puissance RF appliquée au plateau, diminution de la pression pendant la phase de retrait de polymère du procédé Bosch et augmentation du temps total de DRIE.

6.2.1 Résultat espéré

Comme pour les tranchées, les TSV avant doivent être droits. Ceux-ci se distinguent toutefois par leur forme cylindrique et doivent respecter des dimensions de haut facteur de forme, tel qu'illustré à la Figure 6.9. Par simplicité, les scallops ne sont pas présentées sur l'image, mais nous nous attendons à en avoir étant donné l'utilisation du procédé Bosch.

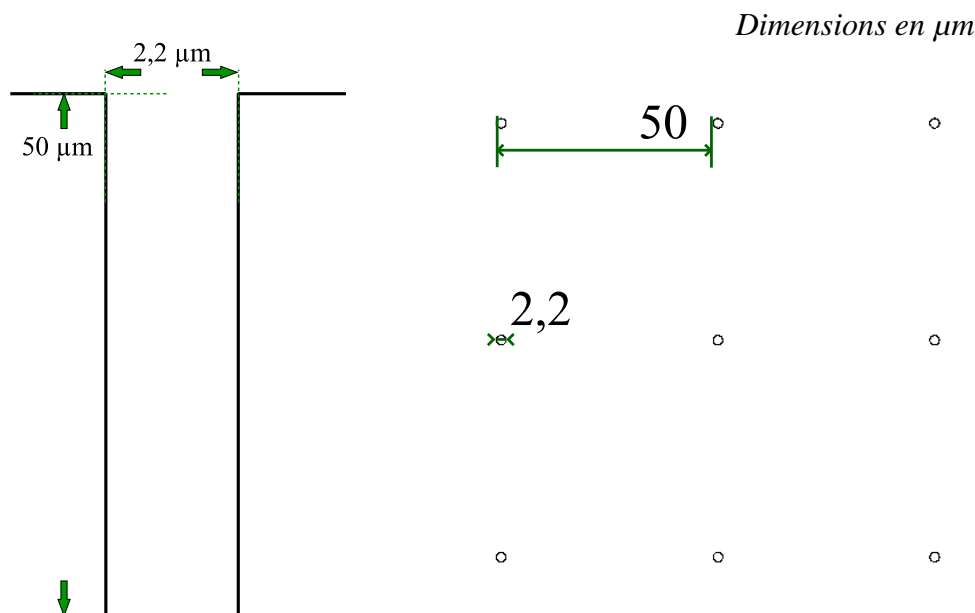


Figure 6.9 : TSV avant espérées, vue de profil (gauche) et vue de surface (droite).

Il est important que les scallops réalisées par le procédé Bosch soient petites pour un bon remplissage des TSV dans les étapes futures. Les métriques liées ne sont toutefois pas identifiées et donc, seuls les tests de remplissage seront concluants sur cet aspect. Il est à mentionner que les TSV avant sont éventuellement rejoints par les TSV arrière et que ceci a pour effet de les rapetisser (section 6.4.5). Pour satisfaire les contraintes établies au début du projet, la profondeur finale des TSV avant doit être supérieure à $15 \mu\text{m}$. Pour s'assurer de dépasser cette valeur en tenant compte de la reproductibilité des procédés et des non-uniformités de gravure, le premier objectif est posé à $50 \mu\text{m}$.

6.2.2 Résultats préliminaires basés sur les tranchées

Les premiers tests de formation des TSV avant étaient effectués directement avec les paramètres utilisés pour la formation des tranchées, mais avec un temps de gravure total plus long. Ce premier temps, 13min05s, est calculé par extrapolation linéaire avec le temps total de gravure des tranchées selon la profondeur de ces dernières.

Soit t les temps de formation et p la profondeur des structures.

$$t_{TSV} = \frac{p_{TSV}}{p_{tranchées}} t_{tranchées} \quad (6.6)$$

$$= \frac{50}{10} (157) = 13.08\bar{3} \text{ s} = 13\text{min}05\text{s} \quad (6.7)$$

Le haut facteur de forme des TSV avant implique toutefois un faible taux de gravure réduit par rapport à celui des tranchées. Au lieu de 50 μm , la profondeur atteinte avec ce temps était d'environ 32,5 μm (Figure 6.10a). En outre, la forme en « V » obtenue laisse supposer que les espèces nécessaires à la gravure se rendent difficilement au fond des TSV et que la profondeur pourrait se limiter en-dessous de celle visée.

Une augmentation de la puissance RF appliquée au plateau est testée.

6.2.3 Fond plus plat : augmentation de la puissance RF appliquées au plateau

Une augmentation de la puissance RF appliquée au plateau permet d'obtenir un fond plus plat. Le résultat est présenté à la Figure 6.10b. On remarque aussi, sur cette même figure, un effet de « bowing ». Ceci s'avère problématique pour un remplissage uniforme des TSV.

Une diminution de la pression pendant les phases de retrait de polymère est donc testée.

6.2.4 Parois plus droites : réduction de pression lors des retrait de polymère

Comme prévu, la réduction de la pression pendant les phases de retrait de polymère a permis de réduire l'effet du « bowing », comme montré à la Figure 6.10c. La réduction de la pression permet aux ions de mieux se diriger vers le fond des TSV avant et donc de retirer plus efficacement la couche de passivation au fond sans entrer en collision avec celle protégeant les parois.

Pour approfondir les TSV avant, le temps total de gravure est augmenté.

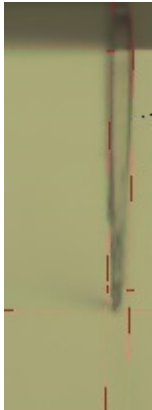




6.2.5 Plus profond : augmentation du temps total de gravure

Maintenant que le fond est plat et que la forme est droite, la profondeur reste la dernière caractéristique à améliorer. Le temps total de gravure a donc été augmenté. Des images prises au microscope optique pour trois valeurs de temps sont présentées à la Figure 6.10. La profondeur

atteinte après 20 minutes de gravure est d'environ 42 μm . Le résultat obtenu est donc inférieur à celui espéré (50 μm), mais satisfait la contrainte ($> 15 \mu\text{m}$). Cette profondeur est limitée par la résine qui ne résisterait pas à un temps de gravure plus long. Un masque de résine plus épais et un procédé de DRIE plus sélectif sont deux solutions envisageables pour approfondir les TSV avant.

Le Tableau 6.1 résume l'évolution des TSV avant décrite dans les dernières sections.

Tableau 6.1 : Évolution des paramètres de DRIE pour les corrections de forme et de profondeur

	Correction de forme			Correction de profondeur	
					
	a)	b)	c)	d)	e)
Figure 6.10 : TSV avant formés suite à différents procédés de DRIE pour a,b,c) une correction de forme et d,e) une correction de profondeur.					
P_{plateau} (W)	▶	▲ ▲	▲ ▲	▲ ▲	▲ ▲
Pression pendant l'étape de retrait du polymère (Pa)	▶	▶	▼	▼	▼
Temps total	13min05s	13min05s	13min05s	16min30s	20min00s
Profondeur mesurée (μm)	32,5	28,0	27,8	37,0	42,7

Les symboles ▼, ▶ et ▲ désignent respectivement une basse, moyenne et haute valeur, relativement aux autres valeurs du **même paramètre** dans le Tableau 5.5.

Après plusieurs tests et mesures au SEM et au microscope optique, nous trouvons que la largeur d'ouverture des TSV avant est d'environ $3\text{ }\mu\text{m}$, soit un écart de 36% de la valeur espérée ($2,2\text{ }\mu\text{m}$). Voici deux raisons (avec solutions) pouvant expliquer la surgravure latérale obtenue :

- Épaisseur de résine plus faible aux ouvertures à cause de facettes inclinées ou de courbures. La qualité des parois de la résine peut être améliorée en ajustant les paramètres de dépôt, par exemple en augmentant progressivement la vitesse de rotation. La résistance à la gravure pourrait aussi être améliorée en ajoutant une étape de photostabilisation.
- Distribution angulaire plus importantes des ions en haut des structures. Diminuer la pression pendant la phase de retrait de polymère dans le procédé Bosch permet aux ions d'avoir moins de collisions et d'être plus directionnels.

Une autre solution, valide aux deux raisons, est de réduire intentionnellement les dimensions du masque de photolithographie afin de prendre en compte la surgravure latérale.

6.2.6 Qualité des TSV avant

Une image prise au SEM d'un TSV avant formé par 16min30s de DRIE est présentée à la Figure 6.11. Sa séparation en trois parties est présentée à la Figure 6.12 dans le Tableau 6.2 dont chaque partie est caractérisées en relation aux défauts énoncés à la section 4.1.2. Dans notre cas, les défauts, même une fois identifiés et quantifiés, ne permettent pas de prédire si les remplissages seront uniformes. Cette caractérisation est toutefois importante pour de futures références, par exemple lors d'un travail d'optimisation. Aussi, l'identification d'un fond plat et la mesure d'épaisseur de résine résiduelle ont permis de prédire qu'un temps de gravure de 20 min approfondirait les TSV avant sans manquer de résine. Un fond pointu ou un résidu trop faible de résine n'auraient pas permis d'augmenter le temps de gravure sans problèmes.

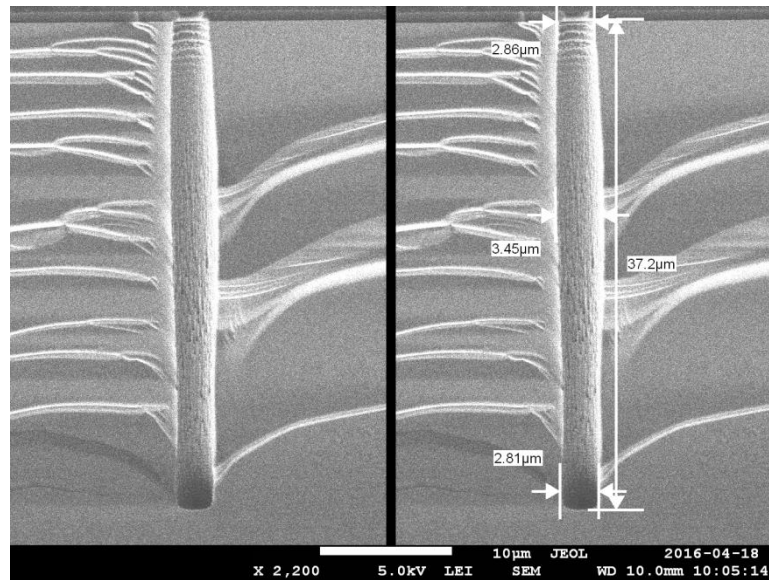


Figure 6.11 : TSV avant formé par 16min30s de DRIE.

Tableau 6.2 : Caractéristiques d'un TSV avant formé par 16min30s de DRIE.

	<ul style="list-style-type: none"> • Présence de morsures de souris • « Undercut » = 0,35 µm • Résine résiduelle = 0,68 µm (sur environ 1,6 µm) • Hauteur maximale des scallops = 1,25 µm
	<ul style="list-style-type: none"> • « Bowing » : $1 - 2,86/3,45 = 17\%$ • Striations ($< 1 \mu\text{m}$) • Scallop indiscernables
	<ul style="list-style-type: none"> • Aucun micro-herbage apparent • Fond plat • Striations ($< 0,3 \mu\text{m}$) • Scallop indiscernables
<p>Figure 6.12 : 3 parties d'un TSV avant formé par 16min30s de DRIE.</p>	

6.2.7 Gravure des couches de diélectriques pour la formation des TSV avant

Le procédé de RIE utilisé pour graver les couches de diélectriques a été testé sur un masque de résine avec des ouvertures circulaires de $2,2\ \mu\text{m}$ de diamètre. Ceci, afin de préparer pour d'éventuels tests dans le futur. Toutefois, puisqu'il s'agit des premiers tests, le masque utilisé était constitué de $7\ \mu\text{m}$ de résine B et était formé par un procédé différent de celui détaillé au Tableau 5.6. Une épaisseur de $1,6\ \mu\text{m}$ de résine A était insuffisante pour subsister à la gravure des couches de diélectriques et nous pensions donc utiliser la résine B pour l'utilisation d'un masque plus épais (au lieu de développer un procédé rendant plus épaisse la résine A). Il a été constaté que la RIE de la couche de SiO_2 menait à une réticulation de la résine B. Cette réticulation rend la résine impossible à être décapée au plasma O_2 même après trois répétitions du procédé régulier. Par contre, une photostabilisation par exposition UV de 1000 s après la cuisson forte a permis d'obtenir un temps de gravure plus long avant que la résine ne réticule. En effet, après 50 s de RIE (paramètres de la recette #2 du Tableau 5.9), la résine B ne réticule pas seulement dans le cas où elle subissait une photostabilisation. Après 100 s de RIE (temps nécessaire pour graver la couche de SiO_2), la résine B non-photostabilisée devient jaunâtre et des défauts en forme de bulle sont visibles partout à la surface de la tranche. Dans le cas après photostabilisation, elle devient grise et aucun défaut en forme de bulle ne se présente.

L'utilisation d'un masque de $2,8\ \mu\text{m}$ de résine A, dont le procédé a été développé plus tard dans le projet, devra être testée pour la gravure des couches de diélectriques par RIE.

6.2.8 Courte conclusion sur les TSV avant

Suite à plusieurs optimisations du procédé de microfabrication, les TSV avant ont pu être formés droits et avec des dimensions de $3\ \mu\text{m} \times 42\ \mu\text{m}$. La profondeur est inférieure à la valeur initialement espérée ($50\ \mu\text{m}$), mais satisfait les exigences du mandat si elle reste supérieure à $15\ \mu\text{m}$ après la gravure des TSV arrière. Le fond plat des TSV avant laisse supposer qu'une augmentation du temps de DRIE pourrait approfondir les TSV avant, mais une gravure plus sélective ou une résine plus épaisse ou plus résistante s'impose. Le diamètre est 36% plus élevé qu'espéré : $3\ \mu\text{m}$ au lieu de $2,2\ \mu\text{m}$. Améliorer la qualité des parois de la résine en ajustant les paramètres de dépôt ou obtenir une DRIE plus verticale en abaissant la pression s'avèrent être des solutions.

Les TSV avant présentent des scallops hautes de $1,25\text{ }\mu\text{m}$ à l'ouverture (indiscernables en profondeur), 17% de « bowing » et des striations de moins de $1\text{ }\mu\text{m}$ au milieu. Il est difficile de juger à cette étape si la qualité obtenue est acceptable : des étapes de remplissage (par du polySi et par du métal) sont nécessaires.

Finalement, la formation de TSV avant en présence de couches de diélectriques mène à une réticulation de la résine B. La résine A, dont le procédé donnait initialement une faible épaisseur de $1,6\text{ }\mu\text{m}$ de masque, doit être testé avec le nouveau procédé de dépôt développé ($2,8\text{ }\mu\text{m}$).

6.3 TSV arrière

Pour caractériser les spécifications structurelles des TSV arrière, le microscope optique et le SEM sont utilisés. Les tests du procédé de DRIE sont effectués au départ sur des tranches vierges.

6.3.1 Résultat espéré

Comme pour les tranchées et les TSV avant, les TSV arrière doivent être droits. Ces derniers constituent les structures les plus volumineuses : leurs dimensions sont illustrées à la Figure 6.13. Les TSV avant conservent toutefois le record du plus haut facteur de forme dans le projet.

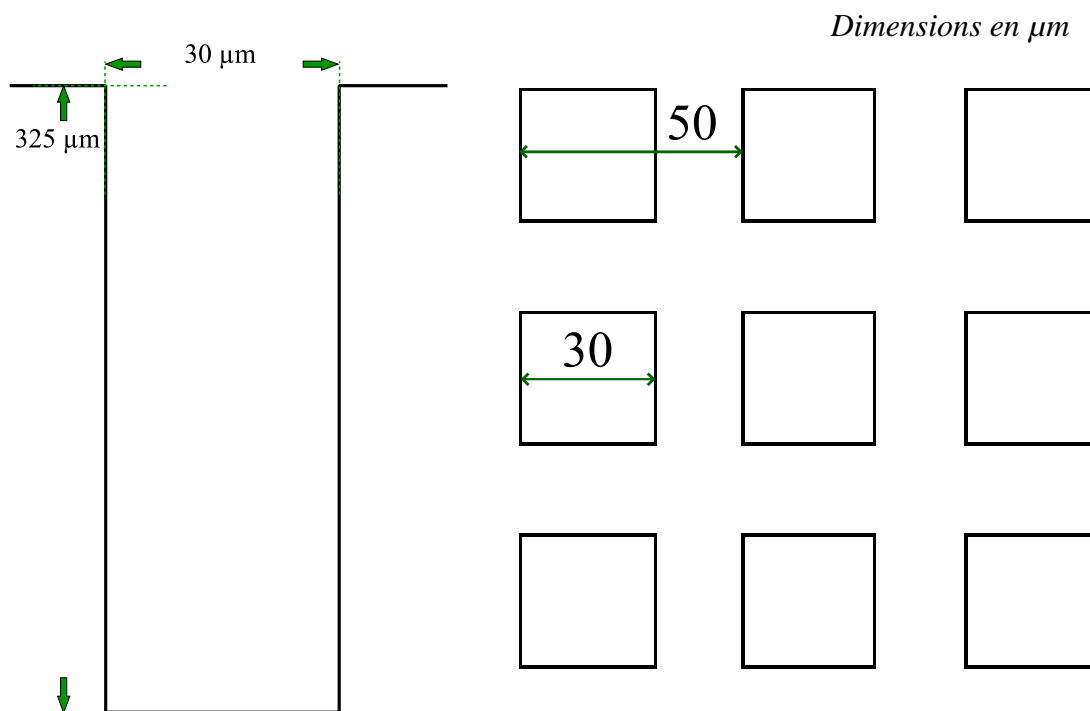


Figure 6.13 : TSV arrière espérées, vue de profil (gauche) et vue de surface (droite).

Toutefois, les premiers tests sur les TSV arrière étaient effectués à temps fixe, puisque l'absence des TSV avant empêchait d'utiliser l'hélium pour poser un critère d'arrêt de gravure par détection de fuite d'hélium (section 6.4.5). Ces tests de gravure à l'aveugle ne servent donc qu'à vérifier l'uniformité de gravure, la forme et la largeur d'ouverture des TSV arrière, ainsi que le taux de gravure obtenu à partir des paramètres utilisés.

6.3.2 Uniformité de gravure

Les résultats obtenus avec les paramètres établis au Tableau 5.5, mais pour un temps de gravure total fixe de 1 h et avec une épaisseur initiale de résine B de 7 μm , sont présentés à la Figure 6.14.

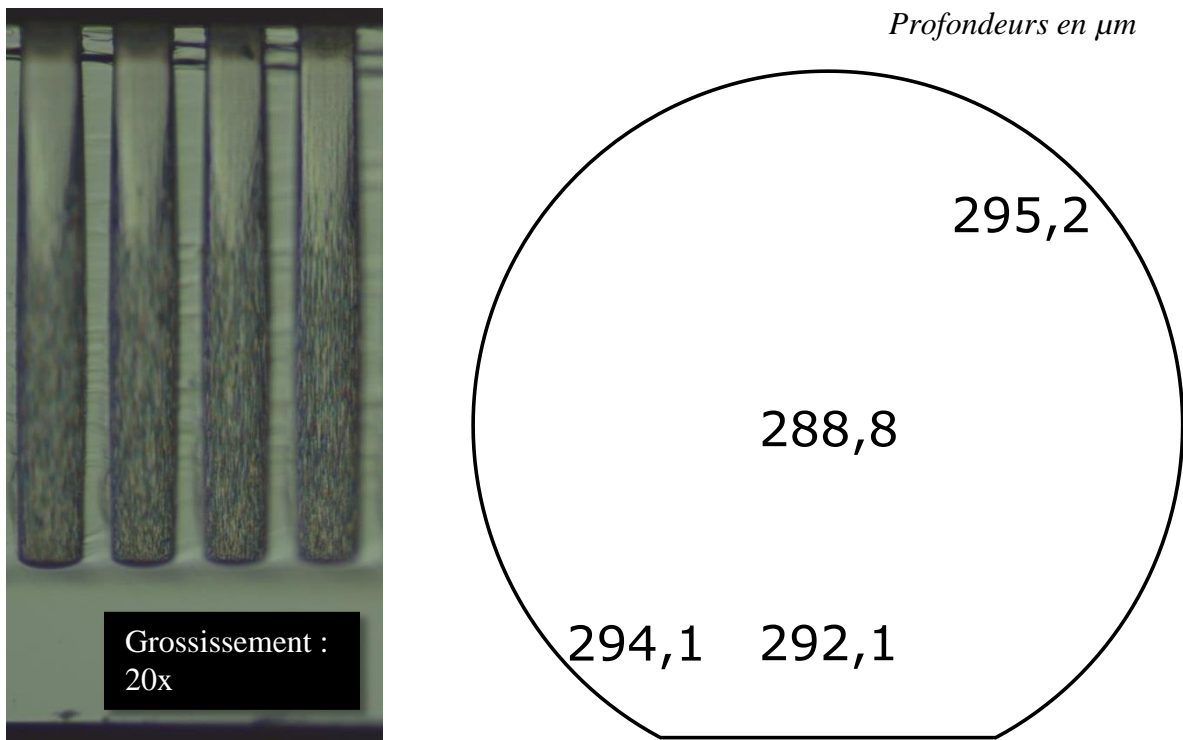


Figure 6.14 : TSV arrière formées par 1 h de DRIE (gauche) et profondeurs mesurées en microns au microscope optique à 4 endroits sur la tranche.

Le taux de gravure est plus élevé au bord des tranches qu'au centre et la moyenne obtenue après 60 min de gravure est de :

$$\overline{v_g} = \left(\frac{288,8 + 292,1 + 294,1 + 295,2}{4} \right) / 60 = \frac{292,55}{60} = 4,88 \mu\text{m/s} \quad (6.8)$$

En utilisant l'équation (3.16), l'uniformité de gravure U à travers la tranche est vérifiée :

$$U = 1 - \frac{295,2 - 288,8}{295,2 + 288,8} = 98,9 \% \quad (6.9)$$

L'écart relatif E_r entre la plus haute valeur mesurée et la plus faible est :

$$E_r = \frac{295,2}{288,8} \approx 1,02 \quad (6.10)$$

Un écart relatif faible permet d'avoir une bonne marge d'erreur sur le retard d'arrêt de gravure en présence des TSV avant. Considérant que les tranches ont une épaisseur de 375 μm et que les TSV avant réalisés précédemment ont une profondeur de 42 μm , les TSV arrière doivent atteindre une profondeur d'au moins 337 μm ($375 - 42 = 337$) pour rejoindre les TSV avant. Étant donné que les TSV avant doivent faire au moins 15 μm à la fin du procédé (contrainte du projet), la profondeur maximale que peuvent atteindre les TSV arrière est : $375 - 15 = 360 \mu\text{m}$. Ceci dit, l'intervalle des spécifications associées aux profondeurs des TSV arrière est : [337, 360] μm . L'écart relatif entre la plus haute valeur mesurée et la plus faible ne doit donc pas dépasser la valeur suivante :

$$E_r^{max} = \frac{360}{337} \approx 1,07 \quad (6.11)$$

Ce qui correspond à notre cas ($1,02 < 1,07$) et donc confirme l'obtention d'une uniformité adaptée à nos besoins.

6.3.3 Caractéristiques structurelles et résine résiduelle

Les TSV arrière ont la forme attendue, mais avec une largeur d'ouverture 20 % plus élevée que la valeur espérée : 36 μm au lieu de 30 μm . Or, les ouvertures du masque de résine tout juste après la photolithographie faisaient 31,5 μm de côté. Ceci montre que les ouvertures s'élargissent pendant la gravure. Par contre, étant donné que le pas (ou « pitch ») entre deux TSV est de 50 μm , il faudrait une ouverture de 50 μm pour que les TSV arrière se rejoignent entre eux latéralement. Pour cet aspect, des ouvertures de 36 μm sont donc acceptables. Les mêmes deux raisons (avec solutions) présentées à la section 6.2.5 (cas du TSV avant) peuvent expliquer la surgravure latérale obtenue.

Au microscope optique, l'épaisseur résiduelle du masque de résine après 1 h de DRIE est mesurée à 1,1 μm sur une épaisseur initiale d'environ 7 μm et la profondeur moyenne obtenue est de 292 μm . Ceci dit, il y a des chances que le temps de gravure nécessaire pour atteindre 337 μm de profondeur soit trop élevé pour que le masque de résine subsiste à la DRIE. Le procédé de dépôt de la résine B a donc été modifié. Une épaisseur de 8,7 μm de résine B a été utilisée pour tous les tests de formation des TSV arrière qui ont suivi. Afin de voir si la résine subsiste au temps de gravure requis pour que les TSV arrière rejoignent les TSV avant, des TSV arrière ont été formés sur une tranche ayant des TSV avant. Grâce à l'arrêt de gravure par détection de fuite d'hélium (section 6.4.5), le « bon » temps de test (environ 1h20min) est obtenu et un échantillon a pu être amené au SEM pour inspection. Une image de l'ouverture prise au SEM est présentée à la Figure 6.15.

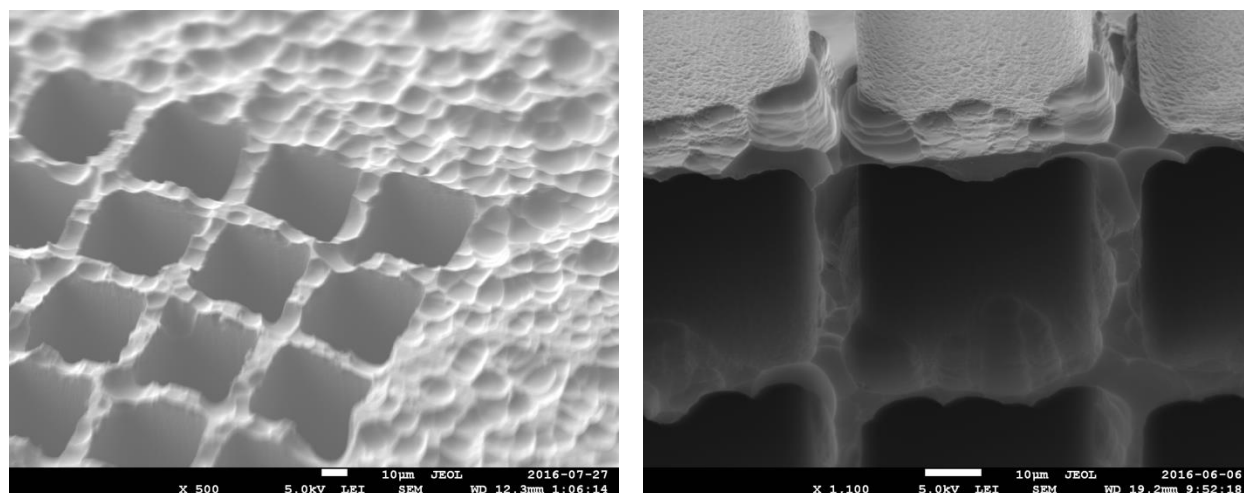


Figure 6.15 : Ouvertures des TSV arrière (qui ont rejoint les TSV avant) après DRIE.

Les cratères formés à la surface du silicium (comparés à des morsures de souris de grandes dimensions) suggèrent la disparition complète de la résine avant la fin de la gravure. Étant donné la topographie non-uniforme de la surface non-polie du silicium combinée à la non-uniformité d'étalement de la résine et de la DRIE, des petites parties du masque de résine ont disparu l'une après l'autre jusqu'à disparition complète du masque, résultant à la formation de cratères par gravures locales. La Figure 4.2 aide à mieux imaginer ce phénomène. La résine a toutefois pu subsister à la majorité du temps de DRIE, car la tranche ne semble pas être amincie : 380 μm , mesuré au SEM (épaisseur initiale théorique : $[375 \pm 10] \mu\text{m}$). Des tests sans stabilisation au photoréacteur UV n'ont pas été essayés.

La formation de cratères au dos de la tranche peut gêner au dépôt dans des étapes futures du procédé à cause de la mauvaise adhérence que cela offre. Dans un cas où le masque de résine disparaît très tôt dans la gravure, cela peut aussi avoir pour effet d'amincir la tranche et donc de réduire la résistance électrique des lignes de métal qui parcourent les TSV plus tard dans le procédé en diminuant leur longueur. Un masque de résine plus épais ou plus résistant et un procédé de DRIE plus sélectif sont deux solutions envisageables.

6.3.4 Courte conclusion sur les TSV arrière

Les TSV arrière formés sont droits. La gravure est plus rapide au bord des tranches qu'au centre, mais la haute valeur d'uniformité (98,9%) assure la possibilité d'atteindre les TSV avant partout sur la tranche lors de l'assemblage sans réduire leur profondeur en-dessous de 15 μm .

L'ouverture des TSV arrière est toutefois 20% plus qu'espérée (36 μm au lieu de 30 μm). Les solutions sont les mêmes que pour le cas des TSV avant aussi trop larges : améliorer la qualité des parois de la résine en ajustant les paramètres de dépôt ou obtenir une DRIE plus verticale en abaissant la pression s'avèrent être des solutions.

Aussi, la résine, même avec une épaisseur de 8,7 μm (plutôt que 7 μm initialement), ne subsiste pas au temps de DRIE requis (environ 1h20min) pour atteindre les TSV avant. La tranche testée ne semble toutefois pas être amincie et il a été démontré qu'une épaisseur de 7 μm est suffisante pour que la résine subsiste à 1 heure de DRIE, ce qui veut dire que la résine subsiste à la majorité de la DRIE complète.

6.4 Assemblage des tranchées et des TSV

Les tests dits d'assemblage consistent à vérifier les caractéristiques des tranchées, des TSV avant et des TSV arrière formées l'une à la suite de l'autre sur des mêmes tranches. L'agencement des étapes de formation des tranchées et des TSV mènent à certains défis additionnels tels que : la protection des tranchées par la résine durant la gravure des TSV avant, l'alignement entre les TSV avant et arrière, l'intersection des TSV avant et arrière et la fiabilité du critère de fin d'attaque par détection de fuite d'hélium lors de la gravure des TSV arrière.

6.4.1 Résultat espéré

Le résultat espéré est un assemblage des trois sections précédentes, comme illustré à la Figure 6.16.

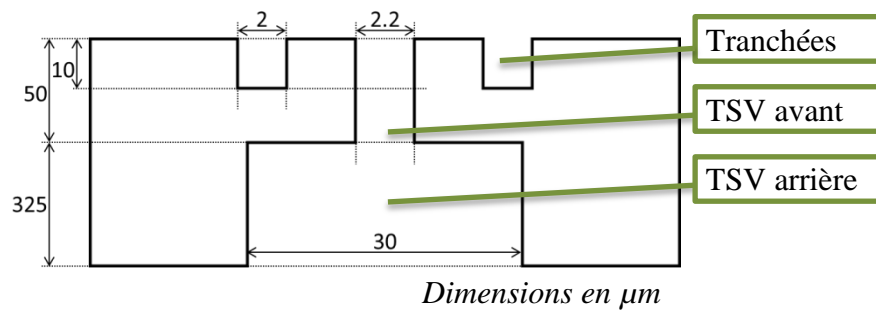


Figure 6.16 : Vue de profil du résultat d'assemblage espéré.

L'arrêt de la gravure des TSV arrière est automatisé grâce à une He-LEPD (détection de fin d'attaque par fuite d'hélium). D'ordre général, l'hélium envoyé sous la tranche est utilisé pour assurer un transfert thermique qui maintient le système à une température raisonnable. Ici, l'hélium est aussi utilisé pour détecter la formation des TSV complets. Lorsque ces derniers se forment (les TSV arrière rejoignent les TSV avant), l'hélium fuit par ceux-ci et abaisse la pression d'hélium mesurée sous la tranche. Le débit d'hélium entrant augmente alors pour retrouver la pression paramétrée et est enregistré sur un graphique en fonction du temps. Au-delà d'un certain seuil de débit entrant au centre de la tranche, la gravure doit s'arrêter. La reproductibilité de cette technique de He-LEPD doit être vérifiée sur plusieurs tranches.

6.4.2 Protection des tranchées lors de la gravure des TSV avant

Comme anticipé, la protection des tranchées par de la résine constitue un défi important lors de la gravure des TSV avant. En effet, les tests avec un dépôt statique régulier ont généré deux défauts structurels dans les tranchées : une gravure verticale parasite à la base de leurs parois (cavités latérales) et une surgravure latérale dans leur haut. Une telle tranchée est présentée à la Figure 6.18 (images de gauche). Un autre angle de vue se trouve à la Figure 6.21a.

À cause des tensions de surface et de la force gravitationnelle, la résine protège mal les coins à l'ouverture des tranchées (voir Figure 3.5). Ceci dit, les cavités latérales, qui sont droites, s'expliquent par la directionnalité verticale de la DRIE qui se produit aux coins mal protégés

(voir Figure 6.17), comme s'il s'agissait d'ouvertures dans le masque de résine mises intentionnellement pour la formation de TSV avant.

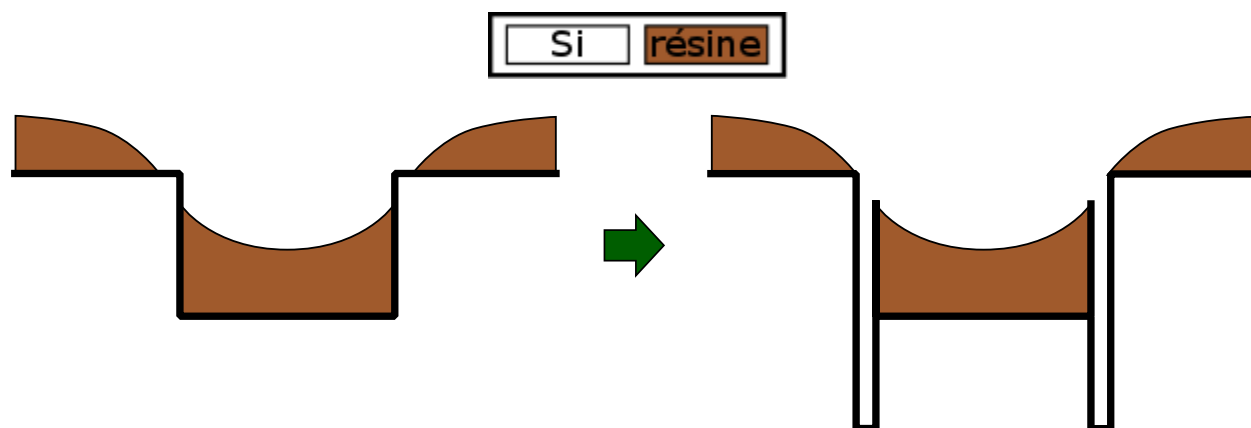


Figure 6.17 : Formation des cavités latérales par mauvaise protection aux coins des tranchées.

La surgravure latérale en haut des tranchées est générée par la présence de facettes inclinées ou de courbures (« coins ronds ») dans la topographie de la résine au bord des ouvertures parasites. Les ions qui entrent en collision avec ces défauts structuraux sont déviés et bombardent le haut des parois des tranchées. Une autre explication, qui reste à vérifier par l'inspection de la résine résiduelle sur les tranches après DRIE, est que la présence de ces mêmes défauts structuraux amincit la résine localement et peut donc mener à un élargissement progressif de l'ouverture parasite du masque de résine pendant la DRIE, résultant aussi à une surgravure latérale en haut des structures.

Pour remédier à la situation, le procédé de dépôt de résine a dû être révisé, mais les paramètres de cuisson sont restés tels quels. Au lieu d'un dépôt statique, la résine est maintenant déposée dynamiquement. Dans le cadre de ce travail, un dépôt dynamique consiste à un déplacement horizontal du bras de distribution du centre vers le bord de la tranche pendant le dépôt de résine et pendant que la tranche tourne. L'état des tranchées après gravure des TSV avant est présenté à la Figure 6.18 pour deux différents procédés de dépôt de résine : celui de base (dépôt statique) et celui amélioré (dépôt dynamique).

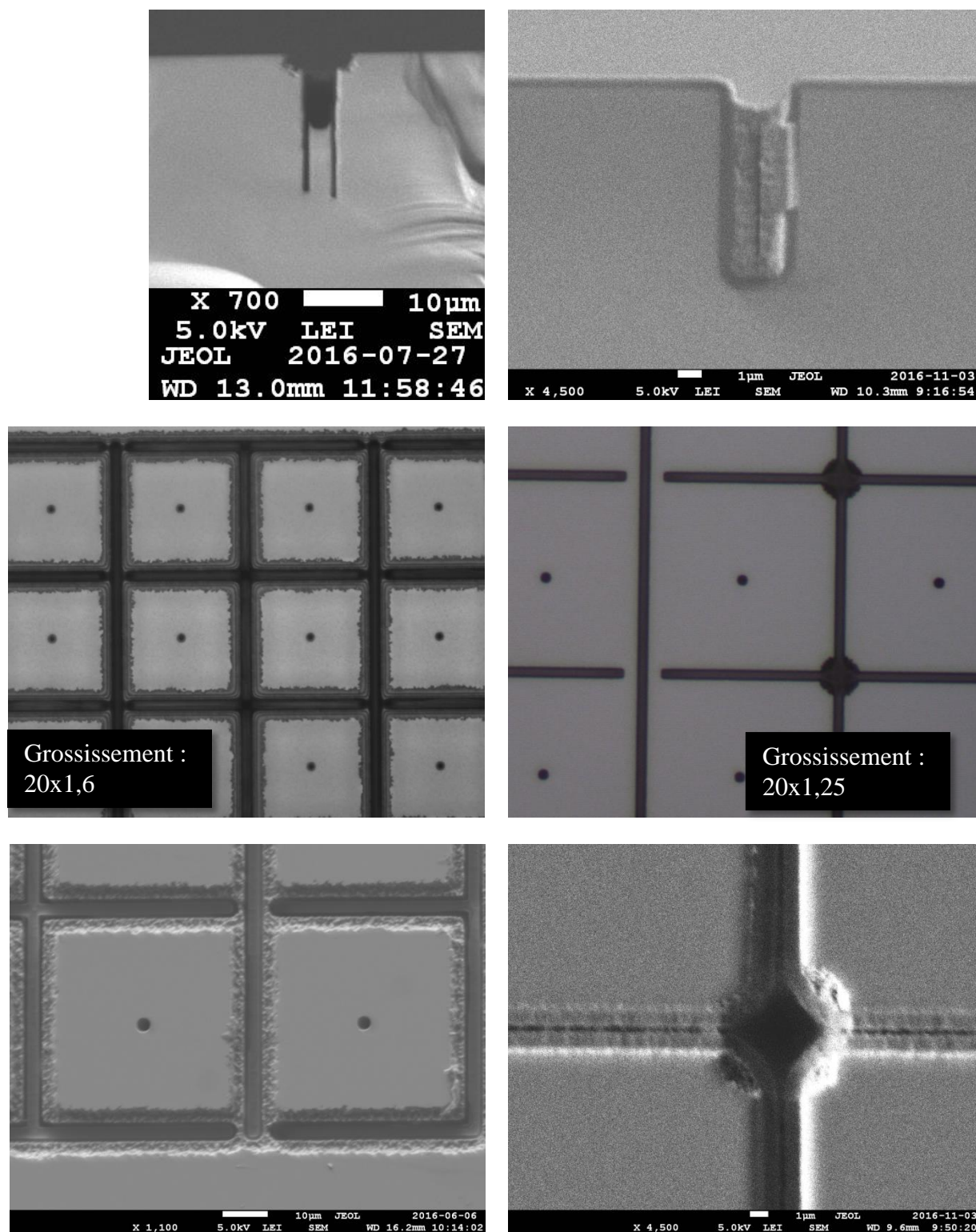


Figure 6.18 : Images prises au SEM (haut et bas) et au microscope optique (milieu) des tranchées après formation des TSV avant pour les procédés de dépôt de base (gauche) et amélioré (droite).

Les images de droite de la Figure 6.18 (i.e. avec un procédé de dépôt amélioré), sauf celle du milieu, ne correspondent pas à l'étape directement après la formation des TSV avant, mais plutôt à l'étape suite au LPCVD et à la planarisation du polySi. C'est pour cette raison que du polySi se trouve dans la tranchée présentée.

Durant la gravure des TSV avant, la résine déposée dynamiquement protège bien les tranchées, sauf aux intersections. Les dimensions des défauts générés varient en fonction de la position sur la tranche. Les points de croisement sont les endroits les plus difficiles étant donné qu'ils présentent une dimension critique plus large d'un facteur $\sqrt{2}$ par rapport au reste (Figure 6.19). Des expériences antécédentes produites à Excelitas ont démontré que plus une structure gravée est large, plus la résine y pénètre bien, mais plus elle en ressort bien aussi. Ceci amène alors au cas mal protégé illustré à la Figure 3.5.

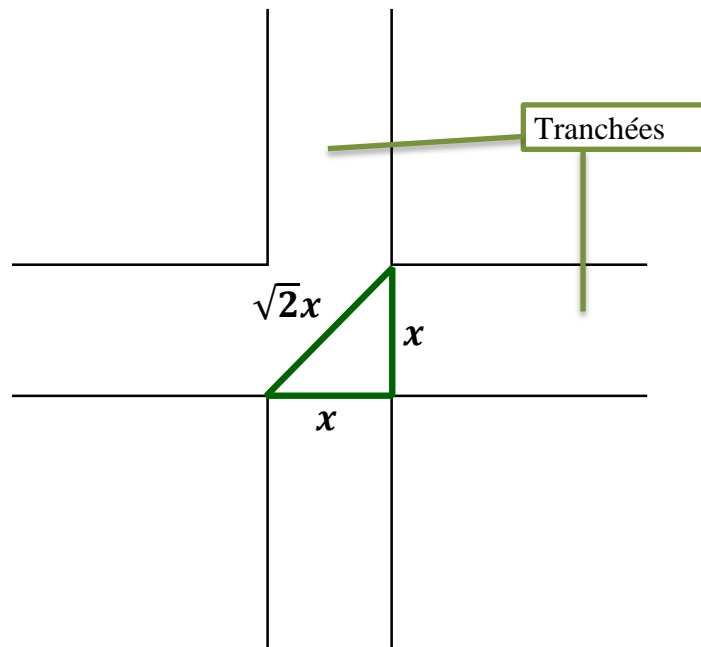


Figure 6.19 : Dimensions au point de croisement entre des tranchées (vue de surface).

Trois modifications-clé ont permis d'obtenir cette amélioration de la protection des tranchées :

- Augmentation de l'épaisseur de résine de 1,6 à 2,8 μm

L'épaisseur est augmentée en réduisant la vitesse de rotation de la tournette. Une résine plus épaisse permet de protéger plus longtemps les structures.

- Dépôt de EBR avant le dépôt de résine

Une solution de EBR déposée au départ sur la tranche aide la résine à mieux pénétrer dans les tranchées. Le EBR agit comme un solvant qui dissout la résine et uniformise sa pénétration.

- Translation horizontale du bras de distribution pendant le dépôt

Juste après le dépôt, le solvant dans la résine commence déjà à s'évaporer. La résine qui atteint le bord de la tranche ne possède donc pas la même viscosité que celle déposée au milieu. Dans le cas d'un dépôt dynamique par translation horizontale du bras de distribution, nous nous assurons d'avoir initialement une même viscosité de résine partout sur la tranche.

Afin d'améliorer encore plus le procédé de dépôt et de ce fait, protéger adéquatement les intersections des tranchées, il est envisagé de modifier les paramètres de dépôt, par exemple en augmentant progressivement la vitesse de rotation rapide qui mène à l'épaisseur souhaitée.

6.4.3 Alignement entre les TSV avant et arrière

Les termes « TSV avant » et « TSV arrière » sont utilisés à des fins pratiques dans le cadre de ce projet. Toutefois, le seul véritable TSV obtenu est celui complété par l'union des deux. Il est donc important au point de vue pratique de réussir à aligner les TSV avant et TSV arrière de sorte à obtenir un TSV complet gravé de bord en bord des tranches. C'est l'union entre les TSV arrière et les TSV avant qui permet de poser un critère d'arrêt de gravure basée sur la détection par fuite d'hélium.

Comme première idée de procédé, la photolithographie par « stepper » était préférée par rapport à l'aligneur par contact pour tous ses avantages décrits à la section 3.2.4. L'alignement se faisait alors grâce à la reconnaissance du méplat des tranches par le « stepper ». Pour une précision accrue de la photolithographie, l'impression au « stepper » sur la face avant des tranches était alignée grâce à des marqueurs (section 5.1.6.3). Par contre, de tels marqueurs n'ont pas pu être utilisés sur la face arrière, car le « stepper » utilisé n'est pas équipé d'un système d'alignement entre les motifs de la face avant et ceux de la face arrière. Pour anticiper un désalignement des TSV avant et arrière, la gravure a dû être arrêtée de façon précoce à défaut d'absence de critère d'arrêt de gravure par détection de fuite d'hélium fiable.

Étant donné que les TSV arrière n'ont qu'à rejoindre les TSV avant peu importe la position (ils n'ont pas à être totalement centrés l'un à l'autre), un désalignement d'environ 15 μm (diamètre souhaité des TSV arrière divisé par 2) par rapport aux TSV avant était maximale permis. Nous jugions qu'une valeur de 15 μm représentait une assez grande marge d'erreur pour arriver à l'assemblage au « stepper », mais cela n'a pas été le cas. Un résultat au « stepper », après la formation des structures, est présenté à la Figure 6.20.

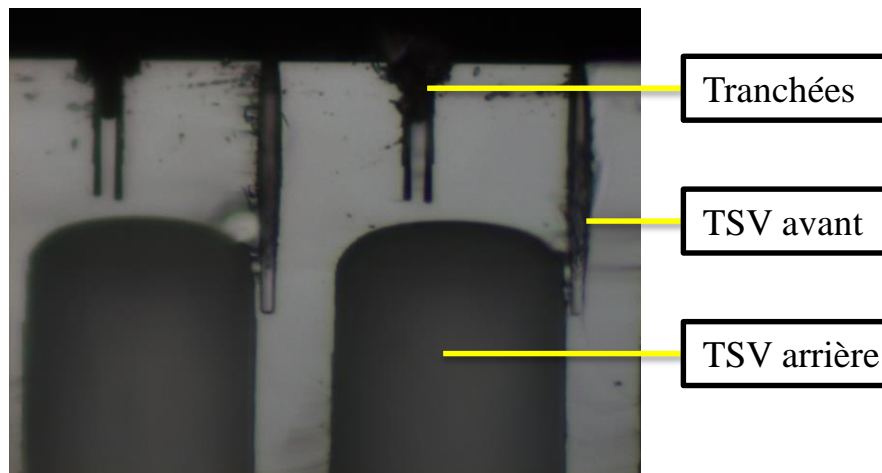


Figure 6.20 : Désalignement entre les TSV avant et les TSV arrière pour une exposition aux UV alignée au « stepper ».

L'image de la Figure 6.20 est un cas observé à mi-distance entre le méplat et le centre pour lequel les TSV arrière n'ont pas rejoint les TSV avant. Les TSV arrière ont d'ailleurs presque rejoint les cavités latérales des tranchées à cause du manque de protection par de la résine lors de la gravure des TSV avant dans les premiers tests. Pour confirmer l'hypothèse que ce désalignement est dû au « stepper », plusieurs endroits ont été inspectés au SEM. À certains endroits, les TSV arrière rejoignaient les cavités latérales des tranchées (Figure 6.21a, Figure 6.21b et Figure 6.21c) et à d'autres, les TSV avant (Figure 6.21d). La Figure 6.22 représente deux images aplaties prises au microscope optique placées l'une par-dessus l'autre à deux endroits différents (centre et bord), avec les tranchées placées vis-à-vis. L'aplatissement des images n'est effectué que pour élargir artificiellement les TSV arrière de sorte à pouvoir mieux distinguer la différence d'alignement.

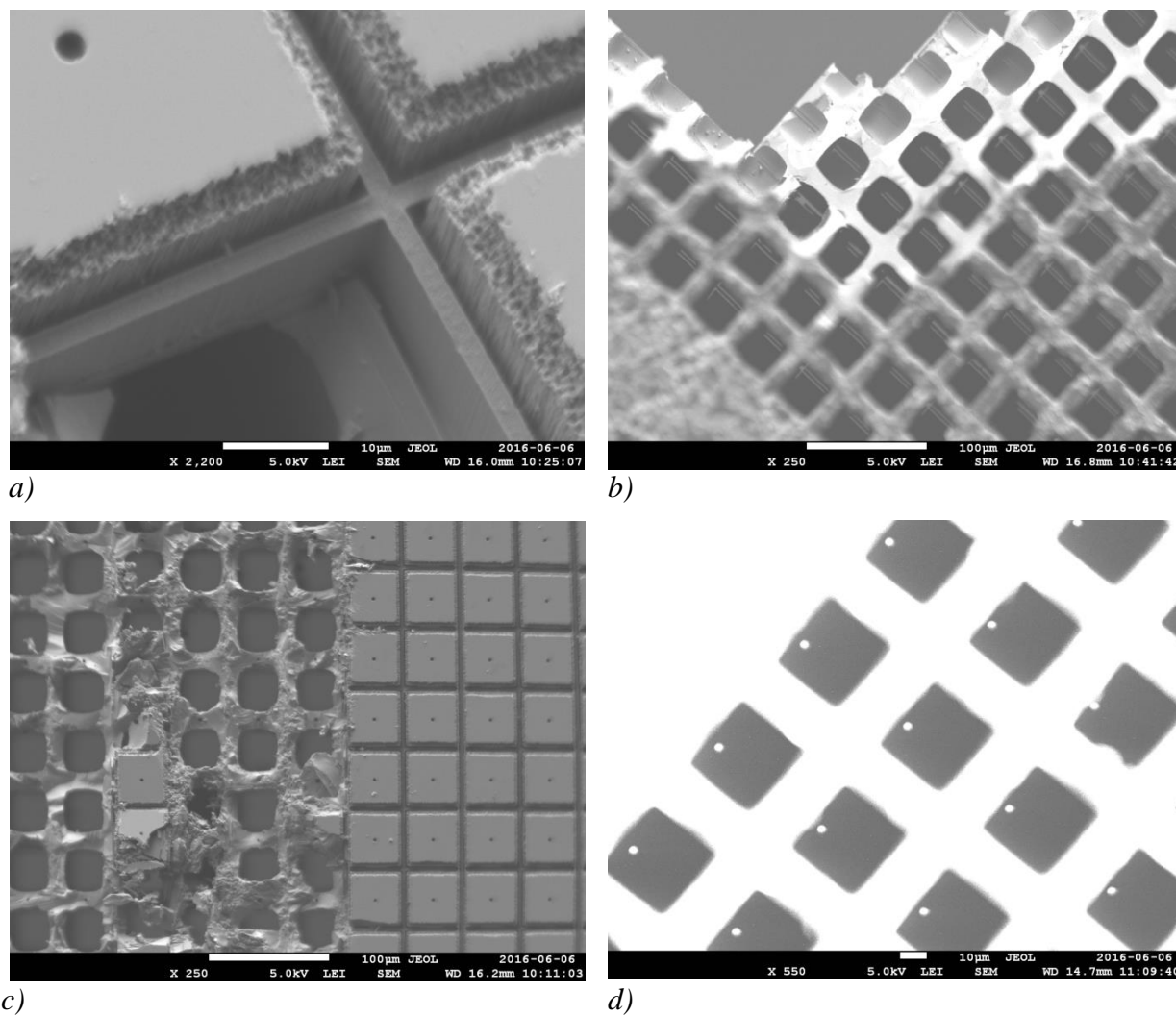


Figure 6.21 : Vues de surface avant (a,c) et arrière (b,d) de différents désalignement entre les TSV avant et les TSV arrière sur une même tranche.

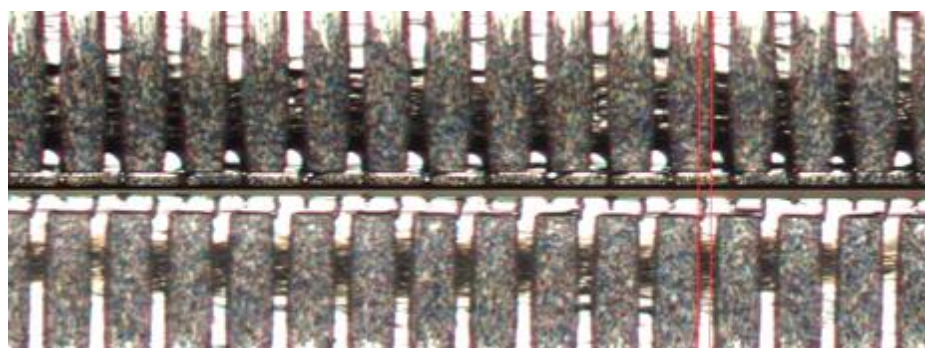


Figure 6.22 : Deux images aplaties placées l'une par-dessus l'autre, avec les tranchées vis-à-vis, à deux endroits différents sur une tranche.

Sur la Figure 6.21a et la Figure 6.21b, nous pouvons voir que les TSV arrière ont rejoint les cavités latérales des tranchées (défauts associées au premier procédé de dépôt; section 6.4.2). Sur la Figure 6.21c aussi, mais cette fois les cavités latérales des tranchées sont alignées vis-à-vis le centre des TSV arrière, au lieu du bord. Les cavités latérales ont rejoint les TSV arrière, malgré le résultat présenté à la Figure 6.20 à cause de l'imperfection d'uniformité de gravure. Finalement, l'image de la Figure 6.21d démontre qu'à certains endroits, les TSV arrière ont bien rejoint les TSV avant. Cette dernière image a été obtenue en intensifiant la luminosité et le contraste d'acquisition au SEM.

À la lumière de ces résultats, il est clair que le désalignement n'est pas le même partout à travers la tranche et donc que l'alignement entre les motifs de la face avant et ceux de la face arrière n'est pas réussi au « stepper ». En revanche, la Figure 6.22 permet de supposer une bonne uniformité de gravure à travers la tranche en termes de forme et de profondeur des structures. Ceci dit, comme le « stepper » que nous utilisons n'est pas équipé pour effectuer un alignement entre les motifs de la face avant et ceux de la face arrière, il a dû être remplacé par l'aligneur par contact. Le résultat obtenu est présenté à la Figure 6.23 (vue de surface) et la Figure 6.24 (vue de profil).

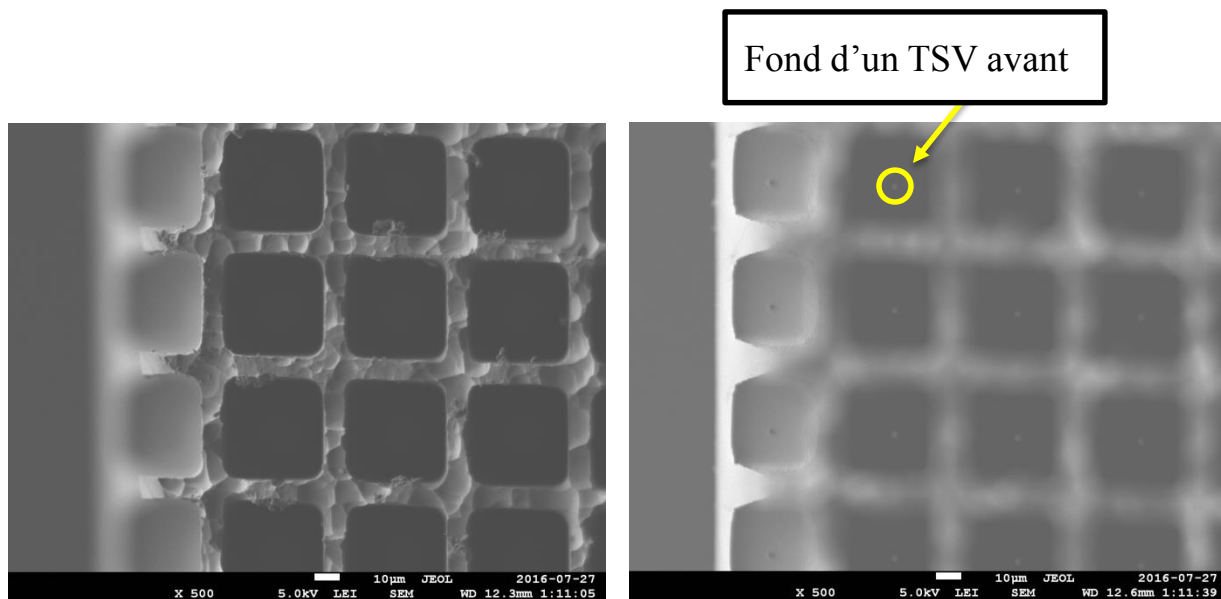


Figure 6.23 : Vue de surface arrière de l'ouverture des TSV arrière pour deux différents focus, démontrant l'alignement réussi à l'aligneur par contact entre les TSV avant et les TSV arrière.

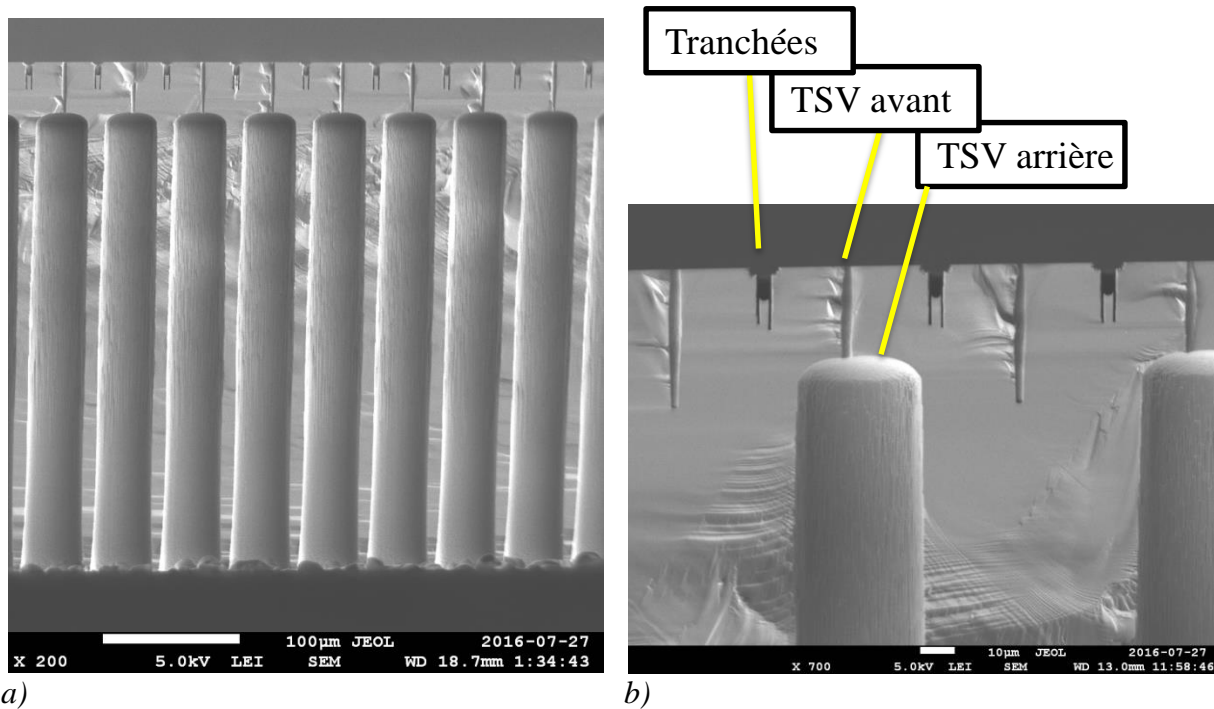


Figure 6.24 : Vue de profil de l'alignement réussi à l'aligneur par contact entre les TSV avant et les TSV arrière à deux endroits sur la tranche : a) au centre et b) au bord.

Aux bords du masque de photolithographie (correspondant au bord de la tranche), la densité de TSV était intentionnellement réduite à 25% afin de pouvoir observer à quel point les TSV arrière ont rejoint les TSV avant en comparant avec des TSV avant intouchés. C'est pourquoi un TSV arrière sur deux est absent de l'image de la Figure 6.24b. Sur cette figure, la profondeur des TSV avant qui ne sont pas vis-à-vis un TSV arrière est de 41,1 μm.

Par rapport à ce qui est espéré :

- La profondeur finale des TSV avant est d'environ 29 μm et celle des TSV arrière, de 346 μm;
- Les TSV arrière rejoignent les TSV avant partout sur la tranche avec un désalignement qui ne varie que de quelques microns en fonction de l'endroit sur la tranche.

L'utilisation de l'aligneur par contact dans le procédé requière toutefois un temps de main d'œuvre élevé pour deux raisons :

- L'aligneur par contact est opéré manuellement pendant tout le traitement d'une tranche;
- Le masque de photolithographie doit être nettoyé fréquemment.

6.4.4 Intersection des TSV avant et arrière

L'intersection obtenue des TSV avant et arrière est présentée en images à la Figure 6.25.

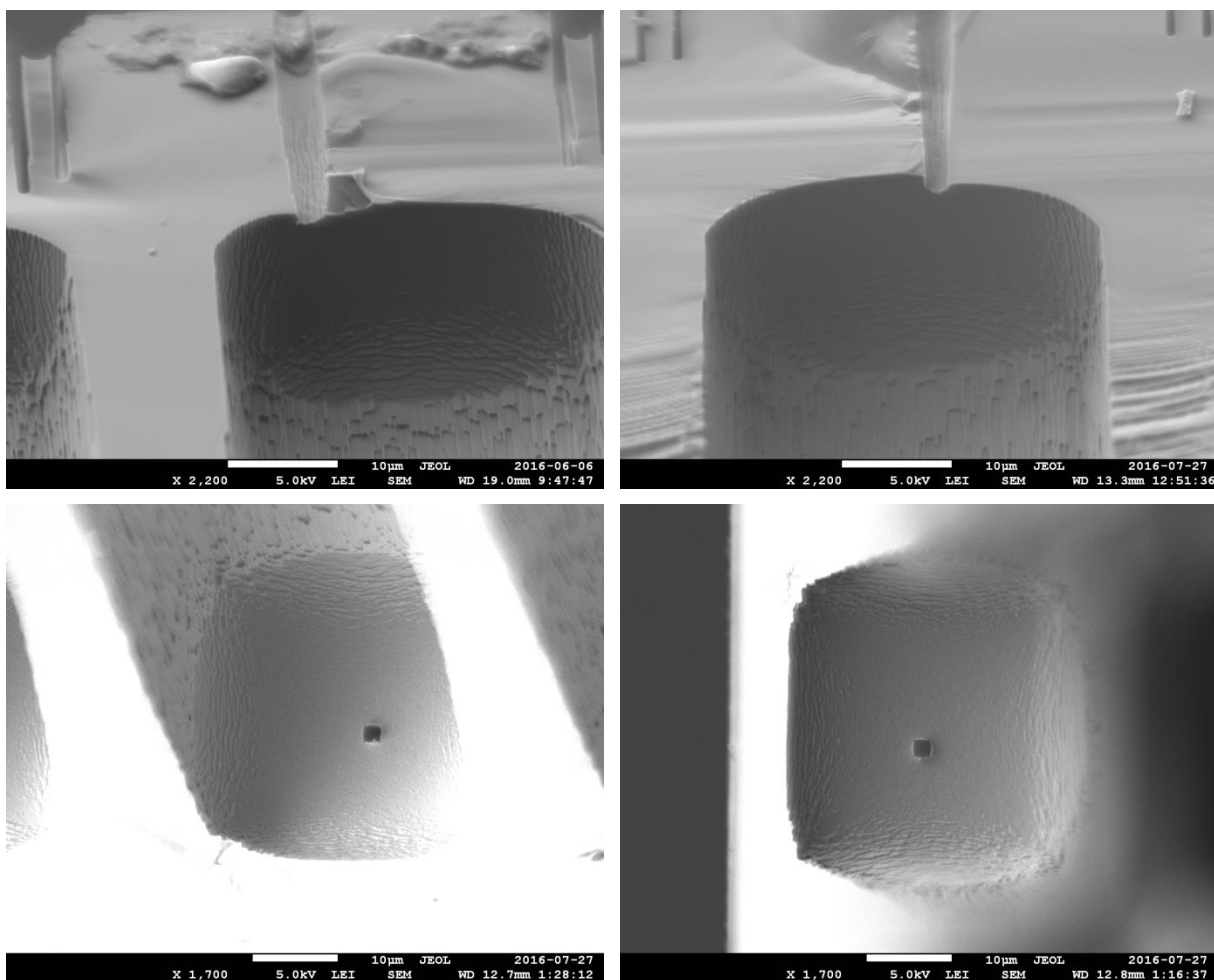


Figure 6.25 : Intersection entre les TSV avant et les TSV arrière.

Sur les images prises au SEM de la Figure 6.25, il est possible de voir une petite déformation à l'intersection, schématisée à la Figure 6.26 pour aider à la distinction.

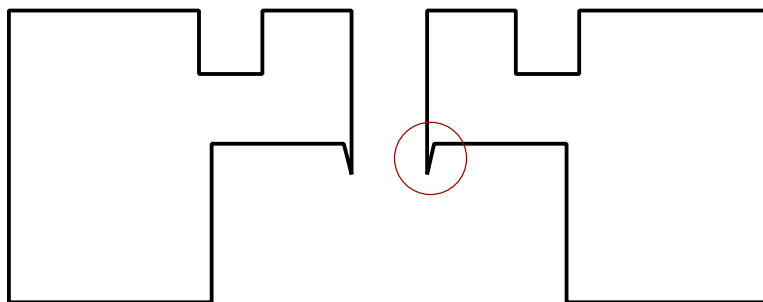


Figure 6.26 : Schéma de la déformation à l'intersection des TSV avant et arrière.

La nature de cette déformation est inconnue, mais deux hypothèses ont pu être posées :

- Polymère résiduel formé au fond des TSV avant suite à leur gravure;

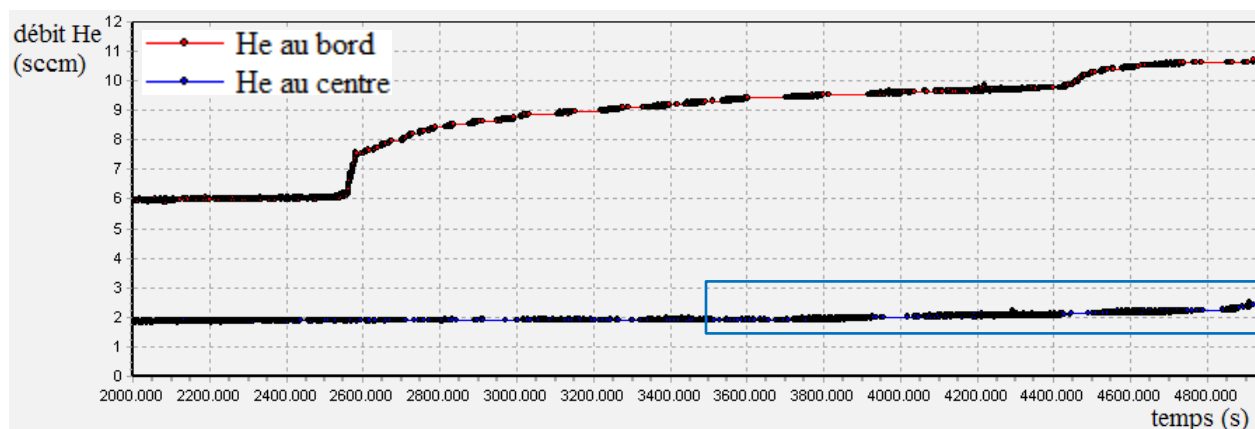
La présence de polymère résiduel pourrait gêner à la gravure. Cependant, les probabilités que cette hypothèse soit valide sont faibles. D'une part, parce que les espèces polymériques parviennent difficilement à atteindre le fond des TSV avant à cause du haut facteur de forme. D'autre part, parce qu'un décapage de résine au plasma O_2 a eu lieu après la formation des TSV avant et que le polymère a donc dû être retiré pendant cette étape (étape g de la Figure 5.7).

- Flux des espèces bouleversé par l'hélium envoyé sous les tranches pendant la gravure des TSV arrière.

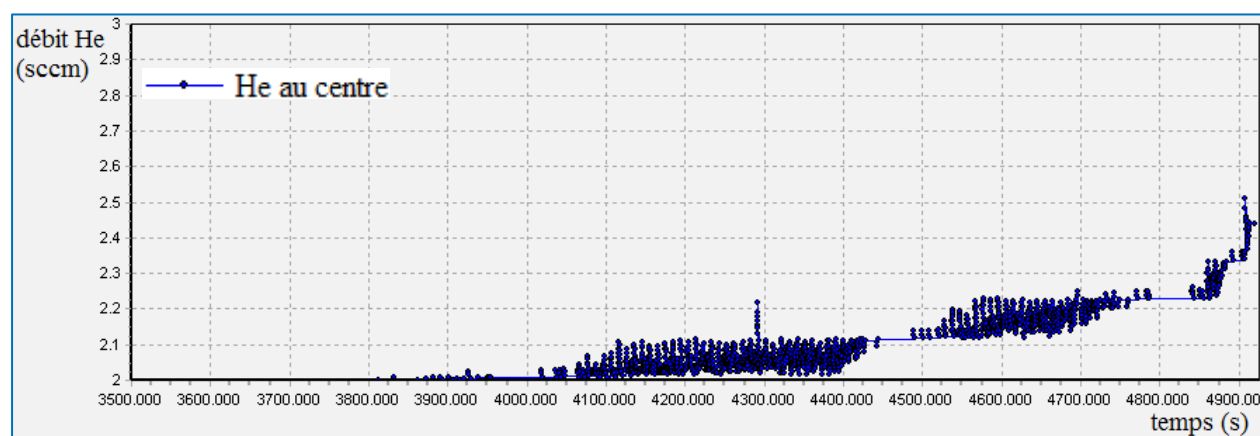
Pendant la gravure des TSV arrière le flux d'hélium envoyé sous la tranche, c'est-à-dire à la surface où se trouvent les TSV avant. Lorsque les TSV arrière rejoignent les TSV avant, l'hélium qui entre par l'ouverture de ces derniers en ressort par l'ouverture des TSV arrière. Un tel flux dans le sens inverse du mouvement des espèces nécessaires à la gravure (qui eux, vont du plasma vers le fond des TSV arrière) pourrait changer leur trajectoire et constitue donc la cause des déformations obtenues.

6.4.5 Détection de fin d'attaque par fuite d'hélium (He-LEPD)

Les gravures des premières tranches de tests devaient être arrêtées manuellement, étant donné l'absence de données pour quantifier le critère de fin d'attaque. Les tests sur la gravure des TSV arrière seuls (résultats de la section 6.3) ont permis d'approximer le temps de gravure à ~1h20min. Les premières courbes de débit d'hélium entrant en fonction du temps obtenues suite à 1h20min de gravure (sans critère de fin d'attaque) sont présentées à la Figure 6.27.



a)



b)

Figure 6.27 : Courbes de débit d'hélium entrant enregistrées lors de la DRIE du premier test d'assemblage. a) vue d'ensemble et b) partie d'intérêt agrandie de la courbe associée au centre de la tranche.

Sur la Figure 6.27, le temps 0 ne correspond pas au moment où commence la gravure, mais plutôt au moment où les données commencent à être enregistrées.

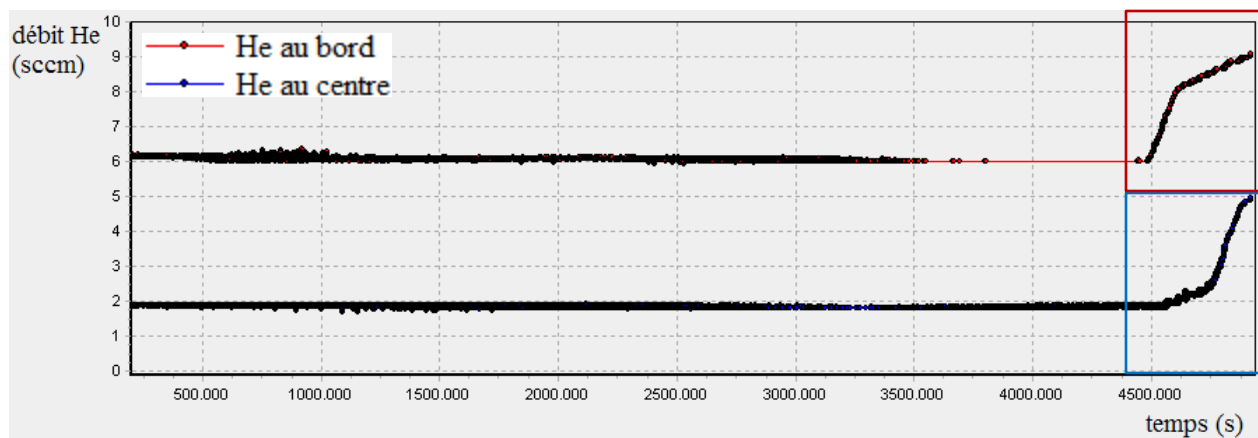
Tel que prévu, des augmentations rapides de la fuite d'hélium sont détectées. La tranche présentait effectivement quelques TSV complets, mais d'autres étaient désalignés à cause du mauvais alignement entre les motifs de la face avant et ceux de la face arrière fait au « stepper » (description de l'équipement à la section 5.1.6.3; résultats d'alignement à la section 6.4.3). La résine était aussi plus mince ($7\text{ }\mu\text{m}$ au lieu de $8,7\text{ }\mu\text{m}$) et un amincissement de $75\text{ }\mu\text{m}$ de la tranche a été mesurée. Aussi, la photo à la Figure 6.28 montre la présence de trous de hautes dimensions formés de bord en bord de la tranche à des endroits protégés par le masque de résine.



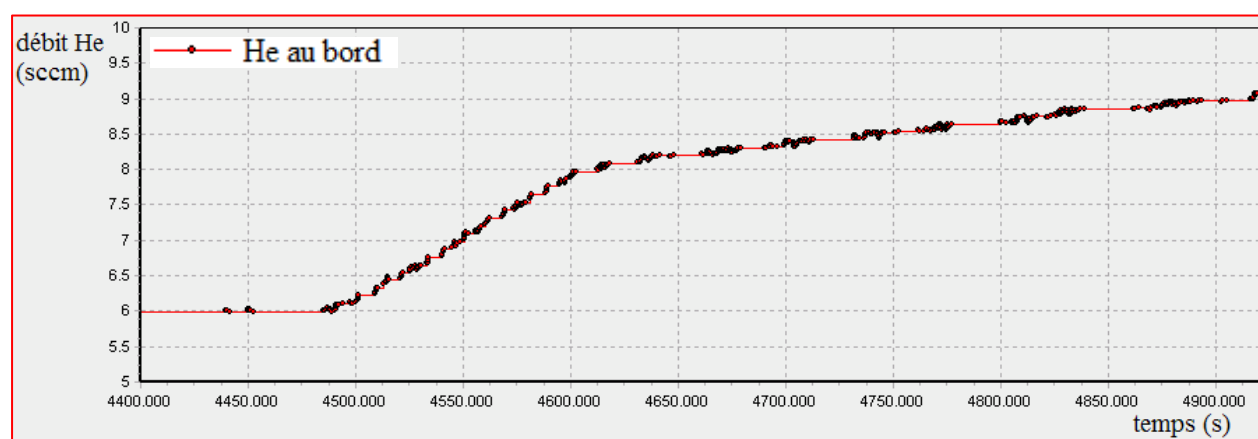
Figure 6.28 : Face arrière d'une tranche après formation des TSV arrière lors du premier test d'assemblage.

Ceci pourrait expliquer le premier point d'inflexion de la courbe de débit d'hélium entrant au bord à $t \approx 2550 \text{ s}$, car ce temps est trop faible pour que les TSV complet ne se soient formés. Ces trous sont dus à la manipulation de la tranche avec des pinces ordinaires de salle blanche. Les endroits touchés par la pince déforme et amincit la résine. Ces défauts dans la résine mènent à des ouvertures plus grandes que celles des TSV arrière et le silicium exposé est donc gravé plus rapidement que ces dernières à cause de l'effet ARDE (section 4.1.2.7). Ils peuvent par contre être évités par une manipulation minimale, un type de pince plus délicat ou en étalant des bouts de ruban adhésif en Kapton® par-dessus les endroits touchés par les pinces. Cette dernière solution n'est toutefois pas idéale pour une production à l'échelle industrielle, puisque le temps de main d'œuvre est plus long, le résultat dépend de l'opérateur et des cellules sont perdues.

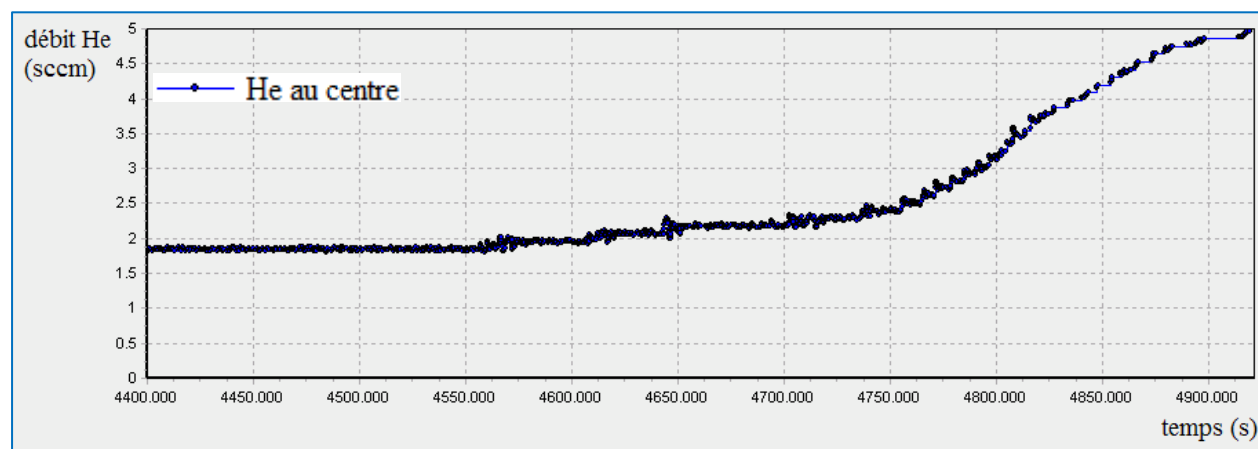
Avec une exposition à l'aligneur par contact, une résine plus épaisse ($8,7 \text{ }\mu\text{m}$) et une manipulation adéquate des tranches, la détection par fuite d'hélium s'est avérée être un succès pour 7 tranches sur 7. Un exemple de courbes de débit d'hélium entrant en fonction du temps est présenté à la Figure 6.29.



a)



b)



c)

Figure 6.29 : Courbes de débit d'hélium entrant enregistrées lors de la DRIE du premier test d'assemblage. a) Vue d'ensemble, b) partie d'intérêt agrandie de la courbe associée au bord de la tranche et c) partie d'intérêt agrandie de la courbe associée au centre de la tranche.

Sur la Figure 6.29, le temps 0 ne correspond pas au moment où commence la gravure, mais plutôt au moment où les données commencent à être enregistrées.

Il a été démontré que la gravure est plus rapide au bord qu'au centre (section 6.3.2). Les TSV complets se forment donc d'abord au bord. Ainsi, conformément aux attentes, la montée rapide de fuite d'hélium est plus précoce au bord qu'au centre (Figure 6.29). Dès que le critère de fin d'attaque est satisfait, la gravure continue pendant 2 minutes, puis s'arrête. Nous supposons alors que tous les TSV complets sont formés (i.e. tous les TSV arrière ont rejoint les TSV avant).

Par ailleurs, le gain d'amplitude similaire entre la courbe du bord et celle du centre à la Figure 6.29 indique que la fuite est provoquée par le même phénomène, soit les TSV arrière qui rejoignent les TSV avant. Ceci montre aussi que la montée précoce présentée à la Figure 6.27, de gain d'amplitude plus élevé, provenait effectivement d'une autre source que la formation complète des TSV; probablement des trous présentés à la Figure 6.28.

À cause du chevauchement par les TSV arrière sur les TSV avant, ces derniers sont rétrécis avec une profondeur finale d'environ $29\text{ }\mu\text{m}$. La plus petite profondeur mesurée au SEM est de $24,8\text{ }\mu\text{m}$ (au bord), mais une profondeur de $20\text{ }\mu\text{m}$ a déjà été trouvée au microscope optique (au bord aussi; cas non aplani à la Figure 6.32). L'objectif de n'avoir que des TSV avant plus profonds que $15\text{ }\mu\text{m}$ est donc atteint. La plus grande profondeur finale mesurée est $33,0\text{ }\mu\text{m}$ (loin du bord). Étant donné la profondeur initiale des TSV avant d'environ $42\text{ }\mu\text{m}$, le temps de surgravure après détection de fin d'attaque pourrait être réduit afin d'obtenir des TSV avant finaux plus profonds et pour consommer moins de résine. Un chevauchement du TSV avant par le TSV arrière reste toutefois recommandé pour assurer l'assemblage, avec des intersections propres, sur toute la surface d'une tranche, étant donné l'uniformité imparfaite de la DRIE.

Une telle technique de He-LEPD n'avait encore jamais été réalisée à Excelitas. Il ne va donc pas sans dire que ces résultats se sont montrés fort intéressants.

6.4.6 Courte conclusion sur l'assemblage

Les tests d'assemblages ont permis d'harmoniser les tranchées, les TSV avant et les TSV arrière sur une même tranche de silicium. Pour avoir une meilleure idée de la comparaison des dimensions des 3 structures, un schéma à l'échelle est dessiné à la Figure 6.30, en comparaison avec une image prise au SEM.

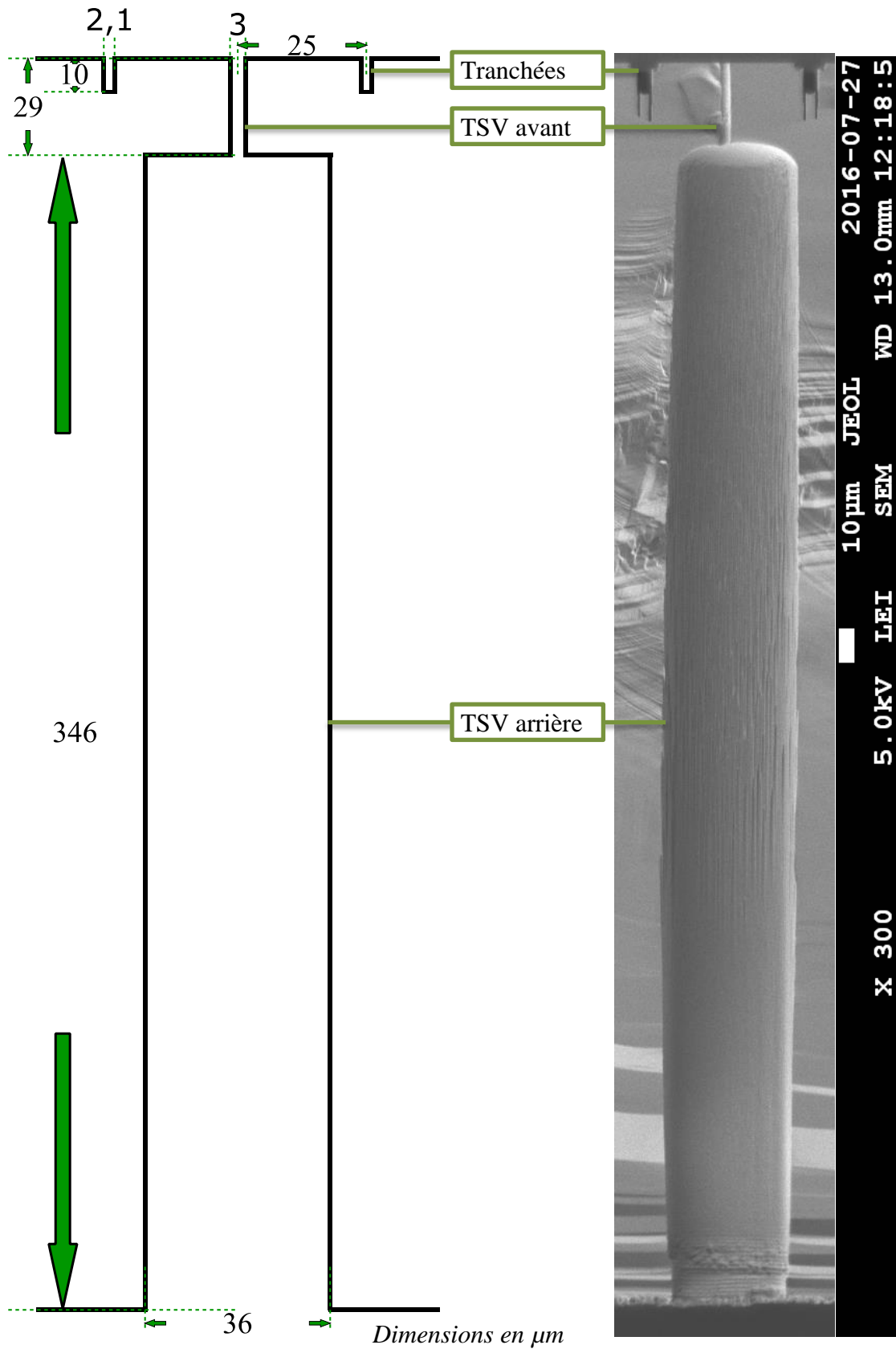


Figure 6.30 : Structures obtenues, schématisées à l'échelle (gauche) et prises au SEM (droite).

Voici les différents couples de structures avec chacune, une courte conclusion des résultats obtenus et des défis à relever.

- *Tranchées – TSV avant*

Durant la gravure des TSV avant, la résine protège mal les côtés des tranchées. Grâce à une amélioration du procédé de dépôt, la mauvaise protection a pu être restreinte uniquement aux points de croisement des tranchées. Le procédé de dépôt de résine doit encore être amélioré. Il est recommandé de tester une augmentation progressive de la vitesse de rotation rapide qui mène à l'épaisseur souhaitée. Sur la Figure 6.30, les tranchées présentées possèdent des cavités latérales, parce qu'aucun échantillon avec des tranchées mieux protégées n'a été inspecté au SEM sans remplissage par du polySi. Un résultat d'assemblage, mais avec du polySi aplani, est présenté à la Figure 6.33 de la section 6.6.

- *TSV avant – TSV arrière*

Les TSV arrière rejoignent bien les TSV avant partout sur les tranches gravées grâce à l'utilisation de l'aligneur par contact. Les TSV sont bien complétés. L'arrêt de gravure par détection de fuite d'hélium s'est avérée être un succès pour toutes les 7 tranches testées. Les dimensions obtenues pour les TSV avant et TSV arrière sont respectivement $3\ \mu\text{m} \times 29\ \mu\text{m}$ et $36\ \mu\text{m} \times 346\ \mu\text{m}$. La marge d'erreur d'alignement acceptable est de $15\ \mu\text{m}$, donc une valeur jugée élevée.

- *Tranchées – TSV arrière*

Avant l'amélioration du procédé de dépôt de résine pour la protection des tranchées pendant la gravure des TSV avant, les tranchées présentaient des cavités latérales qui pouvaient rejoindre les TSV arrière lorsque ceux-ci étaient mal alignés par le « stepper ». Grâce au nouveau procédé de dépôt de résine et à l'utilisation de l'aligneur par contact pour bien aligner les TSV arrière devant les TSV avant, il n'y a plus aucune chance que les TSV arrière rejoignent les tranchées.

6.5 Comparaison des caractéristiques des TSV à la littérature

Le Tableau 6.3 dresse une comparaison entre ce qui est obtenu dans le projet et la littérature. Une partie de ce tableau provient du Tableau 4.1.

Tableau 6.3 : Comparaison entre les caractéristiques de TSV trouvés dans la littérature dans un contexte de recherche et celles des TSV formés durant le projet dans les laboratoires d'Excelitas.

	[22], [23]	[24]	Excelitas (projet)	
			TSV avant	TSV arrière
Dimensions (µm)	3x50	30x142,6	3x42	36x346
AR	16,7	4,8	14,0	9,4
Épaisseur initiale du masque de résine (µm)	4	12	2,8	8,7
Hauteur des scallops (µm)	0,095	< 0,040	1,25 à l'ouverture. Plus profondes indiscernables au SEM.	1,43 à l'ouverture. Plus profondes indiscernables au SEM.

Les facteurs de forme (AR) obtenus pour une même largeur d'ouvertures donnée sont proches de ceux retrouvés dans la littérature. Les TSV avant n'atteignent pas 50 µm, mais avec une épaisseur de résine de 4 µm (comme les références [22], [23]; au lieu de 2,8 µm), la DRIE pourrait durer plus longtemps et les TSV avant pourraient donc être plus profonds. Les TSV arrière obtiennent le record de profondeur (346 µm), ce qui dépasse le double de la référence [24]. Les scallops obtenues sont toutefois beaucoup plus hautes que celles retrouvées dans la littérature et pourraient compromettre à un remplissage uniforme par un matériau.

6.6 Remplissage par du polySi et planarisation

Pour caractériser le remplissage et la planarisation par RIE optique et le SEM sont utilisés.

6.6.1 Résultat espéré

Un remplissage idéal par du polySi consiste à n'obtenir aucun vide dans les tranchées et les TSV avant. Suite à la planarisation par RIE, il est espéré que le polySi retrouvé dans les tranchées et les TSV soit aplani au niveau de leur ouverture et que le reste du polySi soit complètement retiré. La Figure 6.31 illustre de tels résultats espérés.

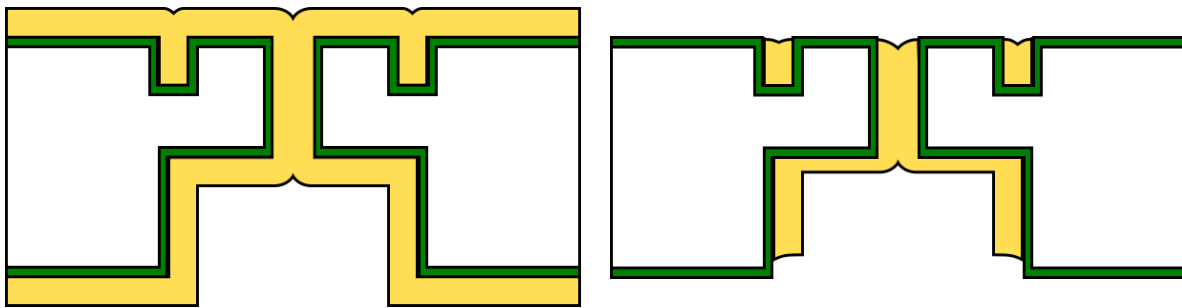


Figure 6.31 : Résultats espérés suite au dépôt de 2 μm de polySi par LPCVD (gauche) et suite à la planarisation par deux RIE (droite).

Il est prévu d'obtenir des cavités dans le polySi au sein des tranchées et des TSV avant. Celles-ci ne causent pas un problème s'il est démontré expérimentalement que les contraintes mécaniques engendrées n'empêchent pas la manipulation des tranches. Dans ce cas, des tests de manipulation avec des pinces ordinaires de salle blanche et de support sur un plateau à vide doivent être effectués afin d'assurer que les tranches peuvent passer à d'autres étapes de microfabrication.

6.6.2 Remplissage et planarisation

Les images obtenues pour les différents types de structure sont présentées à la Figure 6.32, en comparant les cas avant (microscope optique) et après (SEM) planarisation par RIE.

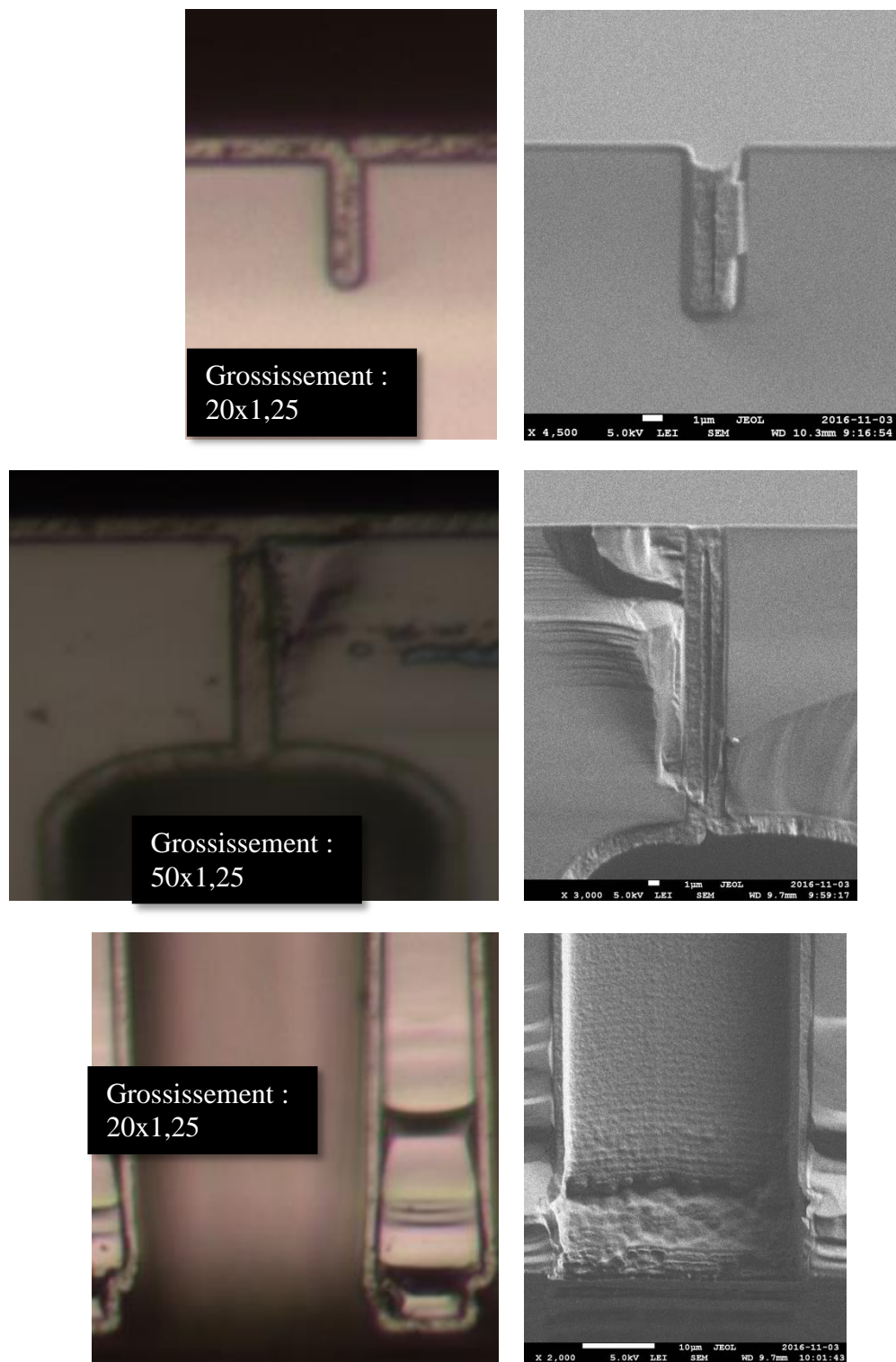


Figure 6.32 : Structures avant planarisation (gauche) et après planarisation (droite) par RIE.

Sur la Figure 6.32, les images de gauche proviennent toutes du même endroit sur la tranche. Idem pour les images de droite sur une autre tranche.

Juste après le LPCVD, l'épaisseur de 2 μm de polySi est confirmée par des mesures au microscope optique : sur la face avant, sur la face arrière, sur les parois des TSV arrière et au fond des TSV arrière. Même avec la présence des cratères formés à l'ouverture des TSV arrière, le polySi a pu tout couvrir.

Après planarisation par RIE, l'absence de polySi sur les deux surfaces des tranches, observées à plusieurs endroits au microscope optique et au SEM, permet de conclure que la planarisation est un succès. Les tranches peuvent même être manipulées par des pinces ordinaires de salle blanche et résistent mécaniquement au support d'un plateau à vide pour d'autres étapes de microfabrication. Les épaisseurs de polySi sur les parois et au fond des TSV arrière sont mesurées au SEM : 1,50 μm au fond et 1,63 μm sur les parois. Ceci dit, la RIE ne retire pas complètement le polySi déposé au fond des TSV arrière; seulement le polySi déposé sur les surfaces sans motifs. Les résultats satisfont donc les exigences du mandat. Par contre, certains défauts ont pu être observés suite à la planarisation : une surgravure verticale à l'ouverture des tranchées et une cavité au sein des TSV avant. Aussi, le temps de RIE nécessaire à la planarisation varie d'une tranche à l'autre, ce qui pourrait être amélioré (section 6.6.2.3).

6.6.2.1 Surgravure verticale du polySi à l'ouverture des tranchées.

Ce défaut à l'ouverture des tranchées pourrait gêner aux étapes subséquentes retrouvées dans le procédé de microfabrication des SiPM. Les TSV avant n'ont pas ce défaut, parce que qu'il est plus difficile pour les espèces réactives du plasma de graver aux petites ouvertures circulaires des TSV avant qu'aux longues ouvertures rectangulaires des tranchées (effet ARDE, section 4.1.2.7). La profondeur de surgravure (1,33 μm) est toutefois faible par rapport à la largeur des tranchées (2,1 μm), ce qui est encourageant pour la réussite d'étapes éventuelles de recouvrement par de la résine.

Si cela pose problème, plusieurs solutions existent. 1) Une oxydation thermique pourrait aider à diminuer le volume surgravé en l'encomrant d'oxyde. 2) L'établissement d'un critère d'arrêt de gravure par détection de fin d'attaque assurerait d'obtenir une surgravure minimale et avec toujours la même profondeur. 3) Une pression élevée à la fin de la RIE réduirait le taux de gravure dans les structures en empêchant les produits de gravure de quitter les structures, sans trop réduire le taux de gravure sur les surfaces sans structures.

6.6.2.2 Une cavité au sein de certains TSV avant.

Comme prévu, les tranchées, mais surtout les TSV avant, possèdent une cavité. Des tests de manipulation avec des pinces ordinaires de salle blanche et de support sur des plateaux à vide se sont avérés fructueux. Les tranches avec du polySi aplani, même si des cavités se retrouvent au sein des structures, sont parfaitement manipulables. Des tests à budget thermique élevé restent à être faits, car le gaz emprisonné dans les cavités pourraient, sous l'effet d'une température élevée, entrer en expansion et provoquer des contraintes mécaniques importantes. Une remarque intéressante est que les tranches étaient difficilement clivables à travers les TSV avant. Les cavités dans les TSV avant sont localisées et ne suivent pas de façon parallèle les plans cristallins de la tranche de silicium. Ceci est donc un avantage pour la robustesse des tranches au plan des contraintes mécaniques supportables. Les cavités dans les tranchées suivent les plans cristallins, mais contrairement à celles des TSV avant, elles sont peu volumineuses.

Une réduction du « bowing » des TSV avant peut aider à réduire le volume des cavités. Deux façons de le faire sont 1) abaisser la pression pendant la phase de retrait de polymère du procédé Bosch et 2) augmenter la puissance RF appliquée au plateau, afin d'améliorer la directionnalité des bombardements ioniques.

6.6.2.3 Reproductibilité de la planarisation

Le temps de RIE nécessaire à la planarisation varie d'une tranche à l'autre même si celles-ci subissent exactement les mêmes étapes de procédé. Ce genre d'observation est courant en production étant donné que les moindres différences de l'état des machines, des manipulations ou des conditions environnementales peuvent compromettre la reproductibilité de certains procédés. Pour améliorer la reproductibilité de la RIE, un critère de fin d'attaque par spectrométrie pourrait être mis en place grâce à l'oxyde située sous la couche de polySi. En effet, à la couche d'oxyde, les produits de gravure ne sont plus les mêmes et la composition du plasma se voit donc également modifiée (section 3.3.1). Le réacteur de RIE utilisé est muni d'un spectromètre capable de mesurer la longueur d'onde émise par le plasma, qui dépend de sa composition, et donc de signaler l'arrêt de gravure (section 5.1.6.11). Toutefois, dans le cadre de ce projet, le nombre de tranches disponibles était insuffisant à cause de la très rare disponibilité des tubes de LPCVD et donc une valeur fiable de signal comme critère de fin d'attaque n'a pas pu être trouvée.

6.6.3 Courte conclusion sur le remplissage par du polySi et la planarisation

Déposer 2 μm de polySi par LPCVD permet de remplir les tranchées et les TSV. Des cavités sont formées à l'intérieur des structures, mais elles ne gênent pas la manipulation des tranches : des pinces ordinaires de salle blanche et des plateaux à vide peuvent être utilisés sans risque de les briser. Les tranches sont donc bien préparées pour d'autres étapes de microfabrication. Les structures obtenues après planarisation sont présentées à la Figure 6.33.

La planarisation par RIE s'est aussi avérée être un succès, puisqu'aucune trace de polySi n'a pu être repéré sur les échantillons inspectés au microscope optique et au SEM. Il existe une surgravure verticale à l'ouverture des tranchées, mais leur faible profondeur (1,33 μm) par rapport à l'ouverture des tranchées (2,1 μm) laisse supposer qu'un recouvrement par de la résine sera possible dans les étapes subséquentes du procédé de microfabrication des SiPM.

La reproductibilité du procédé de RIE établi est toutefois faible : le temps nécessaire à la planarisation varie d'une tranche à l'autre. Un critère de fin d'attaque par spectrométrie pourrait être établi grâce au spectromètre intégré au réacteur de RIE utilisé.

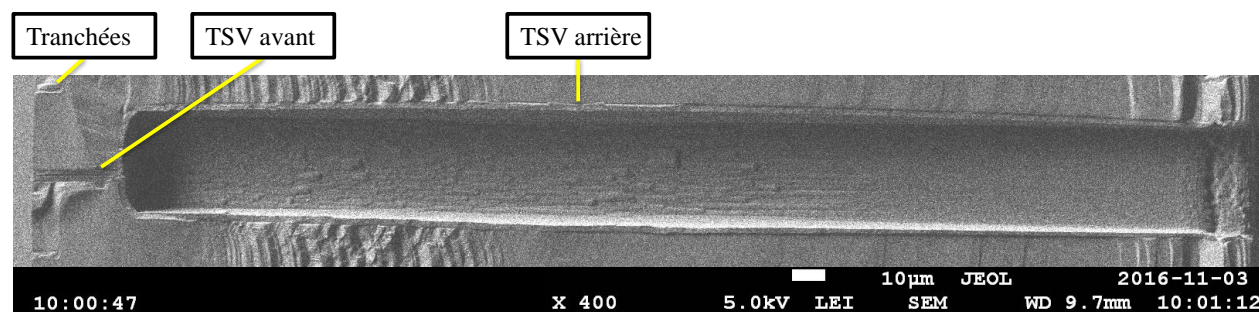


Figure 6.33 : Structures obtenues, prises au SEM, avec polySi aplani (2 images collées).

6.7 Effets sur le taux de gravure de résine par photostabilisation avec des UV et à température ambiante après développement

En théorie, l'élévation de température pendant la photostabilisation est nécessaire afin de réduire l'humidité dans l'air qui empêche la formation de liaisons polymériques entre la résine (positive, avec sensibilisateurs de type DNQ) et les molécules de cétènes (section 3.2.1). Pourtant, nous avons observé lors de l'expérience en présence des couches de diélectriques (section 6.2.7) que la résine B ne subissait pas de réticulation pendant la RIE seulement dans le cas où elle subissait une photostabilisation et ce, même à humidité et température ambiantes (contrôlées en salle

blanche). C'est d'ailleurs pour cette raison que des étapes de photostabilisation sont ajoutées au procédé de test. À défaut de trouver dans la littérature une telle expérience à température ambiante pour les résines A et B utilisées dans le projet, ce résultat nous a poussés à évaluer l'influence de la photostabilisation à température ambiante sur le taux de gravure de ces résines lorsque soumises aux procédés de DRIE établis.

Pour ces tests, des tranches de 150 mm sont utilisées et les procédés de dépôt et de gravure sont les mêmes qu'utilisés précédemment, c'est-à-dire :

- 2,8 μm de résine A (utilisée pour la formation des TSV avant) : étapes e) et f) de la section 5.3.1, mais sans exposition et pour 5 séquences de 4 minutes de DRIE.
- 8,7 μm de résine B (utilisée pour la formation des TSV arrière) : étapes h) et i) de la section 5.3.1, mais traitées sur la face avant des tranches, sans exposition et pour 5 séquences de 10 minutes de DRIE.

La photostabilisation se fait à température ambiante dans un photoréacteur UV pendant 1000 s. La mesure d'épaisseur de résine résiduelle est mesurée au FRT à 5 endroits différents sur les tranches : au centre et au bord à 0° (près du méplat), à 90° , à 180° et à 270° . Il est important de mentionner que ce test ne vise pas à comparer les résine A et B entre elles. Il peut être toutefois pertinent de mentionner que : la résine A absorbe mieux les DUV (spectre d'opération du photoréacteur) que la résine B.

Les moyennes d'épaisseurs mesurées au FRT en fonction du temps de DRIE sont présentées sous forme de graphiques à la Figure 6.34.

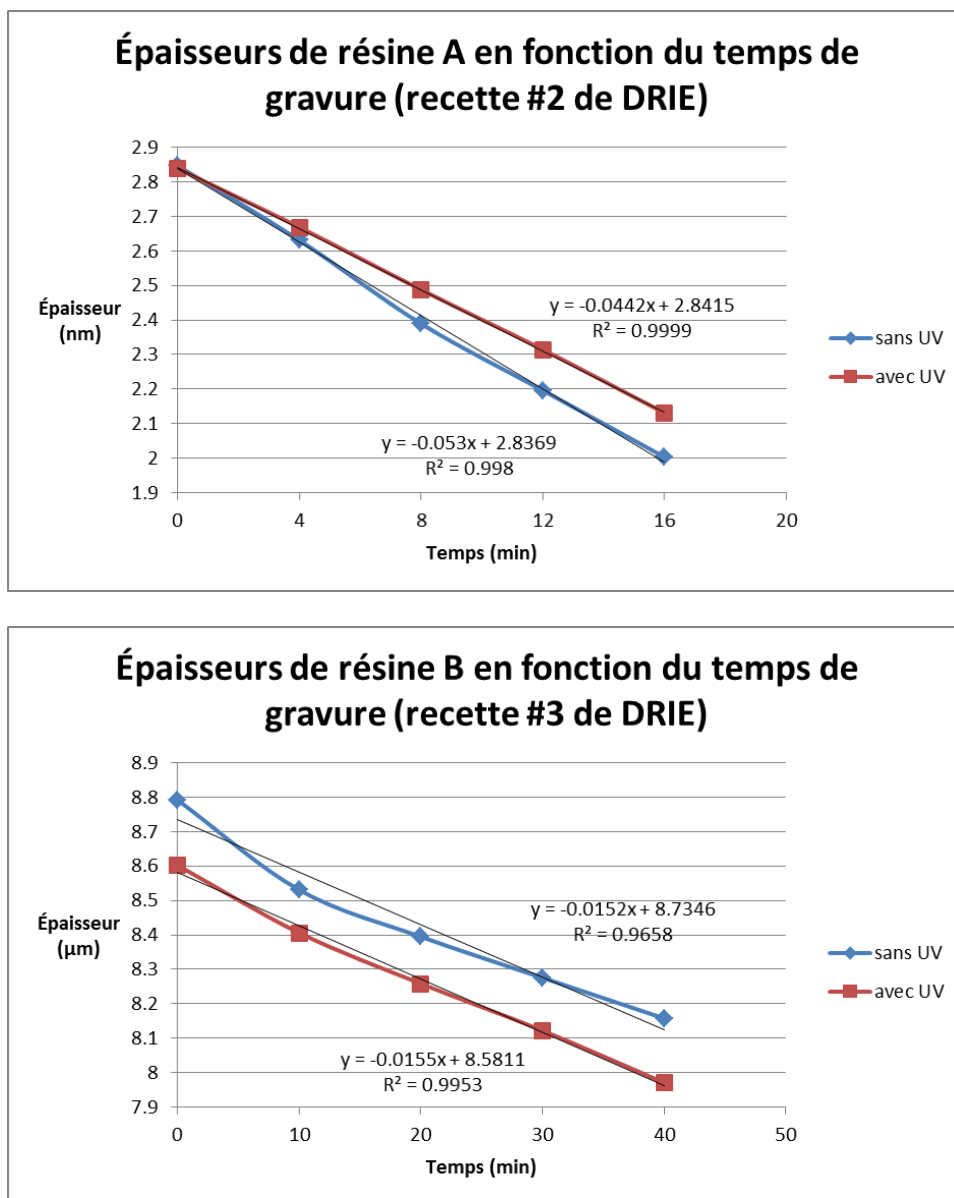


Figure 6.34 : Épaisseurs des résines A et B en fonction du temps pour le cas sans photostabilisation (« sans UV ») et avec photostabilisation (« avec UV »).

À la lumière de ces résultats :

- La résine A est consommée moins vite lorsqu'elle est soumise aux UV de 16.6%. En d'autres mots, on obtient une sélectivité à la résine A améliorée de 16.6% en l'exposant aux UV pendant 1000 s dans le photoréacteur.
- Le taux de gravure de la résine B est sensiblement égal qu'elle soit soumise ou non aux UV. Son graphique montre que la gravure est même un peu plus rapide lorsque la résine

SPR est soumise aux UV, mais seulement de l'ordre du dixième de pourcent. Il est à noter que le premier point (au temps 0) de la courbe sans UV semble être une donnée aberrante. C'est parce que pour ce point uniquement, la résine (B) n'avait subi ni photostabilisation au photoréacteur, ni DRIE, ni cuisson forte. Le solvant résiduel se trouvait donc en grande quantité, épaississant la résine. Ainsi, si nous enlevions cette donnée, la résine B serait gravée plus rapidement dans le cas avec UV que dans le cas sans UV. Cette constatation est surprenante et nous ne savons pas comment expliquer ce phénomène.

- Notons que dans le cas de la résine B, la « vraie » recette de DRIE dure environ 1h20min et consomme pratiquement toute la résine, tellement que des cratères se forment à la surface du silicium à protéger (voir Figure 6.15). Ici, même après 40 minutes de gravure, nous avons une grande épaisseur résiduelle de $\sim 8.1 \mu\text{m}$. Cette différence de vitesse de gravure s'explique soit :
 - par le fait que des phases d'attente à température ambiante (refroidissement) entre les séquences de gravure permettent à la résine de retrouver un état plus résistant à la gravure;
 - et/ou par le fait que les masques de résine sont vierges (évolution différente de la température au cours de la gravure et consommation des espèces plus uniforme).

Pour la gravure des TSV, des tranches 100 mm étaient utilisées (contrairement à 150 mm utilisées ici), mais cela ne peut pas expliquer la consommation de $7 \mu\text{m}$ de plus. Il serait donc intéressant de continuer ces tests en comparant ces résultats avec les taux de gravure obtenus lorsqu'il y a une haute densité de motifs (exemple : TSV arrière) et aussi, en effectuant les mêmes tests, mais sans phase d'attente, c'est-à-dire après 16 minutes et 40 minutes pour les résines A et B respectivement.

Ces résultats n'expliquent pas pourquoi la photostabilisation de la résine B rend cette dernière plus résistante à la réticulation (à ne pas confondre avec la résistance à la gravure). La présence de défauts en forme de bulles sur la résine B qui n'est pas passée par photostabilisation permet de supposer une expansion thermique d'un gaz au sein de la résine. Ce gaz se serait ensuite échappé par évaporation : de l'azote ou du solvant résiduel? Une photostabilisation à température ambiante ne permet pas de se débarrasser du solvant contenu dans la résine, mais se débarrasse de l'azote des molécules de DNQ. Pour cette raison, nous émettons l'hypothèse que les défauts en

forme de bulles proviennent de l'expansion thermique de l'azote contenu dans la résine suite à l'élévation de température durant la RIE.

Des tests de photostabilisation à haute température permettraient de contrôler l'humidité pendant le procédé et de voir l'influence de la température sur la sélectivité de gravure. Ceci sera possible dans le futur, puisqu'Excelitas vient de faire l'acquisition d'une machine prévue à cet effet.

6.8 Vidage des TSV remplis par du polySi

Le vidage des structures n'a pas été testé à cause d'un évènement majeur à Excelitas qui a forcé la conversion prématurée du réacteur de DRIE pour le traitement de tranches 150 mm. Pour ce faire, il est recommandé de commencer à tester le même procédé de DRIE qu'utilisé pour la formation des TSV avant et des TSV arrière, avec l'arrêt de gravure par détection de fuite d'hélium.

6.9 Choix du tungstène pour la métallisation

La métallisation constitue l'étape de remplissage par du W et n'a pas pu être effectuée étant donné qu'Excelitas ne dispose présentement pas des capacités pour le faire. Aucun collaborateur qui avait les capacités pour le faire à un coût et un délai raisonnables n'a pu être trouvé.

Dans le design suggéré pour l'implémentation des TSV dans les SiPM, les lignes de conduction électrique doivent avoir la plus petite résistance électrique possible afin de ne pas nuire au courant électrique qui les traverse. Comme point de repère, la résistivité électrique du matériau passant à travers les TSV ne doit pas dépasser celle des lignes d'aluminium utilisées présentement à la surface des SiPM. Ces lignes d'aluminium sont modélisées à la Figure 6.35a par un prisme à base rectangulaire. Le volume de métal qui passe dans les TSV est modélisé en trois parties à la Figure 6.35 pour le cas souhaité (b) et le cas obtenu (c) en considérant un dépôt de 80 nm de TiN.

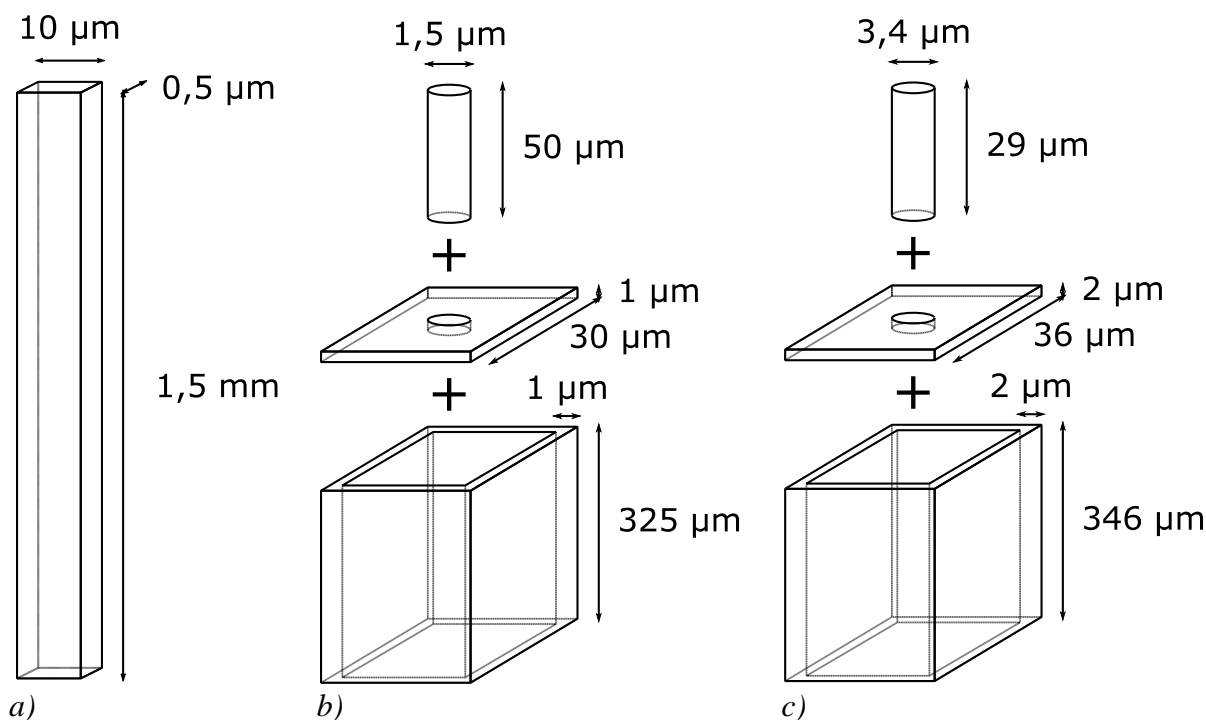


Figure 6.35 : Modélisations en structures simples a) des lignes d'Al présentement à la surface des SiPM et b) du métal dans des TSV de dimensions souhaitées et c) de dimensions obtenues.

D'une part, le diamètre souhaité des TSV avant à la fin du procédé de test se distingue de celui directement après leur formation à cause des étapes d'oxydation thermique et du dépôt de TiN ($1,5\ \mu\text{m}$ au lieu de $2,2\ \mu\text{m}$; voir calculs en Annexe D).

D'autre part, le diamètre obtenu correspond à la largeur la plus élevée mesurée au SEM ($3,53\ \mu\text{m}$) suite à l'étape de planarisation du polySi (TSV avant de la Figure 6.32) soustraite par deux fois l'épaisseur de TiN souhaitée ($80\ \text{nm}$ de chaque côté, donc $3,53 - 2 \times 0,08 \approx 3,4\ \mu\text{m}$). La largeur la plus élevée est choisie pour nous assurer que même le pire cas retrouvé résulte en une résistance électrique satisfaisante. La largeur des TSV arrière est aussi affectée par le TiN et les étapes d'oxydation, mais la différence est jugée négligeable par rapport aux dimensions initiales.

Pour nous assurer d'un remplissage convenable des structures, il faudrait déposer une épaisseur de métal plus grande ou égale à la moitié de la largeur des TSV avant. Dans le cas souhaité, nous estimons qu'un dépôt de $1\ \mu\text{m}$ de métal serait suffisant pour remplir complètement les TSV avant. Dans le cas obtenu, il faudrait environ $2\ \mu\text{m}$.

Étant donné la configuration en série, la résistance équivalente pour les trois parties des TSV se trouve par addition des résistances calculées indépendamment. La résistance d'une structure peut être calculée par l'équation (E.1) fournie en Annexe E.

6.9.1.1 Résistance électrique des lignes d'aluminium à la surface des SiPM

Soit R_{Al} la résistance électrique d'une ligne d'aluminium et de résistivité électrique ρ_{Al} .

$$R_{Al} = \rho_{Al} \frac{l}{A} \quad (6.12)$$

$$\rho_{Al} = 0,027 \, \Omega \cdot \mu m \text{ [78]}$$

$$l = 1500 \, \mu m$$

$$A = 10 \times 0,5 \, \mu m^2$$

$$\therefore R_{Al} = (0,027) \left(\frac{1500}{10 \times 0,5} \right) = 8,1 \, \Omega \quad (6.13)$$

6.9.1.2 Résistance électrique des lignes de métal dans les TSV de dimensions souhaitées

Soit R_{avant} , $R_{intersection}$ et $R_{arriere}$ les résistances électriques associées à chaque partie du TSV identifiée en indice. La résistance électrique du TSV complet R_{TSV} est calculée via l'équation (6.14).

$$R_{TSV} = R_{avant} + R_{intersection} + R_{arriere} \quad (6.14)$$

Le courant passe d'abord dans le cylindre (TSV avant), puis du centre de l'intersection vers les parois du TSV arrière, puis longe ces dernières jusqu'à l'ouverture carrée des TSV arrière. R_{avant} et $R_{arriere}$ peuvent être calculées directement par l'équation (6.12).

$$R_{avant} = \rho \frac{50}{\pi \left(\frac{1,5}{2} \right)^2} = \rho (28,29 \, \mu m^{-1}) \quad (6.15)$$

$$R_{arriere} = \rho \left(\frac{325}{30^2 - (30 - 1)^2} \right) = \rho (5,51 \, \mu m^{-1}) \quad (6.16)$$

Le calcul de $R_{intersection}$ passe par des mathématiques plus avancées. Pour simplifier, nous surestimons la valeur de $R_{intersection}$ en utilisant un cylindre de diamètre égal à la diagonale de la base carrée de l'intersection, tel qu'illustré à la Figure 6.36.

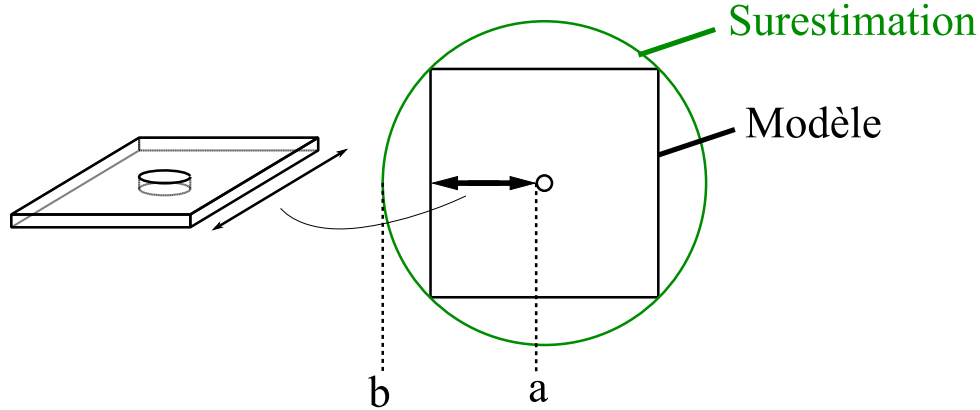


Figure 6.36 : Conversion du modèle d'un prisme à base carrée en un cylindre pour simplifier le calcul de résistance électrique, menant à une valeur surestimée.

Le calcul se rapporte donc à celui pour la résistance radiale d'un câble coaxial, le cœur étant le TSV avant et la gaine, l'intersection. En partant de l'équation (6.12) et en posant l comme une valeur infinitésimale dr , le différentiel de résistance dR se définit comme suit :

$$dR = \rho \frac{dr}{A(r)} \quad (6.17)$$

Soit h l'épaisseur de métal à l'intersection (égale à l'épaisseur déposée). L'aire des parois du cylindre se calcule alors ainsi :

$$A(r) = 2\pi r h \quad (6.18)$$

Ainsi, des équations (6.17) et (6.18),

$$dR = \frac{\rho}{2\pi h} \cdot \frac{dr}{r} \quad (6.19)$$

$$\int dR = R_{intersect} = \frac{\rho}{2\pi h} \int_a^b \frac{dr}{r} \quad (6.20)$$

$$= \frac{\rho}{2\pi h} [\ln(b) - \ln(a)] \quad (6.21)$$

$$\Rightarrow R_{intersect} = \frac{\rho}{2\pi h} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (6.22)$$

Où a et b sont des distances entre le centre de l'intersection (i.e. centre du TSV) et les endroits identifiés à la Figure 6.36.

La valeur surestimée de $R_{intersect}$ en fonction de ρ est donc :

$$R_{intersect} = \frac{\rho}{2\pi(1)} \ln\left(\frac{30\sqrt{2}}{\frac{1,5}{2}}\right) = \rho(0,64 \mu m^{-1}) \quad (6.23)$$

La résistance électrique théorique du cas des dimensions souhaitées (Figure 6.35b) est donc :

$$R_{TSV}^{souhait} = \rho(28,29 \mu m^{-1}) + \rho(5,51 \mu m^{-1}) + \rho(0,64 \mu m^{-1}) \quad (6.24)$$

$$= \rho(34,44 \mu m^{-1}) \quad (6.25)$$

Pour le tungstène, $\rho_W = 0,112 \Omega \cdot \mu m$ [78], donc :

$$R_{TSV}^{souhait} = 0,112(34,44) = 3,86 \Omega \quad (6.26)$$

La discussion sur cette valeur à la section 6.9.1.4.

6.9.1.3 Résistance électrique des lignes de tungstène dans les TSV de dimensions obtenues

De la même façon qu'à la section 6.9.1.2, mais avec les dimensions obtenues (Figure 6.35c) :

$$R_{avant} = \rho \frac{29}{\pi \left(\frac{3,4}{2}\right)^2} = \rho(3,19 \mu m^{-1}) \quad (6.27)$$

$$R_{arriere} = \rho \left(\frac{346}{36^2 - (36 - 2)^2} \right) = \rho(2,47 \mu m^{-1}) \quad (6.28)$$

$$R_{intersect} = \frac{\rho}{2\pi(2)} \ln\left(\frac{36\sqrt{2}}{\frac{3,4}{2}}\right) = \rho(0,27 \mu m^{-1}) \quad (6.29)$$

Donc,

$$R_{TSV}^{obtenu} = \rho(3,19 \mu m^{-1}) + \rho(2,47 \mu m^{-1}) + \rho(0,27 \mu m^{-1}) \quad (6.30)$$

$$= \rho(5,93 \mu m^{-1}) \quad (6.31)$$

Pour le tungstène, $\rho_W = 0,112 \Omega \cdot \mu m$ [78], donc :

$$R_{TSV}^{obtenu} = 0,112(5,93) = 0,66 \Omega \quad (6.32)$$

La discussion sur cette valeur à la section 6.9.1.4.

6.9.1.4 Discussion sur le choix de W pour la métallisation

Dans le cas de dimensions souhaitées, $R_{TSV} = 3,86 \Omega$ et pour le cas des dimensions obtenues, $R_{TSV} = 0,66 \Omega$. Dans les deux cas, $R_{TSV} < R_{Al} = 8,1 \Omega$. Le W s'avère donc théoriquement un matériau de choix en termes de résistance électrique. La résistivité électrique maximale ρ_{max} à ne pas dépasser peut être calculée en introduisant la valeur de résistance électrique des lignes d'Al trouvée ($R_{Al} = 8,1 \Omega$) dans les équations (6.25) et (6.31) dérivées aux sections précédentes.

$$\rho_{max}^{souhait} = \frac{8,1}{34,44 \mu m^{-1}} = 0,23 \Omega \cdot \mu m \quad (6.33)$$

$$\rho_{max}^{obtenus} = \frac{8,1}{5,93 \mu m^{-1}} = 1,37 \Omega \cdot \mu m \quad (6.34)$$

Les dimensions obtenues présentent une résistance électrique plus faible et offrent donc un plus grand éventail de choix de matériau pour le remplissage que dans le cas initialement souhaité. Dans tous les cas, le polySi, même s'il est dopé-N par $10^{16} at/cm^{-2}$ de phosphore (plus faible résistivité électrique trouvée dans l'ouvrage de XIE : $\rho_{polySi-N} = 8,1 - 8,9 \Omega \cdot \mu m$ [79]), ne pourrait pas remplacer le métal avec le design proposé dans le cadre du projet.

Le Cu pourrait être un autre bon choix de matériau pour sa très faible résistivité électrique ($\rho_{Cu} = 0,017 \Omega \cdot \mu m$ [78]), mais son coefficient d'expansion thermique ($17 \times 10^{-6} K^{-1}$ [80]) diffère trop de celui du Si ($2,6 \times 10^{-6} K^{-1} - 3,3 \times 10^{-6} K^{-1}$ [80]) [81], contrairement au W ($4,5 \times 10^{-6} K^{-1} - 4,6 \times 10^{-6} K^{-1}$ [80]) qui s'en rapproche.

CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Le procédé de microfabrication de test développé dans le cadre du projet de maîtrise a permis de trouver des paramètres de procédé qui amorcent l'intégration 3D des SiPM d'Excelitas. Le projet a connu bon nombre d'accomplissements en lien à l'introduction de tranchées d'isolement et de TSV grâce à une série de tests paramétrés menés dans un environnement de production industrielle à Excelitas et aussi, grâce à des idées novatrices pour la compagnie. Ces idées novatrices comprennent :

1. une formation de TSV en deux parties de facteurs de forme différents par double DRIE en vue d'augmenter le facteur de remplissage d'un dispositif optoélectronique, par exemple les SiPM d'Excelitas, en séparant les composants optiques de ceux électroniques;
2. une He-LEPD (détection de fin d'attaque par fuite d'hélium) lors d'une DRIE pour arrêter automatiquement la gravure lorsque des structures en rejoignent d'autres à travers une tranche de silicium;
3. le remplissage de TSV de type « via-first » par du polySi sacrificiel pour rendre « transparents » les TSV devant un grand éventail d'étapes de microfabrication qui pourraient se retrouver dans un produit, comme les SiPM, où la technologie développée y serait intégrée.

Ce chapitre final sert de synthèse de tous ces accomplissements, mais aussi des différentes formes que peut prendre le projet dans le futur, des bienfaits qu'a apporté le déroulement en milieu industriel sur le projet et finalement, de ce que le projet apporte à Excelitas.

7.1 Accomplissements

Par principe de synthèse, les accomplissements liés au projet sont regroupés dans 10 groupes.

1. Tranchées d'isolement et TSV assemblés

Le procédé développé permet de former des tranchées de dimensions $2,1\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ et des TSV complets ayant une partie cylindrique (« TSV avant ») de dimensions $3\ \mu\text{m} \times 29\ \mu\text{m}$ et une partie prismatique à base carrée (« TSV arrière ») de dimensions $36\ \mu\text{m} \times 346\ \mu\text{m}$.

Un nouveau procédé de dépôt dynamique de photorésine permet de bien protéger la majorité des tranchées pendant la gravure des TSV avant. Pour aligner les TSV arrière vis-à-vis les TSV avant, l'aligneur par contact est utilisé grâce à sa capacité d'aligner des motifs de la face avant d'une tranche vis-à-vis les motifs de la face arrière. Le « stepper » est utilisé pour toutes les autres étapes d'exposition UV de photorésine utilisées. La gravure des TSV arrière s'arrête lorsque ces derniers rejoignent les TSV avant grâce à une technique de He-LEPD.

2. Formation de TSV avant de haut facteur de forme

Lorsque les TSV arrière sont formés, ceux-ci chevauchent les TSV avant sur une certaine profondeur avant que la gravure ne soit arrêtée. Ceci a pour effet de réduire la profondeur des TSV avant. Pour prendre en compte cette diminution de profondeur, les TSV avant sont formés plus profondément qu'ils ne terminent. Les TSV avant, de dimensions $3\ \mu\text{m} \times 42\ \mu\text{m}$ constituent la structure au plus haut facteur de forme réalisé dans le projet, soit de 14. Pour y parvenir, un procédé à haute puissance RF appliquée au plateau et à basse pression pendant l'étape de retrait de polymère du procédé Bosch a été développé.

3. Utilisation exclusive de masques de photorésine

Pour toutes les étapes de gravure, seuls des masques de photorésine sont utilisés. Ceci mène à un procédé de formation de tranchées d'isolement et de TSV avec peu d'étapes et sans utilisation de métal, donc peu coûteux et rapide à reproduire.

4. TSV équivalents à des dimensions $3\ \mu\text{m} \times 375\ \mu\text{m}$ (facteur de forme de 125)

Les moyens actuels de l'industrie ne permettent pas d'obtenir, par DRIE, des TSV de dimensions $3\ \mu\text{m} \times 375\ \mu\text{m}$ (facteur de forme). Toutefois, pour les SiPM, les TSV formés dans le projet sont bien équivalents à un TSV possédant ces dimensions.

Les SiPM ont une surface optique, sensible aux photons. À cette surface, les TSV avant sont formés par DRIE. Ces derniers ont un diamètre très petit ($3\ \mu\text{m}$) pour couvrir le moins de surface possible. Par contre, ce petit diamètre limite la profondeur maximale atteignable par DRIE à de faibles valeurs. L'autre surface des SiPM n'est pas sensible aux photons. Ceci dit, des structures à grande ouverture peuvent être gravées sans nuire aux performances. À cette surface, les TSV arrière sont formés par DRIE. Leur grande ouverture ($36\ \mu\text{m}$) permet aux espèces réactives du plasma d'atteindre des grandes profondeurs ($346\ \mu\text{m}$) où ils rejoignent les TSV avant.

5. Détection de fin d'attaque par fuite d'hélium (He-LEPD)

Étant donné la haute vitesse de gravure lors de la formation des TSV arrière et la faible marge d'erreur permise pour leur chevauchement sur les TSV avant, une bonne contrôlabilité de gravure était de mise. Grâce à la technique de He-LEPD, les TSV arrière peuvent rejoindre les TSV avant partout à travers une tranche de silicium avec une gravure des TSV arrière qui s'arrête automatiquement.

La He-LEPD s'est avérée être un succès lors de la gravure des TSV arrière pour toutes les 7 tranches testées.

6. Remplissage par du polySi

Les TSV, une fois formés, sont remplis par 2 μm de polySi déposé par LPCVD. Les tranchées et TSV avant sont complètement remplis par le polySi, alors pour les TSV arrière, qui sont plus volumineux, ce ne sont que leurs parois qui sont recouvertes.

7. Planarisation de polySi par RIE

Nous avons été également en mesure d'aplanir le polySi par RIE des deux côtés des tranches de silicium. Tout le polySi qui recouvrait les surfaces sans motifs est retiré.

8. Tranches toujours manipulables

Des cavités sont formées à l'intérieur du polySi enfoui dans les tranchées et les TSV, mais elles ne gênent pas la manipulation des tranches : des pinces ordinaires de salle blanche et des plateaux à vide peuvent être utilisés sans risque de les briser. Les tranches sont donc bien préparées pour d'autres étapes de microfabrication.

9. TSV de type « Via-first »

L'utilisation de TSV de type « via-first » permet d'oxyder les TSV au tout début du procédé. Ceci dit, les autres étapes de microfabrication, par exemple retrouvées dans les SiPM, ne sont donc pas contraintes à une éventuelle étape d'oxydation thermique à haute température.

10. TSV « transparents »

Le design des TSV remplis par du polySi sacrificiel rend les structures « transparentes » aux autres procédés de microfabrication, comme si les TSV n'avaient jamais été formés.

7.2 Évolutions possibles

Outre tous les accomplissements, il existe aussi une multitude d'idées de futures actions pour faire évoluer le projet jusqu'à l'intégration complète des tranchées et des TSV dans les produits de production d'Excelitas, ce qui ne se restreint pas seulement aux SiPM.

1. Amélioration des masques de photorésine

Une amélioration de masques de photorésine correspond à :

- Une augmentation de l'épaisseur de photorésine, grâce à une vitesse de rotation plus lente pendant le dépôt de photorésine.
- Une meilleure qualité des parois (i.e. des facettes inclinées, moins courbées), grâce à une augmentation progressive de la vitesse de rotation pendant le dépôt de photorésine.
- Une photorésine de meilleure résistance à la gravure, grâce à l'ajout d'une étape de photostabilisation et/ou en augmentant les temps de cuisson pendant le dépôt de photorésine.
- Une photorésine de meilleure résistance à la réticulation, grâce à l'ajout d'une étape de photostabilisation.

2. Tests de « transparence » des TSV

Les TSV, une fois remplis de polySi doivent être « transparents » devant les autres étapes du procédé, comme s'il n'y avait pas de TSV. Pour tester cette « transparence », plusieurs types d'étapes de microfabrication devraient être testés : dépôts de couches, tests de résolution et étapes à haut budget thermique.

3. Vidage des structures

Le vidage des structures pour se débarrasser du polySi sacrificiel et la métallisation constituent des étapes qui n'ont pas pu être testées. Le vidage des structures n'a pas pu aboutir à cause d'un événement majeur à Excelitas qui a forcé la conversion prématurée du réacteur de DRIE pour le traitement de tranches 150 mm. Le procédé de test devrait donc être recommencé et adapté sur des tranches 150 mm afin de tenir compte de cette réalité.

Pour le vidage des tranchées et des TSV, celui-ci peut être testé en utilisant un procédé de DRIE avec une sélectivité élevée, c'est-à-dire chimique, sans composantes CCP. Ceci s'appuie sur les faits que 1) la DRIE peut être isotrope, 2) la couche de SiO₂ sur les parois aide à protéger contre une gravure latérale et 3) la He-LEPD s'est montrée reproductible dans le cas de formation des TSV et devrait l'être aussi pour le vidage.

4. Remplissage par du métal

Pour la métallisation des TSV, le W s'avère prometteur pour sa résistance électrique calculée plus faible que celle calculée pour les lignes d'Al utilisées actuellement à la surface des SiPM ($R_{TSV}^{souhait} = 3,86 \Omega$; $R_{TSV}^{obtenue} = 0,66 \Omega$; $R_{Al} = 8,1 \Omega$). Présentement, Excelitas ne dispose toutefois pas des équipements pour déposer du W et nous n'avons pas été en mesure de trouver un collaborateur qui avait la capacité de le faire à un coût et un délai raisonnables.

Les étapes futures à la réalisation du remplissage par du métal peuvent consister à poursuivre la recherche d'un collaborateur pouvant déposer du TiN et du W sur des structures de haut facteur de forme, par exemple par une technique de CVD. Sinon, une autre méthode, comme le dépôt par électrolyse, pourrait être investiguée.

5. Diamètre des TSV avant

Le diamètre des TSV avant obtenus (3 μm) est 36% plus élevé que la valeur souhaitée (2,2 μm). Pour réduire leur diamètre, des tests peuvent être effectués sur : 1) l'amélioration du masque de photorésine utilisé (voir plus haut : « Amélioration des masques de photorésine »), ainsi que 2) la diminution de pression pendant la phase de retrait de polymère dans le procédé Bosch pour mieux diriger les ions et donc avoir une gravure plus anisotrope. Une autre idée est de réduire intentionnellement les dimensions du masque de photolithographie afin de prendre en compte la surgravure latérale.

La largeur des TSV arrière obtenus (36 μm) est 20% supérieure à la valeur souhaitée (30 μm), mais ce n'est pas un problème, parce qu'il n'y a pas de zones sensibles aux photons situées à l'arrière des tranches.

6. Industrialisation

Les étapes de procédé ont presque toutes pu être automatisées pour permettre une production à l'échelle industrielle. Voici toutefois 2 étapes qui ne le sont pas, mais qui pourraient le devenir :

- Planarisation par RIE

Puisque le réacteur de RIE utilisé est muni d'un spectromètre qui mesure la longueur d'onde du plasma et qu'une couche de SiO_2 se trouve sous le polySi situé sur les surfaces sans motifs, un critère d'arrêt de gravure pourrait être établi. La future action consisterait à répéter la planarisation plusieurs fois afin de trouver ce critère d'arrêt de gravure optimal et à le paramétrer dans la recette de RIE de planarisation.

- Photostabilisation de photorésines

Le photoréacteur UV utilisé présentement est petit et requiert donc un temps de main d'œuvre élevé pour traiter plusieurs tranches. Ces étapes pourront éventuellement être automatisées grâce à l'acquisition récente d'une nouvelle machine par Excelitas.

7. Intégration aux SiPM ou autres

Une fois que les étapes de vidage et de métallisation seront vérifiées, il est recommandé que les étapes du procédé développé soient directement réalisées sur des dispositifs de SiPM afin d'intégrer pleinement la technologie. De surcroît, le procédé développé peut être adapté à d'autres produits d'Excelitas.

7.3 Ce que le déroulement en milieu industriel a apporté au projet

Le déroulement en milieu industriel n'est pas sans des contraintes et défis additionnels par rapport à un milieu de recherche. Toutefois, il s'est avéré que le projet a connu certains avantages marquants grâce à son déroulement en entreprise, dans les laboratoires de production d'Excelitas.

1. Industrialisation

Étant donné la diversité des produits d'Excelitas, il existe beaucoup de procédés dont les paramètres sont accessibles sur place. En comparant les paramètres d'un procédé de production avec ceux utilisés dans le projet, il était aisé de savoir si le procédé développé allait présenter une bonne reproductibilité ou s'il allait être capricieux, difficilement reproductible à l'échelle industrielle. Ceci dit, grâce à ces comparaisons, le procédé développé se rapproche beaucoup plus déjà d'un procédé de production que s'il avait été réalisé dans un laboratoire de recherche.

De plus, toutes les machines de procédé utilisées dans le projet appartiennent à Excelitas. L'adoption de la technologie sera donc plus rapide, puisque les tests avec les équipements de la

salle blanche seront déjà faits et qu'il n'y aura aucun nouvel équipement à acheter, attendre de recevoir, placer, entretenir et dont pour lequel il faudrait du temps de formation du personnel.

2. Équipements de production

Non seulement toutes les machines de procédé utilisées dans le projet appartiennent à Excelitas, mais en plus, ils constituent déjà des équipements de production dont certains sont propres aux usines de microfabrication. En photolithographie par exemple, le « stepper », le rail de dépôt et le rail de développement sont des équipements rares en laboratoire de recherche, puisqu'ils sont conçus primordialement pour opérer rapidement à haute précision. L'utilisation de ces équipements permet au procédé d'être déjà inscrit dans un mode de production.

3. Personnel informé

Le projet est déjà connu de plusieurs membres du personnel d'Excelitas, plus particulièrement aux membres de l'équipe de support aux procédés.

7.4 Ce que le projet apporte à Excelitas

Pour la première fois de toute l'histoire de l'entreprise, des TSV de haut facteur de forme ont été formés et ce, de façon reproductible. Cette capacité permettra, en combinaison avec les tranchées d'isolement, d'obtenir des SiPM avec un facteur de remplissage de 62% (présentement 52%). La technologie des TSV ne se restreint toutefois pas seulement aux TSV, car en effet, elle pourrait éventuellement s'étendre vers d'autres produits d'Excelitas pour améliorer leur performances, miniaturiser davantage les puces et ouvrir la voie à des techniques d'assemblages qui ne requièrent pas de micro-fils (exemple : 3D-SiP).

C'est aussi la première fois à Excelitas que la He-LEPD est utilisée pour arrêter automatiquement une gravure. Cette technique de fin d'attaque s'avère pratique pour les situations où des structures gravées en rejoignent d'autres pendant une DRIE. Ceci évite de devoir acheter et installer un autre système coûteux de détection en temps réel dans le réacteur de DRIE.

Finalement, ce projet marque bien le tout premier pas dans l'intégration 3D d'Excelitas et permettra à la compagnie de tenir une place solide dans le marché de la microélectronique en améliorant ses produits et en repoussant les limites pour la recherche et le développement de nouveaux produits.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] K. K. Ng, *Complete guide to semiconductor devices*. United States; New York: IEEE Press ; J. Wiley & Sons, 2002.
- [2] R. Vinke, *Time-of-Flight PET with SiPM sensors on monolithic scintillation crystals*. S.l.; Groningen: s.n.] ; University Library Groningen][Host], 2011.
- [3] « SensL – Silicon Photomultipliers & SPAD's ». [En ligne]. Disponible à: <http://sensl.com/>. [Consulté le: 13-mars-2017].
- [4] G. Q. Zhang et A. J. van Roosmalen, Éd., *More than Moore: creating high value micro/nanoelectronics systems*. Dordrecht ; New York: Springer, 2009.
- [5] Y. Yang, « Outlook », dans *3D Integration for VLSI Systems*, S. Koester, Éd. Pan Stanford Publishing, 2011, p. 351-366.
- [6] I. Umolu Abhulimen, *Characterization of deep reactive ion etching (DRIE) for via formation in chip stacking applications*. Ann Arbor, Mich: ProQuest LLC, 2008.
- [7] J. H. Lau, « Overview and outlook of through-silicon via (TSV) and 3D integrations », *Microelectron. Int.*, vol. 28, n° 2, p. 8-22, mai 2011.
- [8] M. Jung, J. Mitra, D. Z. Pan, et S. K. Lim, « TSV stress-aware full-chip mechanical reliability analysis and optimization for 3D IC », *Commun. ACM*, vol. 57, n° 1, p. 107-115, janv. 2014.
- [9] D. Renker, « Geiger-mode avalanche photodiodes, history, properties and problems », *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. Accel. Spectrometers Detect. Assoc. Equip.*, vol. 567, n° 1, p. 48-56, nov. 2006.
- [10] S. Cova, M. Ghioni, A. Lacaita, C. Samori, et F. Zappa, « Avalanche photodiodes and quenching circuits for single-photon detection », *Appl. Opt.*, vol. 35, n° 12, p. 1956, avr. 1996.
- [11] A. Boisvert, « Conception d'un circuit d'étouffement pour photodiodes à avalanche en mode geiger pour intégration hétérogène 3D. », 2014.
- [12] E. Roncali et S. R. Cherry, « Application of Silicon Photomultipliers to Positron Emission Tomography », *Ann. Biomed. Eng.*, vol. 39, n° 4, p. 1358-1377, avr. 2011.
- [13] Excelitas, « C340742-33 Series Silicon Photomultipliers with 3x3 mm² active area ». [En ligne]. Disponible à: http://www.excelitas.com/downloads/DTS_C30742-33_Series_SiPM.pdf. [Consulté le: 14-mars-2017].
- [14] Excelitas, « Silicon Photomultiplier Module LynX-A-33-W50-T1-X ». [En ligne]. Disponible à: http://www.excelitas.com/Downloads/DTS_SiPM_Module.pdf. [Consulté le: 14-mars-2017].
- [15] S. Joo, K. H. Kim, H. C. Kim, et T. D. Chung, « A portable microfluidic flow cytometer based on simultaneous detection of impedance and fluorescence », *Biosens. Bioelectron.*, vol. 25, n° 6, p. 1509-1515, févr. 2010.

- [16] E. Garutti, « Silicon photomultipliers for high energy physics detectors », *J. Instrum.*, vol. 6, n° 10, p. C10003-C10003, oct. 2011.
- [17] H. M. Park, S. J. Jeon, H. K. Lee, et K. S. Joo, « Design of a silicon photomultiplier based compact radiation detector for Homeland Security screening », présenté à Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and their Applications (ANIMMA), 2013, p. 1-5.
- [18] S. Avertin, « Développement et caractérisation de procédés de gravure plasma de T.S.V (Through Silicon Via) pour l'Intégration Tridimensionnelle de Circuits Intégrés », Thèse, Université Grenoble Alpes, 2012.
- [19] B. J. Park *et al.*, « Deep Trench Isolation for Crosstalk Suppression in Active Pixel Sensors with 1.7 μm Pixel Pitch », *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 46, n° 4S, p. 2454, 2007.
- [20] A. Tournier *et al.*, « Pixel-to-Pixel isolation by Deep Trench technology: Application to CMOS Image Sensor », présenté à International Image Sensor Workshop (IISW), France, 2011.
- [21] « Engineering360 ; Silicon Photomultiplier ». [En ligne]. Disponible à : http://www.globalspec.com/industrial-directory/silicon_photomultiplier. [Consulté le : 17-mars-2017].
- [22] D. Zhang *et al.*, « Process Development and Optimization for 3 μm High Aspect Ratio Via-Middle Through-Silicon Vias at Wafer Level », *IEEE Trans. Semicond. Manuf.*, vol. 28, n° 4, p. 454-460, nov. 2015.
- [23] K. Gopalakrishnan, A. Peddaiahgari, D. Smith, D. Zhang, et L. England, « Process development and optimization for high-aspect ratio through-silicon via (TSV) etch », 2016, p. 460-465.
- [24] Z. Wang, F. Jiang, D. Q. Yu, et W. Q. Zhang, « Si Etching for TSV Formation », *ECS Trans.*, vol. 60, n° 1, p. 407-412, févr. 2014.
- [25] G. Adamo *et al.*, « Silicon Photomultipliers Signal-to-Noise Ratio in the Continuous Wave Regime », *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 20, n° 6, p. 284-290, nov. 2014.
- [26] M. J. Madou, *Fundamentals of microfabrication and nanotechnology*, 3rd ed., vol. 2. Boca Raton, FL: CRC Press, 2012.
- [27] W. Kern et K. K. Schuegraf, « Deposition Technologies and Applications: Introduction and Overview », dans *Handbook of Thin Film Deposition Processes and Techniques (Second Edition)*, Second Edition., K. Seshan, Éd. Norwich, NY: William Andrew Publishing, 2001, p. 11-43.
- [28] K. Sakuma, « 3D Integration Technology with TSV and IMC Bonding », dans *Design of 3D Integrated Circuits and Systems*, R. Sharma, Éd. CRC Press, 2014, p. 1-56.
- [29] M. Ferrari et P. M. Sinha, « Sacrificial Oxide Layer for Drug Delivery », dans *BioMEMS and biomedical nanotechnology*, New York: Springer, 2006, p. 145-170.

- [30] B. Ziaie, A. Baldi, et M. Z. Atashbar, « Introduction to Micro-/Nanofabrication », dans *Springer handbook of nanotechnology*, 3., And extended ed., B. Bhushan, Éd. Berlin: Springer, 2010, p. 231-269.
- [31] MicroChemicals, « Application Notes for photolithography with technical informations for photoresists, solvents, developers and etchants », *Exposure of Photoresists*, 07-nov-2013. [En ligne]. Disponible à: http://www.microchemicals.com/downloads/application_notes.html. [Consulté le: 17-mars-2017].
- [32] P. Gillespie, « Photostabilization: illuminating photoresist treatment », *Semicond. Int. Newton*, vol. 20, n° 8, p. 161-175, 1997.
- [33] MicroChemicals, « Application Notes for photolithography with technical informations for photoresists, solvents, developers and etchants », *Rehydration of Photoresists*, 07-nov-2013. [En ligne]. Disponible à: http://www.microchemicals.com/downloads/application_notes.html. [Consulté le: 17-mars-2017].
- [34] R. H. Collins et F. T. Deverse, « Process for improving photoresist adhesion », US 3,549,368, 22-déc-1970.
- [35] Yield Engineering Systems, Inc., « YES HMDS Vapor Prime Process Application Note ». [En ligne]. Disponible à: <http://www.yieldengineering.com/Portals/0/HMDS%20Application%20Note.pdf>. [Consulté le: 17-mars-2017].
- [36] MicroChemicals, « Application Notes for photolithography with technical informations for photoresists, solvents, developers and etchants », *Spin Coating of Photo Resists*, 07-nov-2013. [En ligne]. Disponible à: http://www.microchemicals.com/downloads/application_notes.html. [Consulté le: 17-mars-2017].
- [37] I. Jekauc, M. Watt, T. Hornsmith, et J. Tiffany, « Necessity of chemical edge bead removal in modern-day lithographic processing », 2004, p. 1255.
- [38] K. Zandi, Y. Zhao, J. Schneider, et Y.-A. Peter, « New photoresist coating method for high topography surfaces », présenté à Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2010, p. 392-395.
- [39] Integrated Micro Materials, « Lithography Process Overview », 2013. [En ligne]. Disponible à: <http://www.imicromaterials.com/technical/lithography-process-overview>. [Consulté le: 18-mars-2017].
- [40] MicroChemicals, « Application Notes for photolithography with technical informations for photoresists, solvents, developers and etchants », *Baking Steps for Photoresists*, 07-nov-2013. [En ligne]. Disponible à: http://www.microchemicals.com/downloads/application_notes.html. [Consulté le: 17-mars-2017].
- [41] MicroChemicals, « Application Notes for photolithography with technical informations for photoresists, solvents, developers and etchants », *Hardbake of Photoresist Structures*, 07-nov-2013. [En ligne]. Disponible à: http://www.microchemicals.com/downloads/application_notes.html. [Consulté le: 17-mars-2017].

- [42] X. Mellhaoui, « Mécanismes physico-chimiques dans le procédé de gravure plasma du Silicium », phdthesis, Université d'Orléans, 2006.
- [43] A. Aydemir, « Deep-Trench RIE Optimization for High Performance MEMS Microsensors », Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2007.
- [44] D. L. Flamm, « Mechanisms of silicon etching in fluorine- and chlorine-containing plasmas », *Pure Appl. Chem.*, vol. 62, n° 9, janv. 1990.
- [45] R. Ramos, « Interactions entre les plasmas de gravure à couplage inductif et les parois du réacteur », Thèse, Université Joseph Fourier - Grenoble I, 2008.
- [46] H. M. Park, « Control of Ion Energy in a Capacitively Coupled Reactive Ion Etcher », *J. Electrochem. Soc.*, vol. 145, n° 12, p. 4247, 1998.
- [47] O. Boudreault, « Interactions entre les plasmas de gravure à couplage inductif et les parois du réacteur », Thèse, Université de Montréal, 2011.
- [48] M. Sugawara, « Introduction », dans *Plasma etching: fundamentals and applications*, New York: Oxford University Press, 1998.
- [49] J. E. Harry, *Introduction to plasma technology: science, engineering and applications*. Weinheim: Wiley-VCH, 2010.
- [50] L. G. Christophorou et J. K. Olthoff, Éd., *Gaseous Dielectrics IX*. Boston, MA: Springer US, 2001.
- [51] H. Jansen, H. Gardeniers, M. de Boer, M. Elwenspoek, et J. Fluitman, « A survey on the reactive ion etching of silicon in microtechnology », *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 6, n° 1, p. 14, 1996.
- [52] R. d'Agostino et F. Fracassi, « Plasma Etching Processes », dans *Crucial Issues in Semiconductor Materials and Processing Technologies.*, S. Coffa, F. Priolo, E. Rimini, et J. M. Poate, Éd. Springer Verlag, 2013, p. 257-278.
- [53] J. W. Coburn et H. F. Winters, « Ion- and electron-assisted gas-surface chemistry—An important effect in plasma etching », *J. Appl. Phys.*, vol. 50, n° 5, p. 3189-3196, mai 1979.
- [54] H. Frey, « Gaseous Phase and Surface Processes », dans *Handbook of Thin-Film Technology*, H. Frey et H. R. Khan, Éd. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, p. 117-132.
- [55] J. L. Vossen et W. Kern, Éd., *Thin film processes II*. Boston: Academic Press, 1991.
- [56] J. W. Coburn, « Surface processing with partially ionized plasmas », *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 19, n° 6, p. 1048-1062, déc. 1991.
- [57] K. Richter, K. Viehweger, J. He, et J.-W. Barth, « Creation of Vias With Optimized Profile for 3-D Through Silicon Interconnects (TSV) », *Plasma Process. Polym.*, vol. 6, n° S1, p. S193-S197, juin 2009.
- [58] P. E. Garrou, C. A. Bower, et P. Ramm, Éd., *Handbook of 3D integration: technology and applications of 3D integrated circuits*. Weinheim: Wiley-VCH, 2008.

- [59] R. Abdolvand et F. Ayazi, « An advanced reactive ion etching process for very high aspect-ratio sub-micron wide trenches in silicon », *Sens. Actuators Phys.*, vol. 144, n° 1, p. 109-116, 2008.
- [60] Y.-C. Hu *et al.*, « Study of TSV Formation with ICP Parameter Control », présenté à The 34th International Symposium on Dry Process, Tokyo, Japan, 2012, p. 127-128.
- [61] X.-M. Zhu, W.-C. Chen, S. Zhang, Z.-G. Guo, D.-W. Hu, et Y.-K. Pu, « Electron density and ion energy dependence on driving frequency in capacitively coupled argon plasmas », *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 40, n° 22, p. 7019-7023, nov. 2007.
- [62] J. S. Yu et Y. T. Lee, « Parametric reactive ion etching of InP using Cl₂ and CH₄ gases: effects of H₂ and Ar addition », *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 17, n° 3, p. 230, févr. 2002.
- [63] A. S. Kao, « Analysis of Nonuniformities in the Plasma Etching of Silicon with CF₄/O₂ », *J. Electrochem. Soc.*, vol. 137, n° 3, p. 954, 1990.
- [64] S. Sage, P. John, S. Dobritz, J. Börnge, J. Vitiello, et M. Böttcher, « Investigation of different methods for isolation in through silicon via for 3D integration », *Microelectron. Eng.*, vol. 107, p. 61-64, juill. 2013.
- [65] H. Kizil et C. Steinbrüchel, « TiN, TaN and WxN as diffusion barriers for Cu on SiO₂: capacitance-voltage, leakage current, and triangular-voltage-sweep tests after bias temperature stress », *Thin Solid Films*, vol. 449, n° 1-2, p. 158-165, févr. 2004.
- [66] M. Knaut *et al.*, « Atomic layer deposition for high aspect ratio through silicon vias », *Microelectron. Eng.*, vol. 107, p. 80-83, juill. 2013.
- [67] Tiwei Wei *et al.*, « Optimization and evaluation of sputtering barrier/seed layer in through silicon via for 3-D integration », *Tsinghua Sci. Technol.*, vol. 19, n° 2, p. 150-160, avr. 2014.
- [68] S. C. Hong, W. G. Lee, W. J. Kim, J. H. Kim, et J. P. Jung, « Reduction of defects in TSV filled with Cu by high-speed 3-step PPR for 3D Si chip stacking », *Microelectron. Reliab.*, vol. 51, n° 12, p. 2228-2235, déc. 2011.
- [69] J. W. Choi, W. L. Loh, S. K. Praveen, R. Murphy, et E. T. K. Swee, « A study of the mechanisms causing surface defects on sidewalls during Si etching for TSV (through Si via) », *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 23, n° 6, p. 065005, juin 2013.
- [70] G. Sun, T. Gao, X. Zhao, et H. Zhang, « Fabrication of micro/nano dual-scale structures by improved deep reactive ion etching », *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 20, n° 7, p. 075028, 2010.
- [71] MicroChemicals, « Application Notes for photolithography with technical informations for photoresists, solvents, developers and etchants », *Resists, Developers and Removers*, 07-nov-2013. [En ligne]. Disponible à : http://www.microchemicals.com/downloads/application_notes.html. [Consulté le: 17-mars-2017].
- [72] F. Laermer, S. Franssila, L. Sainiemi, et K. Kolari, « Deep Reactive Ion Etching », dans *Handbook of Silicon Based {MEMS} Materials and Technologies (Second Edition)*, Second Edition., M. Tilli, T. Motooka, V.-M. Airaksinen, S. Franssila, M. Paulasto-Kröckel, et V. Lindroos, Éd. Boston: William Andrew Publishing, 2015, p. 444-469.

- [73] F. F. Chen et J. P. Chang, « Mechanisms of Profile Evolution », dans *Lecture Notes on Principles of Plasma Processing*, Boston, MA: Springer US, 2003, p. 186-190.
- [74] Z. Ouyang, « Characterization, Optimization, and Simulation in Through Silicon Via (TSV) Dry Etch », Dissertation, University of Illinois, Urbana-Champaign, 2013.
- [75] W. Pike, « Analysis of sidewall quality in through-wafer deep reactive-ion etching », *Microelectron. Eng.*, vol. 73-74, p. 340-345, juin 2004.
- [76] J. P. Gambino, S. A. Adderly, et J. U. Knickerbocker, « An overview of through-silicon-via technology and manufacturing challenges », *Microelectron. Eng.*, vol. 135, p. 73-106, mars 2015.
- [77] W. Zhou, R. Apkarian, Z. L. Wang, et D. Joy, « Fundamentals of Scanning Electron Microscopy (SEM) », dans *Scanning Microscopy for Nanotechnology*, W. Zhou et Z. L. Wang, Éd. New York, NY: Springer New York, 2006, p. 1-40.
- [78] TIBTECH innovations, « Conductivité des fibres métalliques ». [En ligne]. Disponible à: <http://www.tibtech.com/fr/conductivite.php>. [Consulté le: 26-mars-2017].
- [79] J. Xie, C. Lee, M.-F. Wang, Y. Liu, et H. Feng, « Characterization of heavily doped polysilicon films for CMOS-MEMS thermoelectric power generators », *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 19, n° 12, p. 125029, déc. 2009.
- [80] F. Cervera et ASM International, Éd., *ASM ready reference. Thermal properties of metals*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2002.
- [81] P. Dixit, T. Vehmas, S. Vähänen, P. Monnoyer, et K. Henttinen, « Fabrication and electrical characterization of high aspect ratio poly-silicon filled through-silicon vias », *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 22, n° 5, p. 055021, mai 2012.
- [82] K. K. Ng, « p-n Junction Diode », dans *Complete Guide to Semiconductor Devices*, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2010, p. 11-23.
- [83] U.S Navy, *Navy Electricity and Electronics Training Series: Module 7 - Introduction to Solid-State Devices and Power Supplies*. CreateSpace Independent Publishing Platform, 1998.
- [84] B. G. Streetman et S. Banerjee, « Junctions », dans *Solid state electronic devices*, Seventh edition., Boston: Pearson, 2015, p. 159-256.
- [85] Excelitas, « Application Notes ». [En ligne]. Disponible à: http://www.excelitas.com/downloads/app_photodiodes.pdf. [Consulté le: 17-mars-2017].
- [86] K. K. Ng, « Photoconductor », dans *Complete Guide to Semiconductor Devices*, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2010, p. 423-430.
- [87] D. Durini, U. Paschen, A. Schwinger, et A. Spickermann, « Silicon based single-photon avalanche diode (SPAD) technology for low-light and high-speed applications », dans *Photodetectors: materials, devices and applications*, B. Nabet, Éd. Amsterdam Boston Cambridge: Elsevier/WP, Woodhead Publishing, 2016, p. 345-372.

- [88] R. A. Serway, J. W. Jewett, et V. Peroomian, « Current and Resistance », dans *Physics for scientists and engineers with modern physics*, Ninth edition., Boston, MA: Brooks/Cole, Cengage Learning, 2014, p. 808-832.

ANNEXE A – PHOTODIODES

Une photodiode est un semi-conducteur qui génère un courant lorsque soumis à la lumière. Elle peut être vue comme une résistance variable sensible à la lumière [82].

Cette annexe vise à mieux saisir les concepts d'optoélectronique en partant de la simple diode PN, jusqu'à la plus élaborée GM-APD dont sont composés les SiPM.

A.1 Photodiode PN

A.1.1 Structure d'une jonction PN

Une jonction PN est la zone de transition entre une région dopée-P et une autre dopée-N.

Un matériau dopé-P est un matériau dans lequel des impuretés d'accepteurs ont été introduites. Les accepteurs ont moins d'électrons de valence que les atomes du matériau intrinsèque et donc, certaines liaisons covalentes produites entre ces derniers présentent un déficit électronique qui se caractérise par un excès de trous libres (absences d'électrons). Ces trous libres constituent les porteurs de charge majoritaires de la zone dopée-P. La lettre « P » est utilisée pour désigner la zone où les porteurs de charge majoritaires, les trous, sont « positifs » (voir Figure A.1). [83]

De la même façon, un matériau dopé d'impuretés de donneurs est un matériau dit dopé-N. Les électrons en excès sont libres de se déplacer dans le matériau. La lettre « N » est utilisée pour désigner la zone où les porteurs de charge majoritaires, les électrons, sont « négatifs » (voir Figure A.1). [83]

Les zones dopée-P et dopée-N sont toutes les deux électriquement neutres, puisque la charge totale des trous et des électrons équivaut toujours à la charge totale des ions dopants (accepteurs et donneurs respectivement) [83], comme illustré à la Figure A.2a.

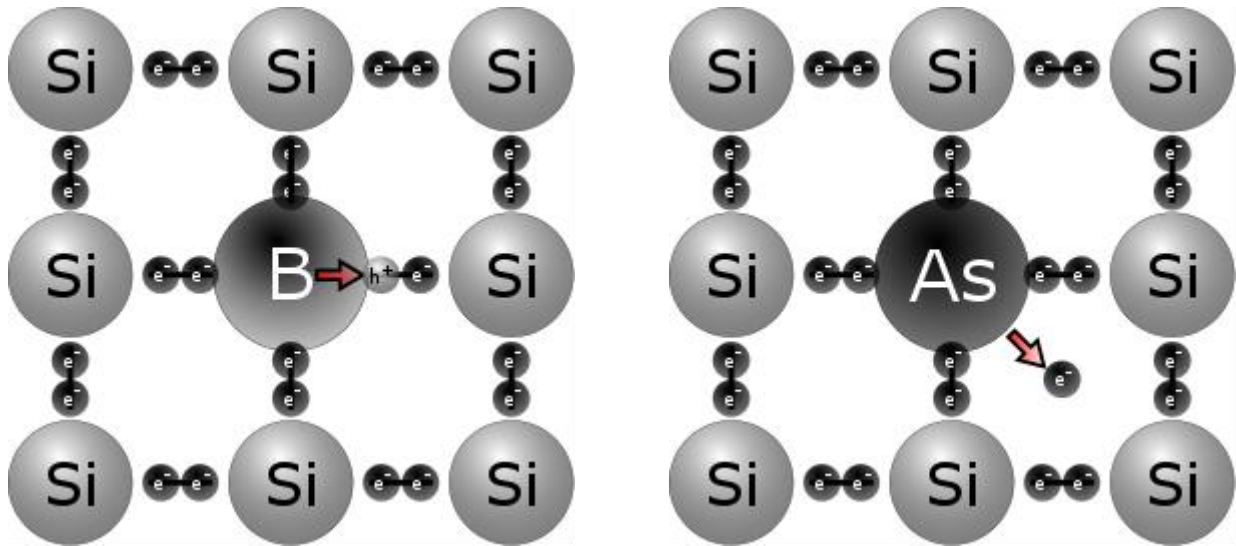


Figure A.1 : Silicium dopé-P par du bore (gauche) et silicium dopé-N par de l'arsenic (droite).

Inspirée de [83].

A.1.2 Recombinaison électrons-trous

Lorsque deux régions de dopage de types différents (P et N) sont en contact, les électrons en excès dans la zone dopée-N diffusent vers la jonction et occupent les trous en excès de la zone dopée-P [83]. De la même façon, les trous en excès dans la zone dopée-P diffusent aussi vers la jonction dans le sens inverse et se recombinent avec les électrons de la zone dopée-N [83].

A.1.3 Zone de déplétion

La zone de déplétion est définie comme la partie autour de la jonction PN où les recombinaisons entre les électrons et les trous se produisent. À l'endroit où ont lieu ces recombinaisons, un champ électrique est généré par les ions immobiles qui ne sont plus écrantés par la charge des porteurs libres. La largeur de la zone de déplétion est limitée par le champ électrique qui s'oppose à la diffusion des porteurs majoritaires [83], [84]. L'équilibre est presque instantanément atteint lorsque le champ électrique est suffisamment élevé pour empêcher toute autre diffusion. La formation d'une zone de déplétion est illustrée à la Figure A.2.

A.1.4 Mise sous tension d'une jonction PN : polarisations directe et inverse

Le type d'alimentation d'une jonction PN dans un dispositif électronique ou optoélectronique dépend des applications voulues. Appliquer une tension positive sur la région dopée-P et négative

sur la région dopée-N est une polarisation dite directe [83], [84]. Dans le sens direct, la jonction PN agit comme une résistance variable en fonction de la tension appliquée. Pour une polarisation inverse, c'est le contraire : la tension positive est appliquée sur la région dopée-N et la tension négative, sur la région dopée-P. La Figure A.3 illustre ces deux différents types de polarisation. Pour détecter la lumière, les photodiodes sont opérées en polarisation inverse.

La polarisation inverse (ou indirecte) est utilisée notamment pour le fonctionnement des photodiodes [85], mais aussi des varactors (dispositif de capacitance variable en fonction de la tension appliquée) [86]. Les porteurs de charge majoritaires sont dans ce cas éloignés de la jonction PN. Cette délocalisation de charge a pour conséquence de supprimer l'écrantage de plus d'ions et donc d'élargir la zone de déplétion [84], comme illustré à la Figure A.3b. Le courant électrique traversant la jonction PN n'est maintenant plus un produit de la diffusion des porteurs de charge majoritaires, mais bien des porteurs de charge minoritaires, c'est-à-dire des électrons de la région dopée-P et des trous de la région dopée-N [84]. Ce courant « minoritaire » peut être produit en générant des paires électrons-trous à l'aide de photons et constitue le principe de fonctionnement des photodiodes PN.

A.1.5 Influence de la lumière sur une jonction PN polarisée en inverse

Lorsque de la lumière interagit avec un matériau, les photons qui la composent ont une probabilité de générer une paire électron-trou. On parle de photo-électrons et de photo-trous. Sans l'influence d'un champ électrique, les photo-électrons et photo-trous ont une probabilité élevée de se recombiner et de ne pas générer un photocourant. En revanche, la présence d'un champ électrique local d'intensité suffisante empêche une telle recombinaison en dirigeant les électrons et les trous en sens opposé. Dans une photodiode PN polarisée en inverse, les électrons sont donc attirés vers la borne positive et les trous vers la borne négative. Dans ce cas, la mesure d'un courant non nul (minoritaire) à travers la diode suggère alors la présence de lumière incidente, parce qu'aucun courant n'est généré par la diffusion des porteurs majoritaires.

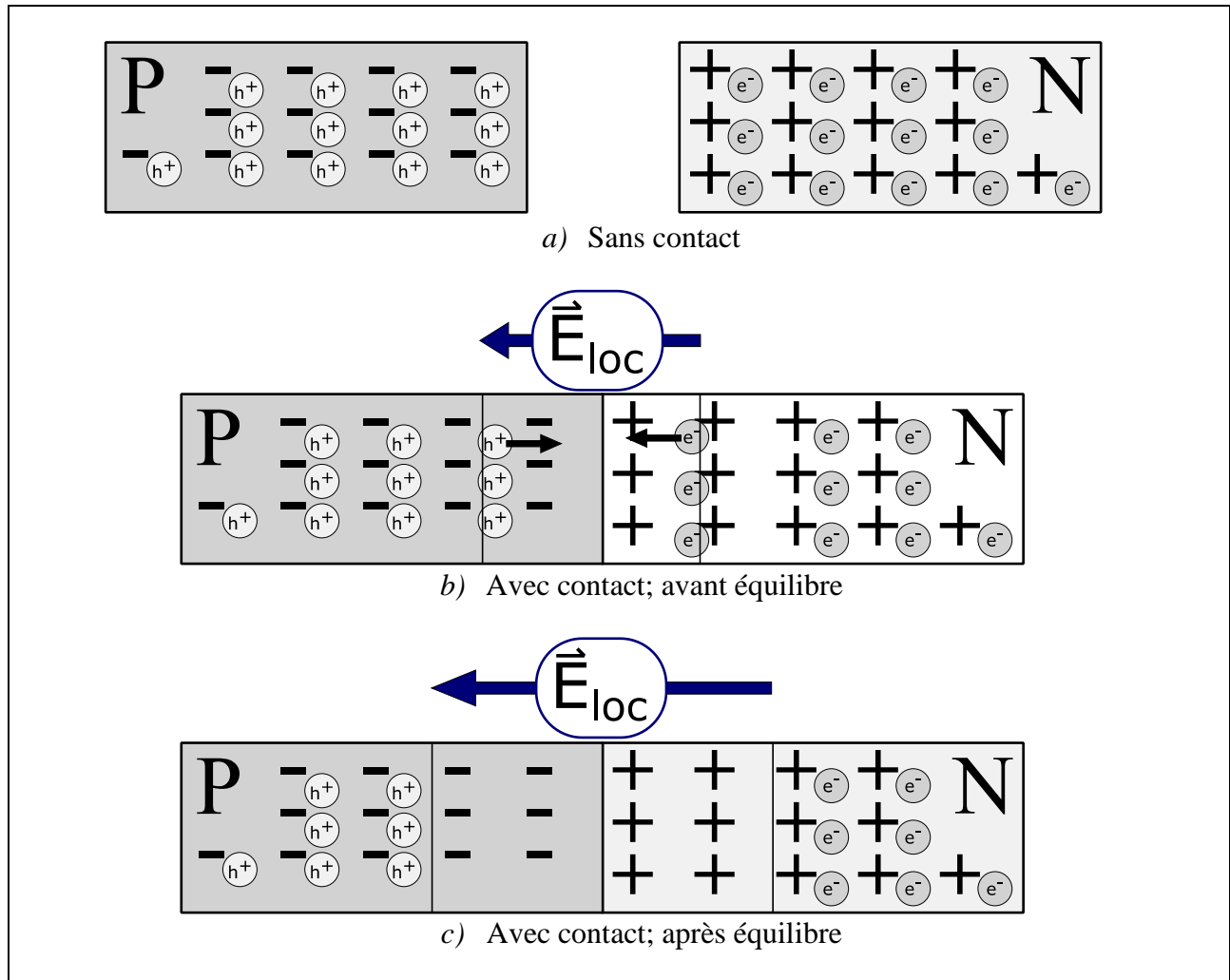


Figure A.2 : Formation d'une zone de déplétion autour d'une jonction PN par recombinaisons des porteurs de charge majoritaires : a) sans contact (inexistence de la jonction PN), b) recombinaison par diffusion des porteurs de charge majoritaires suite au contact et c) à l'équilibre, c'est-à-dire l'état pour lequel le champ électrique généré par les ions est assez intense pour prévenir toute autre de ces recombinaisons.

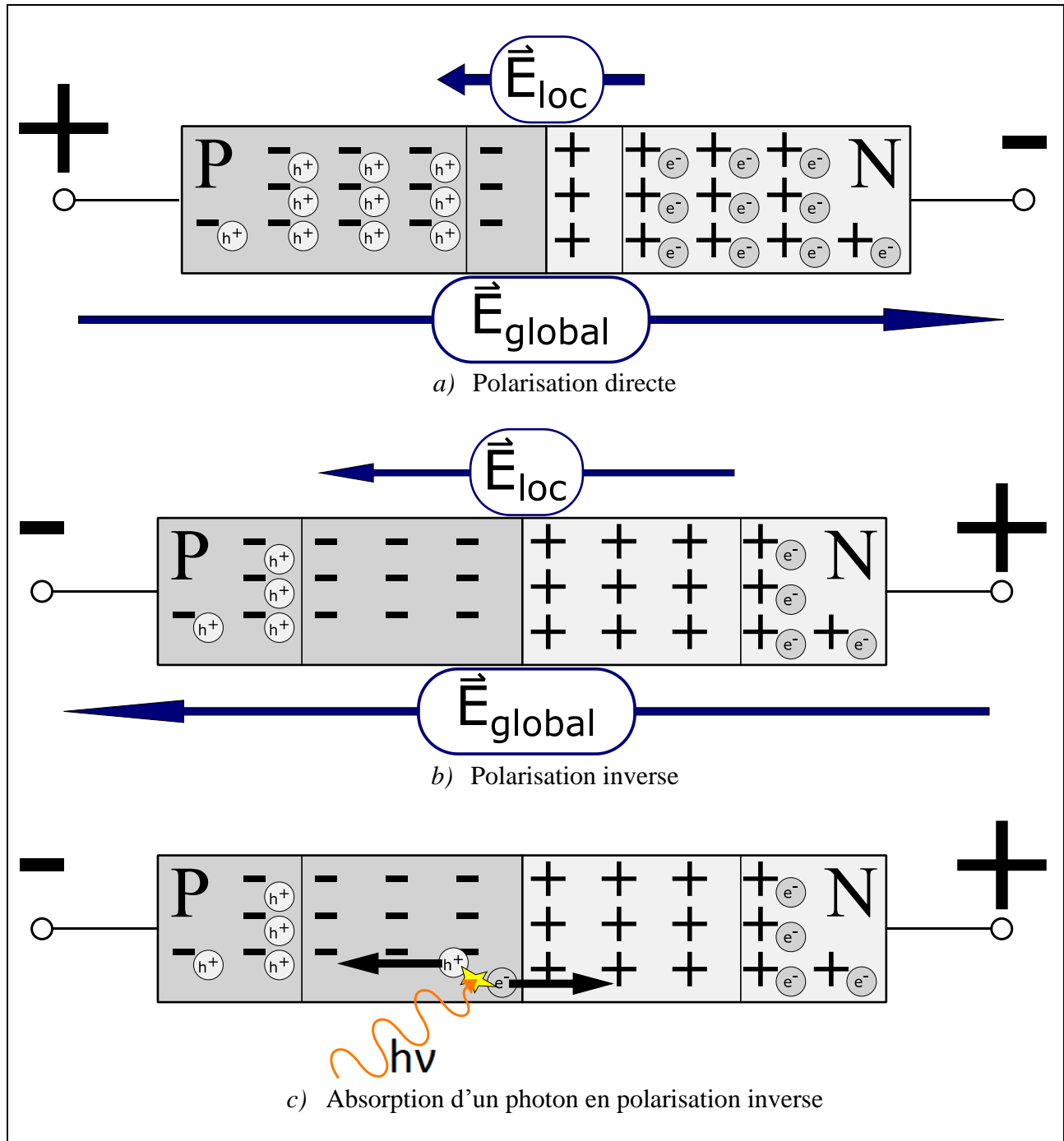


Figure A.3 : a) Rétrécissement par polarisation directe et b) élargissement par polarisation inverse de la zone de déplétion d'une photodiode PN et c) absorption d'un photon menant à une paire électron-trou séparés par le champ électrique local.

A.1.6 Claquage

Au-delà d'une certaine tension dite de claquage, la jonction PN perd sa résistance électrique et devient conductrice. C'est le claquage. Deux phénomènes différents peuvent être à l'origine du claquage : l'effet Zener et l'effet d'avalanche. [84]

L'effet Zener est un phénomène quantique qui apparaît pour un cas où la jonction PN est fortement dopée. En augmentant le dopage (d'un ou des deux côtés de la jonction PN), la zone de déplétion se rétrécit. Si le dopage est suffisamment élevé pour que le minimum de la bande de conduction du matériau dopé-N atteigne le maximum de la bande de valence du matériau dopé-P, la force de liaison des électrons de valence sur les noyaux atomiques n'est plus suffisante pour compenser le champ électrique généré. Le matériau dopé-P se voit alors ionisé et l'effet tunnel se produit : les électrons liés de la bande de valence sont libérés et traversent la jonction PN pour se diriger vers la borne de tension positive. [84]

L'effet d'avalanche est le cas pour lequel les électrons deviennent eux-mêmes sources de génération d'autres électrons par chocs ionisants. Lorsque la tension inverse est très élevée, les électrons sont accélérés par le champ électrique global et atteignent une énergie cinétique tellement élevée qu'ils ionisent les atomes par chocs ionisants, générant ainsi d'autres électrons libres. Ces nouveaux électrons libres sont à leur tour accélérés et libèrent d'autres électrons, d'où le nom d'avalanche. La valeur absolue de la tension de claquage par effet d'avalanche est donc dans ce cas plus élevée. [84]

Pour des dopages élevés, la tension de claquage est dominée par l'effet Zener, alors que pour des dopages faibles, la tension de claquage est dominée par l'effet d'avalanche. Aussi, dans le cas de dopages élevés, la zone de déplétion est rétrécit. Or, le champ électrique dans la zone de déplétion est inversement proportionnel à la largeur de cette dernière. Pour une même valeur de tension inverse aux bornes de la jonction PN, le champ électrique est donc plus intense dans le cas de dopages élevés et c'est pourquoi la tension de claquage résultante de l'effet Zener est généralement inférieure (en absolue) à celle résultante de l'effet d'avalanche. [84]

A.2 Photodiode PIN

La photodiode PIN est une version améliorée de la photodiode PN en ajoutant un matériau de très petite bande interdite et intrinsèque (« I »), c'est-à-dire très faiblement ou pas du tout dopé, entre

les zones dopée-P et dopée-N. Cette configuration a pour but d'augmenter l'efficacité quantique (définie à la section 2.3) et la vitesse de réponse de la photodiode en localisant la zone d'absorption à l'intérieur de la zone de déplétion [1].

Les photons ne sont absorbés que si leur énergie est suffisamment élevée pour provoquer l'excitation d'un électron de valence vers la bande de conduction. Si les zones dopées possèdent une bande interdite très grande et que la zone de déplétion se trouve dans un matériau de bande interdite très petite, alors l'absorption de la lumière devient sélective à la zone de déplétion. Ainsi, la dérive des électrons et des trous domine la diffusion et donc, la réponse de la photodiode devient plus rapide.

A.3 Photodiodes avalanche (APD)

Une APD (photodiode avalanche) est une photodiode configurée de sorte à augmenter le nombre d'électrons photogénérés pour chaque photon absorbé grâce à l'effet d'avalanche.

A.3.1 Effet d'avalanche dans une APD

Le principe de fonctionnement des APD consiste à provoquer l'effet d'avalanche en vue de multiplier le nombre de photoélectrons générés pour chaque photon absorbé d'un facteur égal à un gain et ce, sans provoquer de claquage. Pour faciliter artificiellement l'effet d'avalanche sans provoquer de claquage, un autre matériau faiblement dopé-P est placé devant le matériau dopé-N. Une autre jonction PN est donc créée. Un champ électrique local est généré par les ions dopants composant ces matériaux et permet d'accélérer significativement les photo-électrons qui passent au travers, leur fournissant suffisamment d'énergie pour provoquer l'effet d'avalanche. La tension ne doit toutefois pas dépasser la tension de claquage car sinon, l'APD passe dans un mode appelé Geiger et alors, l'avalanche devient auto-suffisante. [1], [11], [12]

A.3.2 Opération en mode Geiger, étouffement et comptage de photons

Les APD opérées en mode Geiger (GM-APD) sont utilisées principalement pour le comptage de photons et peuvent atteindre des sensibilités encore plus importantes que les APD opérées normalement. Les GM-APD sont opérées à une tension de polarisation inverse supérieure à la tension de claquage de telle sorte à obtenir un gain pratiquement considéré infini (ordre de 10^6), limité seulement par la résistance interne de la GM-APD [11]. Lorsqu'un électron se retrouve

dans la zone de déplétion, une avalanche auto-suffisante survient et l'état de la GM-APD passe de semi-conducteur à conducteur. L'absorption d'un photon, qui génère un électron, fait donc exploser la valeur du courant, permettant sa détection. Toutefois, sans retour à l'état semi-conducteur de la GM-APD, tout autre photon incident n'est pas détecté. Afin de pouvoir compter les photons, un circuit dit « d'étouffement » (traduction libre de « quenching ») s'impose. [12]

Il existe plusieurs façons d'étouffer l'avalanche. Celle expliquée ici est du type « passif » et consiste simplement à brancher une « résistance d'étouffement » en série à la GM-APD. Un circuit RLC équivalent simplifié est illustré à la Figure A.4. Sous une telle configuration, la courbe I-V d'une GM-APD soumise à une irradiation lumineuse subit les transformations illustrées à la Figure A.5.

La période de temps entre la décharge et la remise à l'état semi-conducteur de l'APD est la période pour laquelle le mode Geiger est activé. Pendant ce temps, les photons absorbés ne déclenchent pas le mode Geiger et ne sont donc pas comptés. La répétition successive de ce cycle sous l'influence de la lumière correspond à l'opération en mode Geiger de l'APD. [10]–[12], [87]

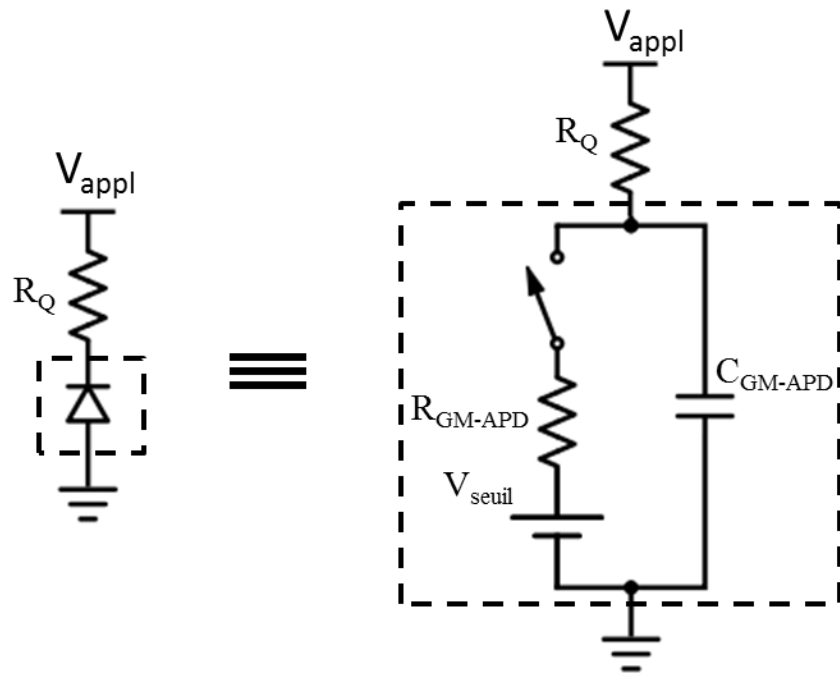


Figure A.4 : Circuit électrique équivalent d'une GM-APD branchée en série à une résistance d'étouffement (configuration de type passif). Inspirée de [11].

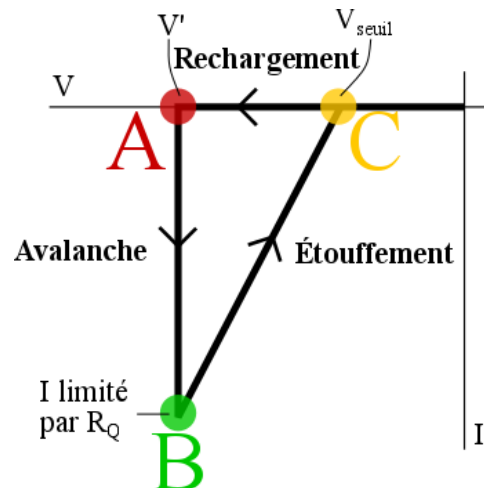


Figure A.5 : États d'une GM-APD soumise à une irradiation lumineuse. Inspirée de [87].

- Dormance

Au départ, le courant traversant la GM-APD est nul (commutateur de la Figure A.4 ouvert). La capacité interne se charge et la tension aux bornes de la GM-APD est stable à une valeur V' .

- A → B : avalanche (décharge)

L'absorption d'un photon génère une paire électron-trou dans la zone de déplétion. L'avalanche est déclenchée et la GM-APD perd sa nature semi-conductrice pour devenir conductrice : le commutateur de la Figure A.4 est fermé. Le courant grimpe jusqu'à une valeur limitée par la résistance d'étouffement R_Q et la capacité interne de la GM-APD se décharge. Le photon est détecté.

- B → C : étouffement

Le courant traversant la résistance d'étouffement génère une tension qui réduit celle aux bornes de la GM-APD en-dessous de la tension de claquage V_{seuil} . Les électrons perdent leur énergie cinétique et ne sont alors plus en mesure de préserver l'avalanche. L'avalanche est donc « étouffée ».

- C → A : rechargement

Le commutateur de la Figure A.4 est ouvert. La capacité interne se recharge et la GM-APD est prête pour la détection d'un nouveau photon.

ANNEXE B – CARACTÉRISTIQUES D'UN PLASMA

La densité des électrons n_e et le degré d'ionisation α , qui tient compte des densités d'ions n_i et de radicaux libres n_r , constituent des caractéristiques d'un plasma. Le degré d'ionisation permet notamment de distinguer les plasmas qui contiennent le plus d'ions par rapport au nombre de radicaux libres suivant la définition (B.1) [18].

$$\alpha := \frac{n_i}{n_i + n_r} \quad (\text{B.1})$$

Les cas extrêmes 0 et 1 représentent respectivement un gaz neutre (n'est pas un plasma) et un plasma totalement ionisé. Le degré d'ionisation des plasmas générés pour la gravure de microsystèmes est faible : il se situe entre 10^{-4} et 10^{-2} . [18]

Outre la densité des composants, la température des électrons T_e est aussi une caractéristique attribuée pour la distinction des plasmas en les séparant selon deux classes : les plasmas froids et les plasmas chauds. La température des électrons (en Kelvins [K]) ne doit pas être confondue avec la température électronique $\langle v_e \rangle$ qui représente l'énergie cinétique moyenne des électrons (en électronvolts [eV]). Ces deux caractéristiques se convertissent l'une à l'autre grâce à la constante (ou facteur) de Boltzmann ($k_B = 8,617 \times 10^{-5} \text{ eV} \cdot \text{K}^{-1}$) et se calculent de la même façon pour les ions (T_i et $\langle v_i \rangle$). [26, p. 162]

$$\langle v_{e,i} \rangle = k_B T_{e,i} \quad (\text{B.2})$$

La notion de température associée à un électron correspond donc directement à son énergie cinétique affectée d'un facteur $1/k_B$. Un électron rapide est donc dit « chaud » et un électron lent, « froid ».

Sous l'effet d'un champ électrique d'intensité E et à pression P_{plasma} , l'énergie cinétique moyenne des électrons (et des ions) peut être estimée selon le rapport suivant [26, p. 163] :

$$\langle v_{e,i} \rangle \approx \frac{E}{P_{\text{plasma}}} \quad (\text{B.3})$$

En associant à l'équation (B.2) l'approximation (B.3) :

$$T_{e,i} \approx \frac{1}{k_B} \left(\frac{E}{P_{plasma}} \right) \quad (B.4)$$

Une intensification du champ électrique accélère les électrons et les ions et augmente leur énergie, alors qu'une augmentation de pression diminue leur libre parcours moyen et donc leur énergie.

Puisque la masse des électrons est faible comparativement à celles des autres constituants du plasma (molécules neutres de gaz, ions et radicaux libres), le transfert thermique généré par les collisions est faible. Par conséquent, les électrons sont les constituants qui restent chauds le plus longtemps et empêchent le plasma à l'état stationnaire d'être à l'équilibre thermodynamique [26, p. 162], [45].

Ce déséquilibre thermodynamique crée un rapport d'énergie cinétique moyenne (et de température) qui se situe entre 10 et 100 [26, p. 162].

$$\frac{T_i}{T_e} = \frac{\langle v_i \rangle}{\langle v_e \rangle} \in [10, 100] \quad (B.5)$$

En ce qui concerne le classement des plasmas [18], [42], [45] :

- Plasmas froids : $T_e < 10^6 K$. La densité d'ions est nettement inférieure à la densité de radicaux libres et leur température est aussi nettement inférieure à celle des électrons. Ils sont utilisés notamment pour la gravure de microsystemes et forment les aurores boréales.
- Plasmas chauds : $T_e > 10^6 K$. La densité d'ions est nettement supérieure à la densité de radicaux libres et leur température se rapproche de celle des électrons. C'est le cas des étoiles.

Certains auteurs utilisent aussi la catégorie de « plasmas thermiques » pour qualifier les plasmas dont la température des ions est proche de celle des électrons, mais dont la température de ces électrons est trop basse pour les qualifier de « chauds » [42]. Pour la gravure de microsystemes, la température typique des électrons est $T_e \approx 35\,000 K$ ($\langle v_e \rangle = 3 eV$). Ce sont donc des plasmas froids. Le rapport de la densité d'ions sur la densité d'espèces neutres se situe dans ce cas entre 100 et 10 000. [45]

ANNEXE C – INFLUENCE DU RAPPORT DES AIRES DE SURFACE DES ÉLECTRODES SUR L'ÉNERGIE DES IONS DANS UNE CONFIGURATION CCP DE GRAVURE AU PLASMA

Le rapport des aires de surface des électrodes est un paramètre intrinsèque à un système qui influence l'énergie des ions bombardant le plateau (la cathode) et l'anode, respectivement pendant les cycles négatifs et positifs de la tension au plateau. L'évaluation de ce rapport d'aire sert à concentrer l'énergie des ions sur le plateau et à minimiser leur énergie sur l'anode.

D'abord, il a été démontré que pour des aires de surface à l'anode S_{anode} et à la cathode $S_{cathode}$ [26, p. 170] :

$$\frac{\bar{V}_{plasma} + |V_{auto}|}{\bar{V}_{plasma}} = 1 + \frac{|V_{auto}|}{\bar{V}_{plasma}} = \left(\frac{S_{anode}}{S_{cathode}} \right)^4 \quad (C.1)$$

En comparant avec les équations d'énergie des ions aux électrodes (3.36) et (3.37), la relation suivante peut être trouvée :

$$\frac{\bar{E}_{i,cathode}}{\bar{E}_{i,anode}} = \left(\frac{S_{anode}}{S_{cathode}} \right)^4 \quad (C.2)$$

Plus l'anode a une grande superficie par rapport au plateau (la cathode), plus l'énergie des ions contribuant à la gravure est grande et plus l'énergie des ions endommageant l'anode est petite. Physiquement, ceci est dû au fait que la gaine au-dessus de l'électrode la plus petite est toujours plus épaisse que celle au-dessus de l'électrode la plus grande. Les épaisseurs de gaine au-dessus de la cathode $d_{cathode}$ et au-dessus de l'anode d_{anode} dépendent de la différence de potentiel entre le plasma et une surface selon la relation suivante :

$$\frac{\bar{V}_{plasma} + |V_{auto}|}{\bar{V}_{plasma}} = \left(\frac{d_{cathode}}{d_{anode}} \right)^{4/3} \quad (C.3)$$

Les épaisseurs des gaines sont déterminées en comparant les expressions (C.1) et (C.3) :

$$\frac{d_{cathode}}{d_{anode}} = \left(\frac{S_{anode}}{S_{cathode}} \right)^3 \quad (C.4)$$

Pour l'obtention d'un système optimal à la fois en termes de gravure et du maintien de l'anode en bon état, il faut que l'anode possède une surface beaucoup plus grande que la cathode. Pourtant, une cathode de grande surface permet de graver plusieurs tranches à la fois ou de graver des tranches plus grandes. Dans ces cas-là, une anode encore plus grande est de mise [26, p. 170].

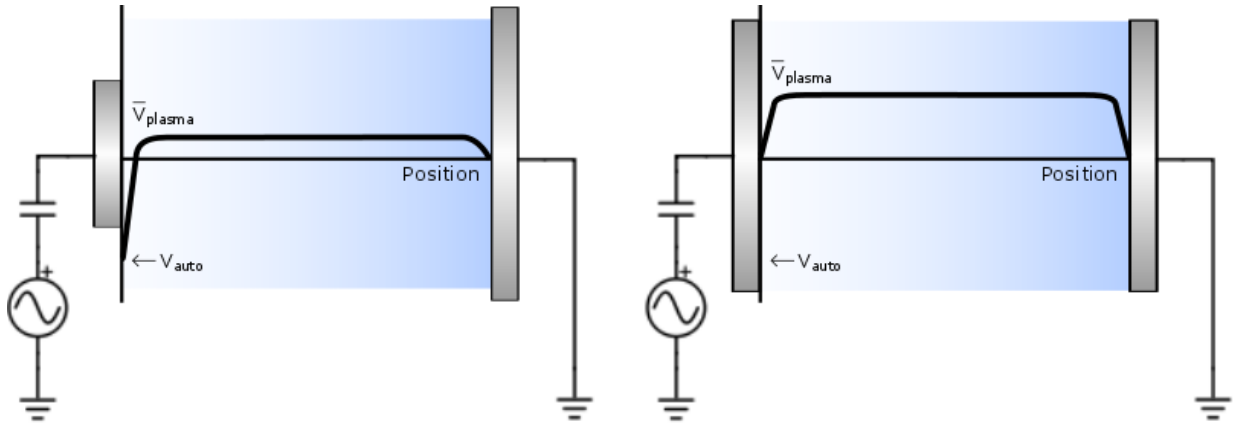


Figure C.1 : Moyenne temporelle de la tension entre des électrodes pour deux rapports de surface différents.

ANNEXE D – CALCUL DU DIAMÈTRE SOUHAITÉ DES TSV AVANT POUR LE REMPLISSAGE PAR DU MÉTAL

Soit t , l'épaisseur d'une couche.

Pendant la décontamination par oxydation (0,100 μm) et la gravure humide, du silicium est consommé. Étant donné qu'une oxydation thermique consomme une épaisseur de silicium équivalent à 46% de l'épaisseur d'oxyde formée, alors cette étape élargit les TSV avant de :

$$t_{decontam} = 2 \times 0,46 \times 0,100 = 0,092 \mu\text{m} \quad (\text{D.1})$$

Ensuite, l'oxydation thermique (0,540 μm) amincit les TSV avant de chaque côté. Étant donné que 46% du silicium est consommé, seulement 54% de l'épaisseur totale d'oxyde formée obstrue les TSV avant. Les TSV avant sont amincis de :

$$t_{SiO_2} = 2 \times 0,54 \times 0,540 = 0,583 \mu\text{m} \quad (\text{D.2})$$

Finalement, sachant que 80 nm de TiN doit être déposé sur les parois, alors les TSV avant s'amincissent d'une valeur égale à :

$$t_{TiN} = 2 \times 0,08 = 0,16 \mu\text{m} \quad (\text{D.3})$$

Le diamètre initial des TSV avant souhaité est de 2,2 μm . Le diamètre final des TSV avant qui peut être rempli par du métal peut enfin être calculé :

$$2,2 + t_{decontam} - t_{SiO_2} - t_{TiN} = 2,2 + 0,092 - 0,583 - 0,16 \approx 1,5 \mu\text{m} \quad (\text{D.4})$$

ANNEXE E – RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE DANS UNE STRUCTURE SIMPLE

La résistance électrique R d'une structure de longueur l et de résistivité électrique ρ se calcule ainsi [88] :

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (\text{E.1})$$

Où A est l'aire de la surface perpendiculaire à la direction du courant électrique.