



# Rapport de TP Micro-332 (a) MT - BA6

11.03.2022 - 04.04.2022

**Groupe 27**



Mehdi Amor  
Selma Benhassine  
Aly El Bindary  
Loïc Finette  
Oussama Jaffal

Assistant : Yang Zhiwei



## Table des matières :

<b>I.</b>	<b>Introduction générale .....</b>	<b>5</b>
1.	Numéros d'identification, orientation et dopage des substrats .....	5
2.	Salle blanche .....	5
<b>II.</b>	<b>TP1 : Courbe de contraste .....</b>	<b>6</b>
1.	Introduction .....	6
2.	Matériels et équipements .....	6
3.	Méthodes et protocoles .....	6
3.1.	Feuille de route .....	6
3.2.	Silanisation .....	7
3.3.	Test de mouillabilité .....	8
3.4.	Déposition de la résine .....	8
3.5.	Recuit thermique et réhydratation .....	9
3.6.	Exposition de la résine .....	9
3.7.	Développement de la résine .....	10
4.	Résultats et analyses .....	10
4.1.	Analyse de la courbe de contraste .....	10
4.2.	Caractérisation au microscope optique .....	12
5.	Conclusion .....	17
<b>III.</b>	<b>TP2 : Alignement entre deux niveaux .....</b>	<b>18</b>
1.	Introduction .....	18
2.	Matériels et équipements .....	18
3.	Méthodes et protocoles .....	18
3.1.	Procédé de fabrication .....	18
3.2.	Procédure d'alignement .....	19
4.	Résultats et analyses .....	20
5.	Conclusion .....	22
<b>IV.</b>	<b>TP3 : Gravure chimique humide .....</b>	<b>23</b>
1.	Introduction .....	23
2.	Matériels et équipements .....	23
3.	Méthodes et protocoles .....	23
3.1	Développement d'aluminium .....	24
3.2	Extraction de la résine .....	24
4.	Résultats et analyses .....	25
5.	Conclusion .....	28
<b>V.</b>	<b>Conclusion finale .....</b>	<b>29</b>

**VI. Références et annexes ..... 30**

## I. Introduction Générale

De manière générale, l'ambition de ces TP est de se familiariser avec les salles blanches, leurs protocoles et les différentes méthodes utilisées pour réaliser des circuits intégrés, ainsi que les règles de sécurité à suivre et l'importance de tenir une feuille de route détaillée et rigoureuse. On utilisera quatre plaquettes, deux en silicium et une en SiO<sub>2</sub>/Si ainsi qu'une en Al/glass. Les objectifs de ces TP se résument plus spécifiquement dans l'élaboration et l'étude d'une courbe de contraste pour une résine donnée, l'élaboration d'un alignement entre deux niveaux et la réalisation d'une gravure chimique humide.

### 1. Numéros d'identification, orientation et dopage des substrats

- Si wafer : ID 37342 , P-doped Si 100
- Si wafer with 200nm SiO<sub>2</sub> layer : ID 61871 , P-doped Si 100
- Glass wafer with 800nm Al layer

### 2. Salles blanches

Nous avons travaillé dans plusieurs salles du CMi, chacune avec ses spécificités et son domaine d'application. La photolithographie a été faite en zone 13, la gravure en zone 14, et les mesures en zone 15. Celles-ci sont de classe 1000. Le solvant (stripping) a été effectué en zone 12 qui est de classe 10 000.

Travailler en salle blanche nécessite le respect de maintes mesures sanitaires et de protection. Le personnel est la première source de pollution, il est donc essentiel de porter une tenue adaptée avant d'entrer dans le bâtiment. Celle-ci se compose d'un masque, de gants vinyl, d'une combinaison totale avec capuchon, d'une charlotte pour les cheveux, de bottes, de surchaussures et finalement de lunettes de protection. De plus, il faut porter (et enlever à la fin) chacune de ces composantes suivant une chronologie précise pour un maximum de caution.

## II. TP1 : Courbe de contraste

### 1. Introduction

Dans ce premier TP, le but était d'établir une courbe de contraste pour une résine photosensible déposée sur une plaque de silicium. Cette courbe de contraste permet de déterminer la dose d'exposition optimale à utiliser pour les processus ultérieurs. En effet, l'utilisation de résine comme masque est intéressante puisque plus le contraste est élevé, plus la résistance à la gravure chimique est bonne, ce qui s'ensuit d'une résolution de circuits optimale. C'est pour cette raison qu'il est utile de définir sa sensibilité et son contraste. Pour cela, une tranche de Si a d'abord été revêtue de la résine photosensible. Ensuite, six sections différentes de la plaquette ont été exposées à différentes doses. Après développement, l'épaisseur de réserve restante dans les différentes sections de la plaquette a été mesurée avec un réflectomètre FilMetrics, et la courbe résultante a été évaluée.

### 2. Matériels et équipements

Pour ce TP, le wafer utilisé est celui en Si. Deux masques composés de parties en Chrome placé sur des fines plaques en verre ont été mis à profit afin d'exposer différentes parties de la résine pendant des durées différentes et de déduire l'effet de la durée d'exposition sur l'épaisseur de la résine. La première étape fût la silanisation pendant laquelle une couche de hexamethyldisilazane (HMDS) est déposée sous forme gazeuse sur le substrat pour améliorer l'adhésion de la couche de résine. Une couche de résine AZ1512HS est ensuite étendue sur le même substrat et ce dernier est par la suite placé dans un A2726 MIF Developer pendant 45s pour le développement. Puis, le substrat est rincé à l'aide d'eau déionisée.

#### *Zone 13 :*

En ce qui concerne les appareils utilisés, "ATMsse SB20 coater line" a servi pour les deux premières étapes (dépôt HMDS, résine et softbake). Plus précisément, le module "HMDS hotplate OPTIhot VB20" a été employé pour le dépôt HMDS, le "SSE coater OPTIspin SB20" pour le dépôt de la résine et le "Präzitherm hotplate PTZ 28-2 ET" pour le softbake. Finalement le "Süss MJB4" a été utilisé pour l'exposition de la résine.

#### *Zone 15 :*

Afin de mesurer et de contrôler l'épaisseur des couches de résine, un réflectomètre spectroscopique "Filmetrics F20-UV" a été utilisé.

### 3. Méthodes et Protocoles

#### 3.1. Feuille de route

Lors des travaux pratiques, nous allons garder une feuille de route détaillée des traitements réalisés sur le wafer. Cet outil va nous permettre de garder un historique de ce qui a été fait au wafer et de refaire l'expérience si nécessaire. On peut retrouver en annexe notre feuille de route. Nous mettons à disposition ci-dessous le process flow récapitulatif de la photolithographie faite pour le TP1.

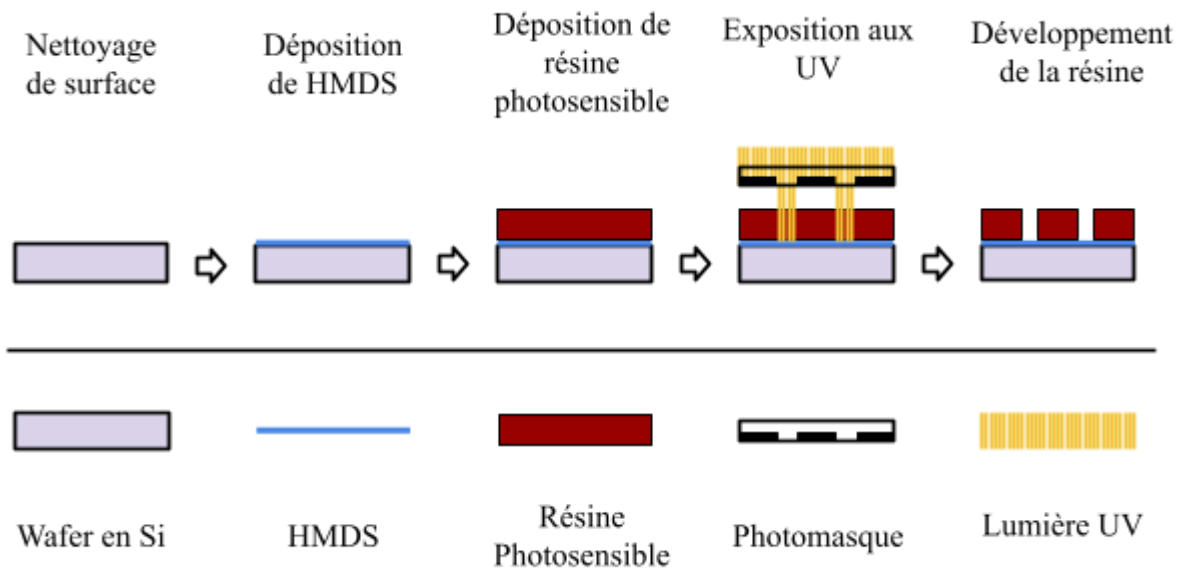


Fig II.3.1 : Step-by-step process de la photolithographie

### 3.2. Silanisation

Le but de ce procédé est de s'assurer que la résine adhère bien au wafer et qu'elle soit répandue uniformément. Elle sert à rendre le wafer hydrophobe. Avant le traitement, le substrat est hydrophile à cause de l'oxyde présent dans le silicium. Alors, l'humidité dans l'air est absorbée, ce qui diminue l'adhésion de l'éventuelle résine. On commence par mettre une deuxième paire de gants pour rajouter une couche de protection. Puis on place le wafer dans le "HMDS hotplate OPTIhot VB20", ferme le couvercle et on exécute le programme "HDMS Standard" afin de déposer une fine couche de HMDS sur le substrat.

Il est à noter que la déposition est réalisée en phase gazeuse. La composition de la molécule HMDS est la suivante :

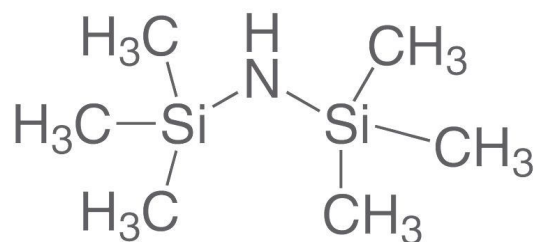


Fig. II.3.2 : composition de HMDS

Donc, lorsque cette substance entre en contact avec le SiOH, les molécules NH vont se lier à l'hydrogène pour former du NH<sub>3</sub> libre. Ensuite le Si(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub> va se lier à l'oxygène pour créer une surface hydrophobe et empêcher l'humidité dans l'air de créer des liens avec le wafer. Après la déposition la dernière étape est d'ouvrir le couvercle et sortir le wafer.

### 3.3. Test de mouillabilité

Ce test est employé pour vérifier que la surface est bel et bien hydrophobe. Il consiste à déposer une goutte d'eau sur le wafer et observer la forme de la goutte. Si celle-ci a une forme ronde ou s'étale très peu, le test est passé et le wafer ne forme pas de liaisons avec l'eau. Dans le cas où la goutte s'étale, le test n'est pas validé et la surface est toujours hydrophile. L'angle de contact peut être utilisé pour mesurer l'étalage.

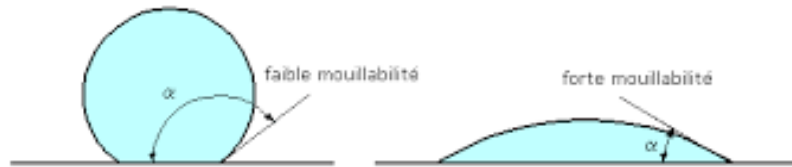


Figure 10 - L'angle de contact d'un liquide avec un solide est généralement utilisé comme l'index de mouillabilité. Pour  $\alpha < 90^\circ$ , le liquide mouille la paroi (exemple: de l'eau sur le verre), pour  $\alpha > 90^\circ$  le liquide ne mouille pas la surface (exemple: du mercure sur du verre). Si  $\alpha = 0^\circ$  la mouillabilité du liquide pour cette surface est totale.

Fig. II.3.3 : Une goutte sur un wafer hydrophobe (à gauche) et sur un wafer hydrophile (à droite)

### 3.4. Déposition de la résine

Les résines positives sont des résines qui deviennent solubles au développeur une fois exposées à la lumière ultraviolette. Donc, une fois le wafer mis dans le développeur, la partie soluble sera enlevée. La résine déposée est l'AZ1512HS, une résine positive. La machine employée pour la déposition est la SSE SB20. La première étape du processus est de nettoyer le chuck pour s'assurer que quand le wafer est placé dessus, il n'est pas à un angle. Ensuite le wafer est placé sur le chuck et on active le vacuum pour créer un vide entre le wafer et le chuck pour fixer le wafer. Par après, 2.5 ml de résine sont déposés sur le wafer à l'aide d'une pipette. Lors de cette action il faut s'assurer de bien répartir la résine au centre du wafer et de faire couler de manière continu le liquide pour éviter de former des bulles d'air sur le wafer. Dans le cas où l'on a quelques bulles d'air, elles peuvent être aspirées par la pipette. Ensuite, on ferme le couvercle de la machine et on enclenche le programme STD-3000. Ce programme fait tourner le wafer à 400 tours/minute pendant cinq secondes pour répandre la résine. Puis, il tourne à une vitesse de 3000 tours/minute pendant 45 secondes pour obtenir environ 1.4 um d'épaisseur de résine.

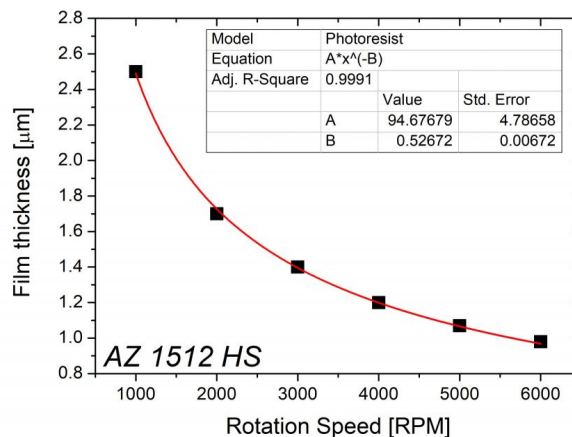


Fig. II.3.4 : L'épaisseur en fonction de la vitesse de rotation

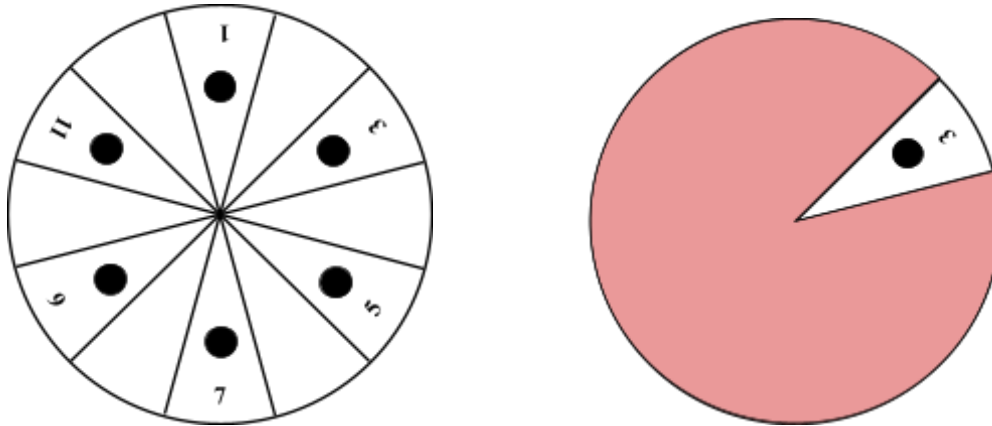
Le changement d'épaisseur peut être remarqué en observant le changement de couleur du wafer.

### 3.5. Recuit thermique et Réhydratation

Cette étape sert à évaporer le solvant encore présent dans la résine. On chauffe une plaque chauffante jusqu'à ce qu'elle atteigne une température d'environ 100°C. On contrôle la température de la plaque grâce à un thermomètre. On place le wafer sur la plaque chauffante pour une durée de 50 secondes. Après, on place le wafer sur du papier essuis-tout pendant dix minutes pour permettre au wafer de se réhydrater et d'absorber l'humidité. C'est une étape importante car elle va permettre à la réaction avec les rayons UV de prendre place. Il faut assurer que le taux d'humidité dans l'espace de travail soit au moins de 40% pour permettre une bonne réhydratation. Dans notre cas, nous avons une température de 21.3°C et un taux d'humidité de 42%.

### 3.6. Exposition de la résine

Le wafer sera exposé dans la machine Süss MicroTec MJB4 à six endroits. Deux masques seront employés pour réaliser cette exposition. Le premier est un masque en verre recouvert de chrome oxydé avec six zones numérotées (1,3,5,7,9,11). Le chrome empêche les rayons ultraviolets d'atteindre le wafer et il fût oxydé afin d'augmenter la résolution en réduisant la réflexion. Le masque est placé sur le support à cet effet et il est collé en créant un vide en appuyant sur l'option vacuum sur l'écran. Il faut s'assurer que le masque est collé avec le côté en chrome oxydé visible. Ensuite, le masque et le support sont tournés pour que la partie en chrome oxydé ne soit plus visible et ceux-ci sont placés dans la machine à l'endroit approprié. Après, le support est fixé à l'aide d'une vis et un masque permettant d'exposer une zone à la fois est placé par dessus le masque à six zones pour exposer la zone 1. Après chaque exposition le masque "une zone" va être tourné pour exposer la prochaine zone. Pour configurer la machine on navigue à Test exposure -> Hard contact -> Hard contact time et on met 10 secondes pour éviter les vibrations indésirables lors de l'exposition. Puis, on met le premier temps d'exposition. Dans notre cas, les temps d'expositions utilisés sont 0.5, 1, 1.5, 2.3, 2.5 et 3 secondes. On met le nombre de cycles à six puisqu'on va faire six expositions. Puis on règle les paramètres WEC (Wedge Error Compensation) en s'assurant que la pression WEC est au-dessus de 0.05 MPA et que la position du bouton de réglage est bien à 0. On place le wafer sur le support en s'assurant que le côté avec la résine est visible. Le wafer est collé grâce à un vide créé entre lui-même et le support et il est poussé dans la machine. On lève le levier "alignment gap" et on appuie sur WEC settings et on suit les instructions données sur l'écran. On va être demandé d'ajuster le bouton de réglage et de lever et baisser le levier. Finalement on appuie sur exposure et on détourne notre regard. En effet la longueur d'onde est de 365 nm, une longueur néfaste à nos yeux. La source des rayons UV est une lampe à mercure. L'intensité est de 20 mW/cm<sup>2</sup> ce qui nous donne les dosages suivants (en mJ/cm<sup>2</sup>): 10, 20, 30, 46, 50 et 60.



*Fig II.3.6.1 (à gauche) : Masque à 6 sections*

*Fig II.3.6.2 (à droite) : Masque découvrant une seule section*

### 3.7. Développement de la résine

Le wafer va être développé en utilisant le développeur AZ726MIF, un développeur composé de 2.38% de TMAH (Tetraméthylammoniumhydroxid) dans l'eau. Cette étape sert à enlever la résine qui a été exposée. Puisque cette substance peut être dangereuse, on met des gants supplémentaires. On commence par placer une étoile en plastique dans un contenant et y verser le développeur. Cette étoile va nous permettre de plus facilement retirer le wafer. Puis, on submerge le wafer dans le développeur pour une durée de 45 secondes. Ensuite, on nettoie le wafer en le plongeant dans l'eau DI pendant une minute. Finalement, on place le wafer sur du papier essuis-tout et on le sèche en utilisant un pistolet à air. On tient le wafer sur un angle pour permettre à l'eau de couler lors du séchage. On jette le développeur dans l'endroit à cet effet car c'est un liquide toxique.

## 4. Résultats et Analyses

### 4.1. Analyse de la courbe de contraste

Avant d'expliquer la stratégie employée pour tracer la courbe de contraste, nous décrivons tout d'abord l'utilité de cette dernière. Lors d'une photolithographie, l'objectif est d'exposer la résine pour une certaine durée et avec une certaine intensité pour pouvoir la détruire. Plus ces paramètres sont augmentés, plus la résine est détruite. Nous cherchons à déterminer la valeur minimale de ces paramètres (dans notre cas, uniquement le temps d'exposition est varié et l'intensité reste constante) pour lesquelles la résine est entièrement détruite. Ceci est crucial car lorsque nous dépassons ces valeurs minimales, nous obtenons une diffusion latérale de la lumière et donc certaines régions de la résine seront plus exposées que d'autres : cette irrégularité cause donc une diminution de la résolution. Voici une illustration de ce phénomène.

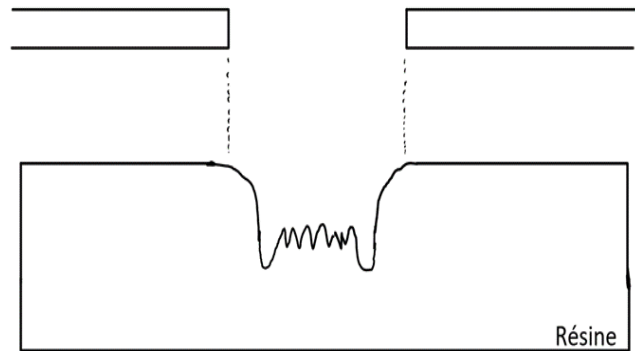
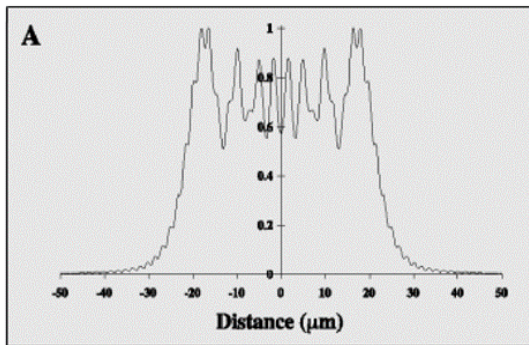


Fig II.4.1.1 : Diffraction en champ proche  
(De Fred E. Lytle, Department of  
Chemistry, 1393 Brown Laboratory, Purdue  
University, West Lafayette, Indiana  
47907-1393)  
<https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1366/0003702991947117>

Fig II.4.1.2 : Résine après développement

La figure 4.1.1 nous montre l'intensité de la lumière en fonction de la position, et ceci explique comment la lumière est diffusée latéralement sur la résine et comment nous obtenons les irrégularités d'exposition qui se trouvent dans la résine de la figure 4.1.2. La courbe de contraste nous permet de déterminer ces contraintes minimales et ainsi d'éviter cette diminution de résolution.

Nous déterminerons cette courbe à travers les différents paramètres relevés durant la photolithographie :

- **Dose [mJ/cm<sup>2</sup>]** : en utilisant l'intensité et le temps d'exposition sur le wafer :  $\text{intensité} * \text{temps d'exposition}$  ;
- **Épaisseur normalisée [%]** : en utilisant l'épaisseur mesurée après l'exposition et l'épaisseur initiale :  $\frac{\text{épaisseur mesurée}}{\text{épaisseur initiale}}$  ;

La dose est uniquement modifiée à travers le temps d'exposition qui varie, l'intensité est constante : **20 mW/cm<sup>2</sup>**.

L'épaisseur initiale du wafer est de **1405 nm**.

Avec ces différentes informations et les mesures effectuées, nous obtenons donc le tableau suivant :

Temps d'exposition [s]	Dose [mJ/cm <sup>2</sup> ]	Épaisseur mesurée [nm]	Épaisseur relative [%]
0	0	1405	100
0.5	10	1357	96.8
1	20	862.2	61.4
1.5	30	403.5	28.8
2.3	46	0	0
2.5	50	0	0
3	60	0	0

On obtient donc la courbe de contraste suivante :

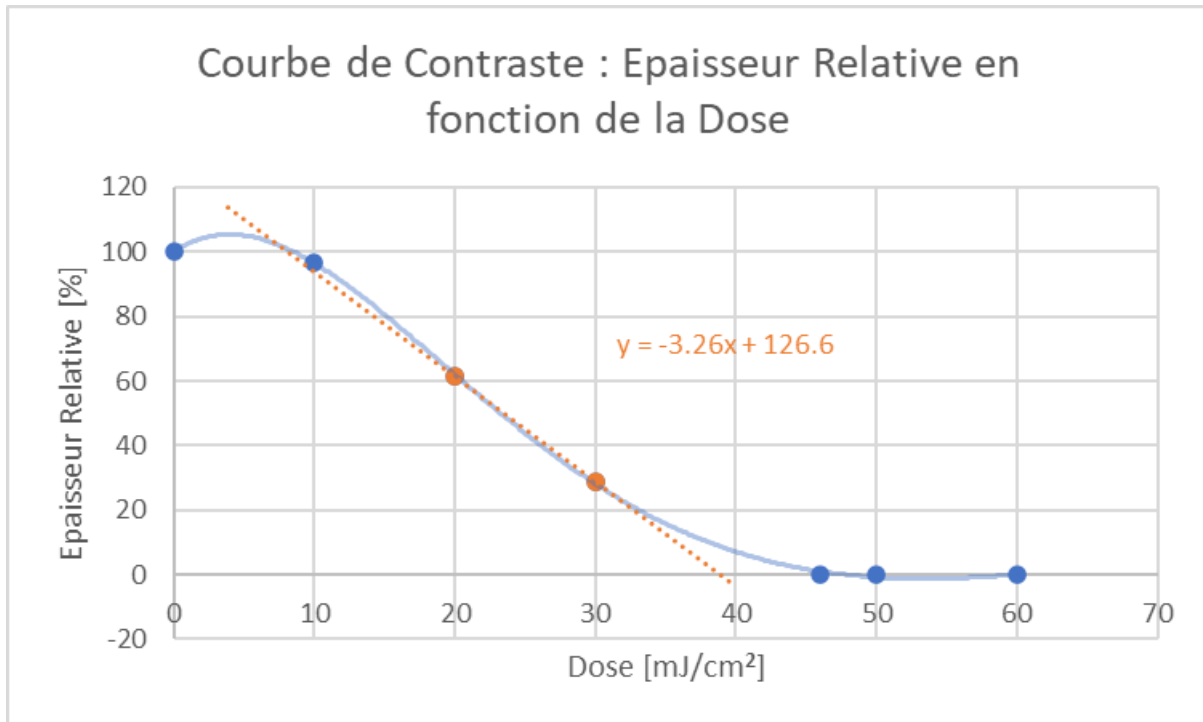


Fig. II.4.1.3 : Courbe de contraste de l'épaisseur relative en fonction de la dose.

Comme nous le voyons dans la figure ci-dessus, à partir de la courbe de contraste nous pouvons déterminer l'équation de la tangente dans la région linéaire de la courbe, nous obtenons :  $y = -3.26 * x + 126.6$ .

Ceci nous permettra de déterminer les sensibilités  $D_0$  (dosage en dessous duquel il n'y a pas de réaction) et  $D_{100}$  (dosage au dessus duquel la réaction est complète et la résine est complètement détruite), sachant qu'elles correspondent aux solutions de l'équation précédente pour  $y_0 = 100\%$  et  $y_{100} = 0\%$  respectivement :

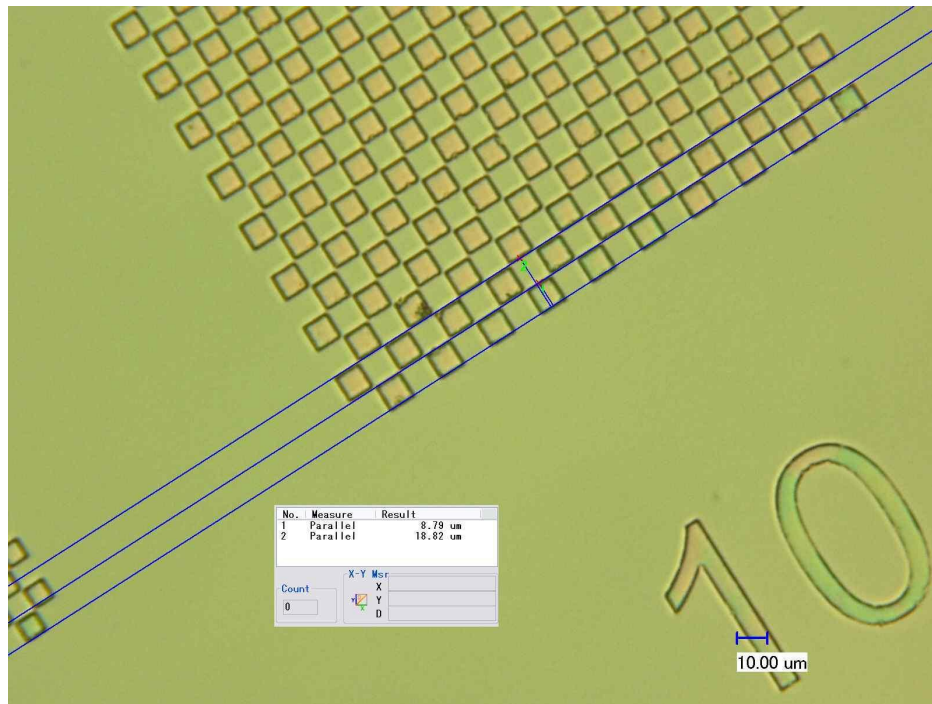
- $-3.26 * D_0 + 126.6 = 100$ , donc  $D_0 = 8.16 \text{ mJ/cm}^2$  ;
- $-3.26 * D_{100} + 126.6 = 0$ , donc  $D_{100} = 38.83 \text{ mJ/cm}^2$ .

La contraste de la résine est donnée par :  $\gamma = \frac{1}{\log\left(\frac{D_{100}}{D_0}\right)}$  ; on obtient donc  $\gamma = 1.48$ .

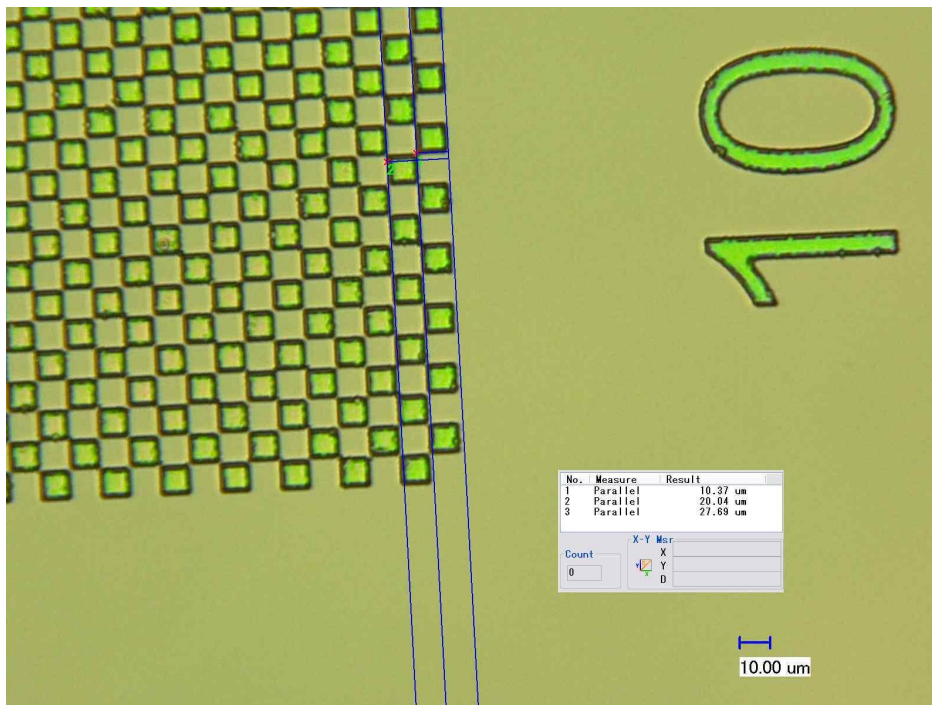
#### 4.2. Caractérisation au microscope optique

Nous allons maintenant évaluer la résolution en étudiant des photos du substrat, avec la résine exposée à différents dosages, observées à l'aide d'un microscope optique. Nous verrons que dans chaque photo il y a des carrés de même taille mais de couleurs différentes, qui indiquent des expositions différentes. A travers un logiciel permettant d'en fixer une certaine échelle et de déterminer la distance entre deux lignes parallèles; nous pouvons déterminer  $C_1$  et  $C_2$ ,

dimensions des carrées correspondant aux régions exposées et non exposées, respectivement, de la résine. Nous utiliserons les photos correspondant au damier 10 (chaque photo a été prise avec un grossissement x1000).



*Fig II.4.2.1 : Exposition à une dose de 10 mJ/cm<sup>2</sup>  
Carrés jaune foncé : région exposée de la résine  
Carrés verts : région non exposée de la résine*



*Fig. II.4.2.2 : Exposition à une dose de 20 mJ/cm<sup>2</sup>  
Carrés vert clair : région exposée de la résine  
Carrés vert foncé : région non exposée de la résine*

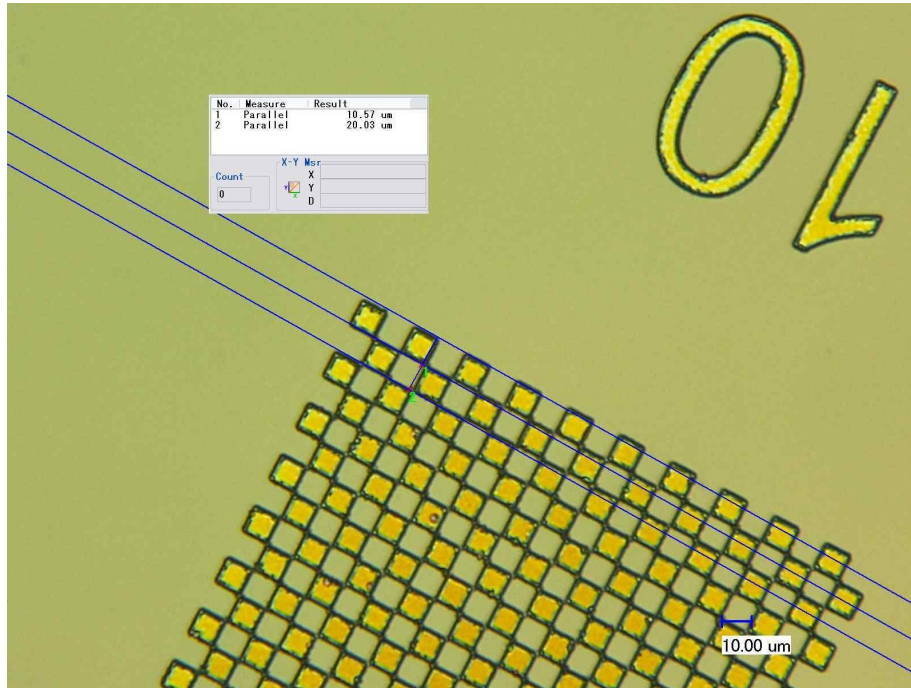


Figure II.4.2.3 : Exposition à une dose de 30 mJ/cm<sup>2</sup>  
 Carrés jaunes : région exposée de la résine  
 Carrés vert foncé : région non exposée de la résine

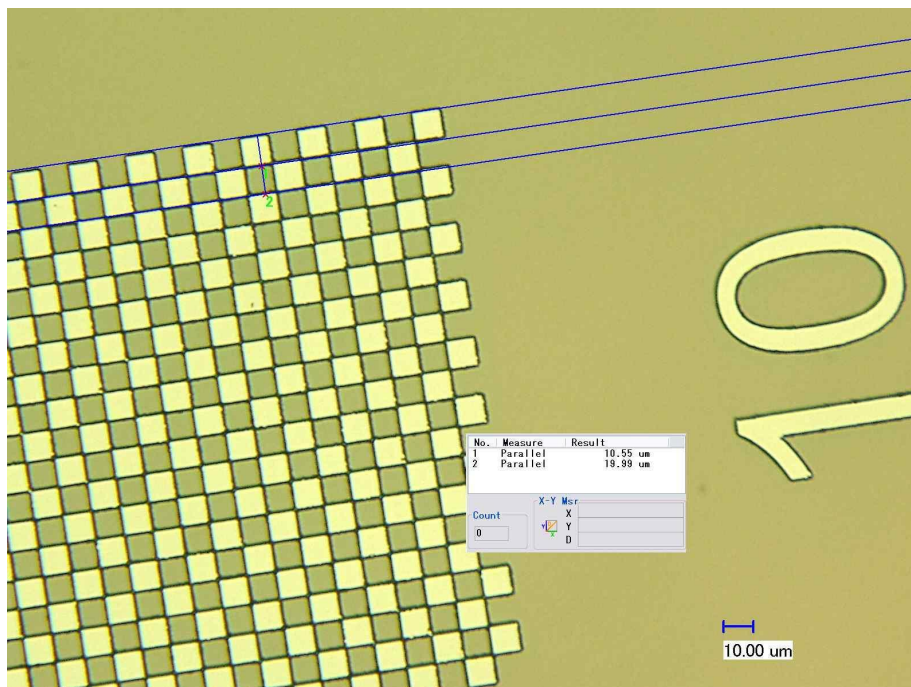


Figure II.4.2.4 : Exposition à une dose de 46 mJ/cm<sup>2</sup>  
 Carrés jaunes clairs/blancs : région exposée de la résine  
 Carrés vert foncé : région non exposée de la résine

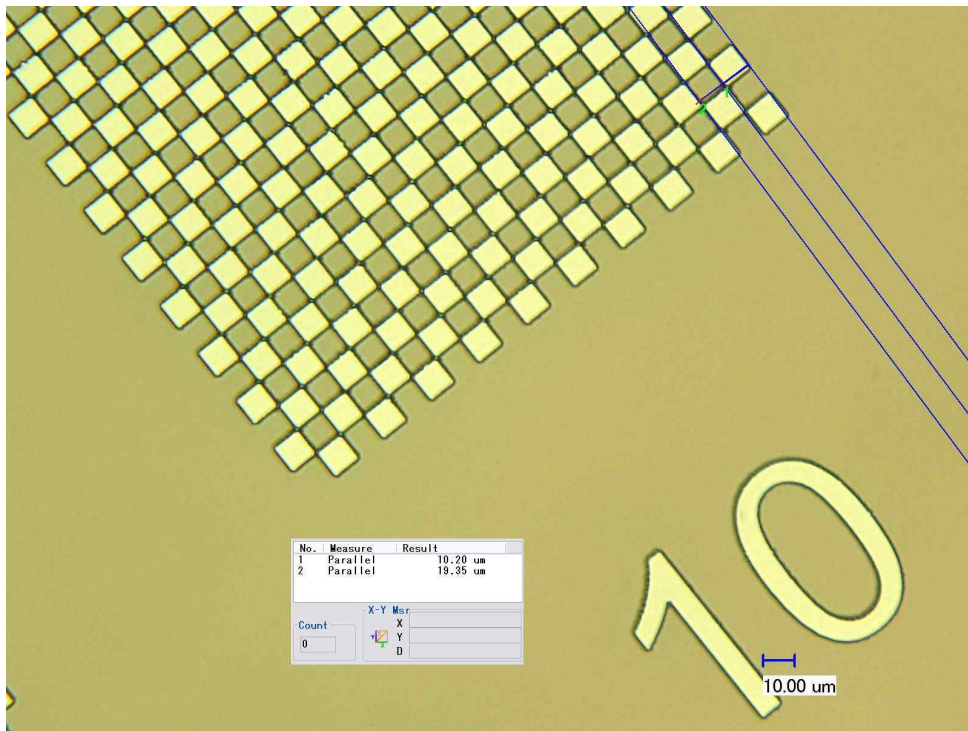


Figure II.4.2.5 : Exposition à une dose de 50 mJ/cm<sup>2</sup>  
 Carrés jaunes clairs/blancs : région exposée de la résine  
 Carrés vert foncé : région non exposée de la résine

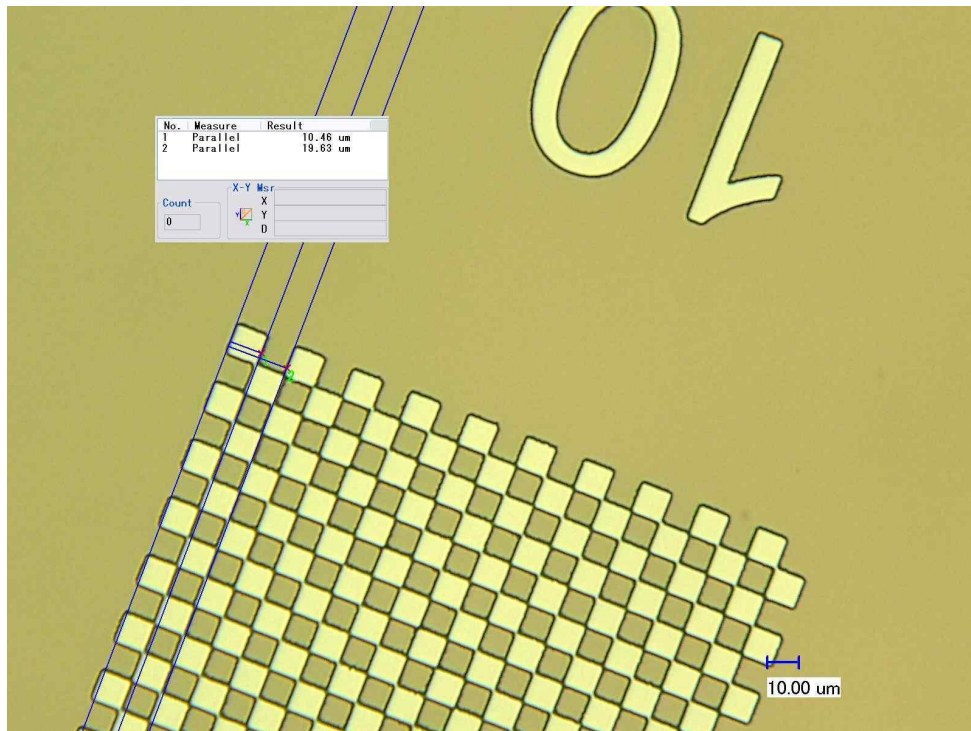


Figure II.4.2.6 : Exposition à une dose de 60 mJ/cm<sup>2</sup>  
 Carrés jaunes clairs/blancs : région exposée de la résine  
 Carrés vert foncé : région non exposée de la résine

En utilisant les valeurs données pour la longueur des deux lignes parallèles, nous obtenons les valeurs suivantes pour C1 et C2 :

Dose [mJ/cm <sup>2</sup> ]	10	20	30	46	50	60
C <sub>1</sub> [μm]	8.79	9.67	9.46	10.55	10.2	10.46
C <sub>2</sub> [μm]	10.03	10.37	10.57	9.44	9.15	9.17

Et nous pouvons donc tracer l'évolution des dimensions C1 et C<sub>2</sub> en fonction de la dose :

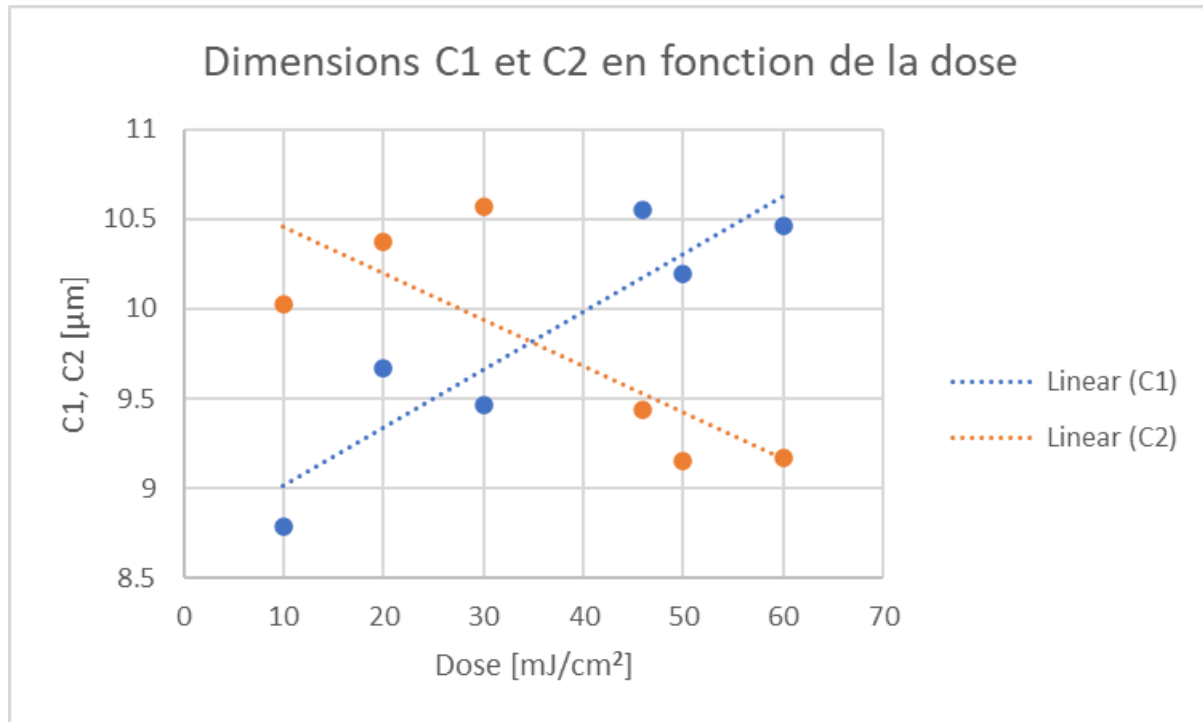


Fig II.4.2.6 : Évolution des dimensions C1 et C2 en fonction de la dose.

La courbe que nous avons obtenue dans la figure 4.2.6 nous montre que la dimension des carrés représentant la région non exposée de la résine (C<sub>2</sub>) diminue de plus en plus lorsque le dosage augmente alors que la dimension des carrés représentant la région exposée (C<sub>1</sub>) augmente plus le dosage augmente. Ceci est logique puisque plus le dosage augmente, plus la largeur de la région exposée augmente au dépend de la réduction de la largeur de la région non exposée (il faudrait noter que lorsque nous évoquons l'augmentation ou bien la diminution de C<sub>1</sub> et C<sub>2</sub>, c'est la tendance générale, malgré quelques valeurs aberrantes comme la deuxième et troisième valeurs de C<sub>2</sub>).

## 5. Conclusion

Durant ce TP, nous avons préparé le wafer, et avons étalé, exposé et développé la résine dessus. Nous avons mesuré les différentes épaisseurs et grâce à cette expérience, la courbe de contraste a pu être trouvée. Cela aide à choisir le temps d'exposition idéal pour les autres wafers. On remarque néanmoins que la résine est sensible aux variations de sorte qu'un petit changement de dose peut faire la différence entre une sous-exposition et une surexposition. Il est donc essentiel d'être précis.e.

### III. TP2 : Alignement entre deux niveaux

#### 1. Introduction

Dans ce deuxième TP, un photomasque a été aligné avec les caractéristiques existantes sur le substrat. Il s'agit d'un processus nécessaire dans la microfabrication, car les dispositifs micro-fabriqués consistent généralement en des caractéristiques modelées sur plusieurs couches de matériaux différentes, qui doivent être bien alignées pour fonctionner correctement. En effet, un léger décalage est suffisant pour altérer le circuit intégré en créant un court-circuit ou, à l'opposé, éviter le contact électrique essentiel.

Un dispositif d'alignement de masque a été utilisé afin d'aligner le photomasque avec les caractéristiques SiO<sub>2</sub> existantes sur une tranche de Si recouverte de résine photosensible. La résine photosensible a été exposée à travers le masque, puis l'alignement a été vérifié à l'aide d'un microscope optique. Les problèmes d'alignement ont ensuite été étudiés.

#### 2. Matériels et équipements

Des tranches de Silicium prétraitées à l'aide d'un masque avec un motif gravé dans une couche de SiO<sub>2</sub> de surface de 200 nm d'épaisseur ont été utilisées. Les wafers ont été traités HMDS, spin-coated avec AZ1512HS, *soft-baked* et réhydratés selon le processus décrit dans le TP1.

La machine "Mask Aligner Süss MicroTec MJB4" a été mise à profit pour gérer et régler l'alignement et l'exposition du wafer. Celle-ci se compose aussi d'un microscope optique qui permet de visualiser en temps réel l'objet d'étude.

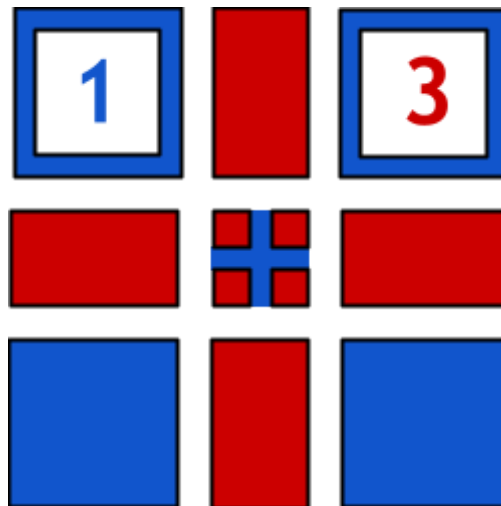
#### 3. Méthodes et protocoles

##### 3.1. Procédé de fabrication

Chaque photomasque mis à disposition pour l'étape de photolithographie dans la microfabrication d'une structure de résistance métallique contient des fonctions d'alignement qui s'appellent des "*markers*", ou marqueurs. Les marqueurs nous permettent d'aligner les différents niveaux du substrat de manière à ce qu'on ait un maximum de 1  $\mu\text{m}$  d'erreur sur les axes x et y et sur la rotation  $\theta$  sur le plan x-y. Pour assurer l'alignement sur ces trois axes, le photomasque dispose de deux marqueurs (fig. \_\_), chacun diamétralement opposé sur une extrémité du wafer. La forme des marqueurs, en signe plus (+), assure un alignement sur les axes x et y. La deuxième marqueurs assure l'alignement de la rotation  $\theta$ .

### 3.2. Procédure d'alignement

La première étape est de placer le photomasque sur le wafer préparé, avec le côté oxydé du masque touchant le wafer, comme précisé ultérieurement, puis les déposer dans la machine Süss MicroTec MJB4. La résolution du microscope doit être réglée de manière à ce que le microscope soit focalisé sur la couche de chromium (Cr). Avant de pouvoir trouver les marqueurs, il faut s'assurer qu'il y ait un écart de  $50\mu\text{m}$  entre le photomasque et le wafer en se servant de la glissière mise à disposition pour cette fonction. Pour détecter les marqueurs, on peut se fier aux barres de référence qui se trouvent aussi sur les photomasques pour nous indiquer la localisation des fonctions d'alignement ainsi que d'autres sections du wafer. Les lentilles d'objectifs sont alors manipulées en utilisant les boutons de réglage qui contrôlent les optiques selon les axes x, y, et  $\theta$  pour que les fonctions d'alignement du masque et du wafer soient visibles dans le même plan. Le masque et le wafer seront bien alignés lorsque les deux marqueurs correspondent à la figure ci-dessous.



*Fig. III.3.2: Exemple de marker pour le masque (rouge) et le motif de  $\text{SiO}_2$  (bleu)*

Une fois cet alignement réalisé, l'écart entre le masque et le wafer peut être fermé, les mettant alors en contact dur. Cela est fait pour assurer aucune déviation des rayons UV lors de l'exposition du wafer. Les réglages WEC, Wedge Error Compensation, doivent alors être ajustés pour garantir le parallélisme entre le wafer et le masque. L'exposition aux UV de la résine se fera alors avec un temps d'exposition optimisé de 3.6 secondes. Finalement, la résine photosensible doit alors être développée en le submergeant dans une solution de AZ1512HS pour 30 secondes. Il est alors impératif de bien rincer le wafer dans un bain d'eau déionisée pour immédiatement arrêter le développement. Il pourra alors être séché avec un pistolet à air, ce qui est important car des gouttelettes d'eau restantes pourront créer des complications pour les étapes suivantes.

## 4. Résultats et analyses

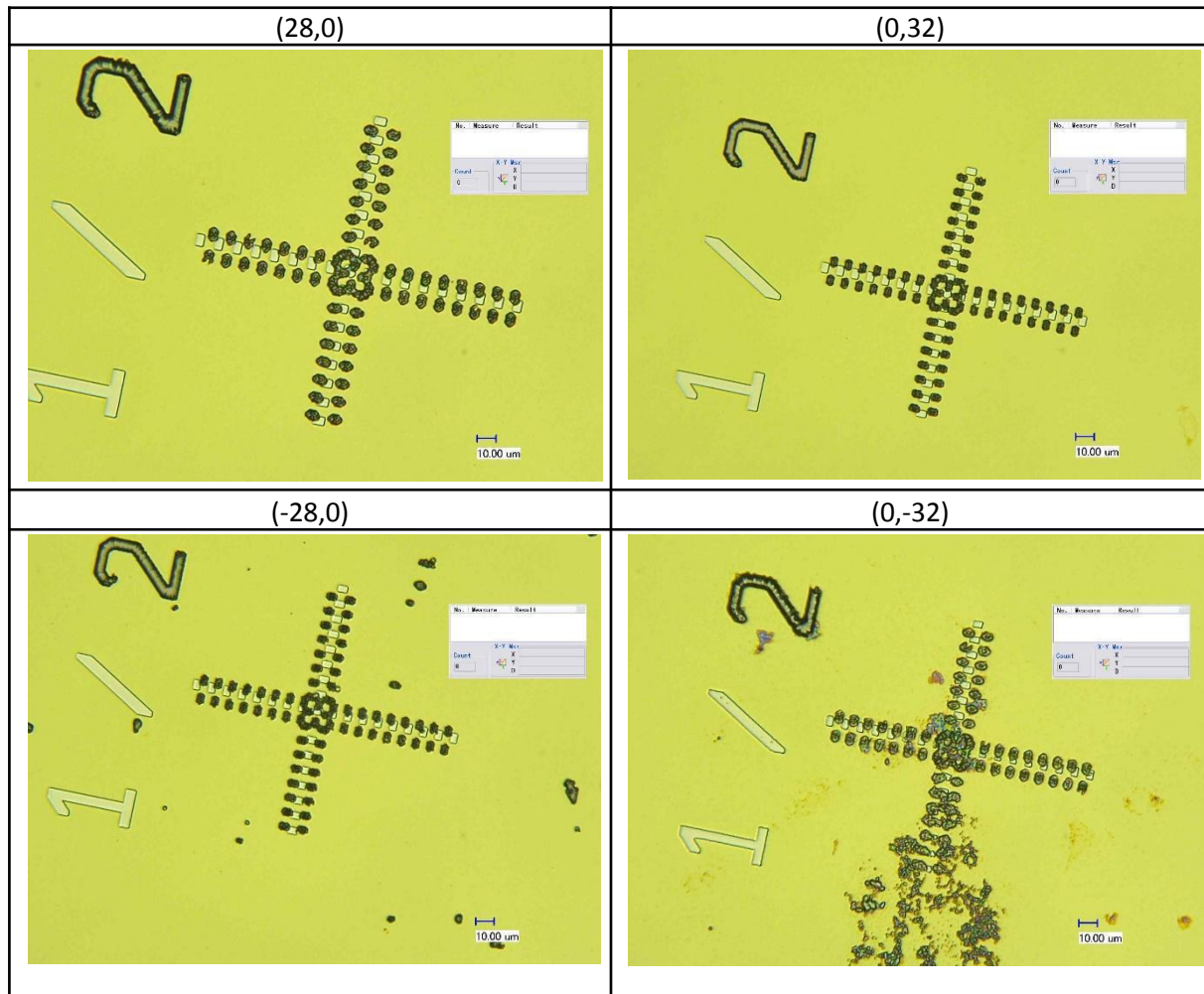


Fig III.4.1 : Photographie du vernier de 500nm avec un grossissement optique  $\times 1000$

La figure 4.1 ci-dessus représente les quatre verniers mis à disposition sur le wafer, leurs positions représentés dans la figure 4.2 ci-dessous, pour pouvoir mesurer l'erreur d'alignement. Nous avons décidé de travailler avec les verniers de 500nm, car l'erreur de l'alignement est supérieure à  $1\mu\text{m}$ . Dans les quatre photos, nous précisons que l'axe x suit la direction de lecture de la figure 1 / 2. On mesure l'erreur d'alignement selon les axes x et y séparément en comptant le nombre de graduations blancs qui sont décalées des graduations noirs depuis le centre, arrêtant aux premières graduations noir et blanc bien alignées les unes avec les autres. On multiplie alors cette valeur avec la résolution pour nous donner l'erreur d'alignement dans la direction positive ou négative.

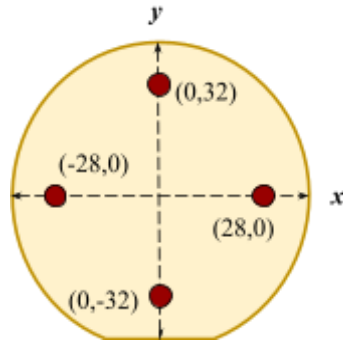


Fig III.4.2 : Représentation approximative des emplacements des verniers

Etudiant	Loïc	Aly	Mehdi	Selma	Oussama
Coordonnées du vernier	(0,32)	(28,0)	(-28,0)	(0,-32)	X
$\Delta x$ [nm]	+2000	+2000	+4500	+4500	X
$\Delta y$ [nm]	+4000	+4000	+1500	+3500	X

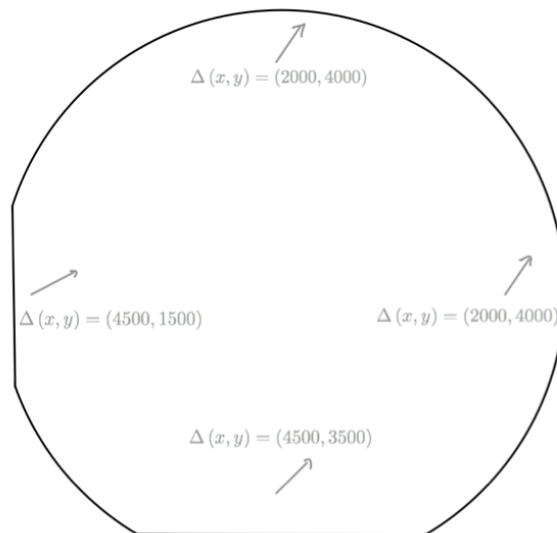


Fig III.4.3 : Représentation approximative des vecteurs déplacements du wafer

Nous observons une translation de direction négative sur les axes x et y, en plus d'une rotation dans le sens opposé des aiguilles de la montre. Ce qui signifie que le désalignement n'est pas négligeable.

## 5. Conclusion

Ce TP nous a permis de réaliser l'importance d'un bon alignement lors de la fabrication de microstructures. L'alignement du motif de résine sur le motif de SiO<sub>2</sub> existant n'est pas le plus idéal et, dans une procédure normale de salle blanche, la résine photosensible aurait été décapée et le processus de lithographie refait. Nous avons évalué les erreurs qui caractérisent si le travail est opérationnel ou pas. Cet essai met en évidence l'importance de vérifier son travail à chaque étape du processus.

## IV. TP3 : Gravure chimique humide

### 1. Introduction

La vocation de ce TP est de graver une couche d'aluminium déposée sur un wafer de silicium oxydé afin d'obtenir des pistes de connexion électrique entre les différents composants du circuit intégré voulu. Ceux-ci ont une taille spécifique impliqueront des résistances électriques liées. Le processus consiste à déposer le wafer dans une solution ANP, où certaines parties de la couche d'aluminium antérieurement protégées grâce à un masque resteront conservées, tandis que les autres parties seront attaquées par le bain composé d'acide acétique ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ), d'acide nitrique ( $\text{HNO}_3$ ) et d'acide phosphorique ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ). Cela permettra d'étudier le temps de gravure optimale pour conserver les bonnes dimensions de la piste et de déterminer les corrélations entre propriétés électriques d'un wafer et les caractéristiques de gravure.

### 2. Matériels et équipements

La gravure d'aluminium s'effectue dans une solution ANP, composée d'acide acétique à 70% ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ), d'acide nitrique à 70% ( $\text{HNO}_3$ ) et d'acide phosphorique à 85% ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) dans les salles wet-benches du CMI. Étant donné la nature toxique et corrosive des produits chimiques cités, il est obligatoire à celui/celle qui s'occupe de la manoeuvre de porter un ensemble spécifique, composé d'un masque en plus, ainsi qu'une visière pour protéger le visage, de gants spéciaux arrivant au coude et d'un tablier.

### 3. Méthodes et protocoles

La gravure chimique humide dans le troisième TP a été faite en suivant la feuille de route ci-dessous.

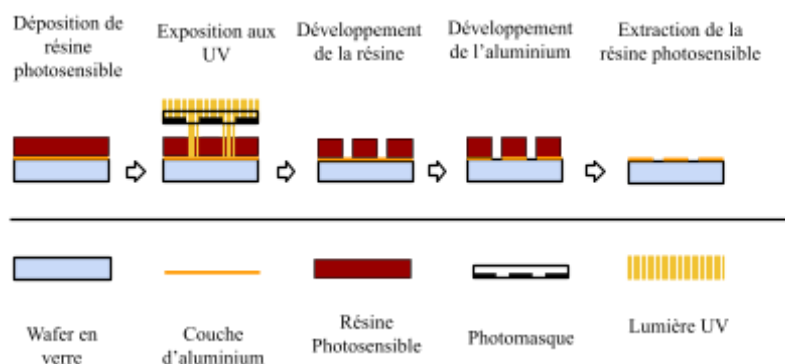


Fig IV.3 : Step-by-step process de la gravure chimique humide de l'aluminium

Le processus complet de la gravure chimique humide consiste en 5 étapes représentés dans la figure . En effet, les trois premières étapes - la déposition de la résine photosensible, l'exposition aux UV et le développement de la résine - ont déjà été parcourues dans les TPs

précédentes. Nous avons appliqué les mêmes méthodes de procédure utilisées avec les autres wafers avec celle-ci. Nous avons alors passé à la quatrième étape pour ce TP.

### 3.1. Développement de l'aluminium

Nous avons fait le développement de l'aluminium au banc d'acide mise à disposition dans la salle blanche. Puisque la gravure de la couche d'aluminium est une gravure humide, la première étape du développement de l'aluminium est d'activer le système de circulation et de chauffage tel que la solution de gravure ANP soit réchauffée, allant d'une température de 31°C à 35,4°C. En effet, une température de gravure de 35°C correspond à un taux de gravure de 300 nm/min, ce qui fait que notre contrôle optimal de la température à 35,4°C nous est satisfaisant. Le wafer d'aluminium a été placé dans un support qui nous protège davantage de la solution de gravure ANP, même si nous avons suivi toutes les mesures de sécurité pour pouvoir manipuler des produits toxiques et corrosifs. Ce support doit alors être gentiment posé dans le bain de ANP.

Nous avons choisi une durée de gravure de 8 minutes, permettant un léger surgravure, un processus nommé overetch qui crée des parties incurvées de l'aluminium sous la résine. Le overetch assure une gravure complète des domaines désirées de l'aluminium, tout en assurant une différence négligeable entre la suite des courbures et les butées finaux. Notre assistant nous avait aussi encouragés d'activer l'agitation de la solution pour encore accélérer le processus total.

### 3.2. Extraction de la résine

Lorsque le buzzer indique la fin de gravure, le support doit être déplacé dans un autre béccher rempli d'eau déionisée et de haute pureté. Ce type de rinçage doit être fait 3 fois pour être sûre qu'il n'y reste aucune particule de ANP sur la surface du wafer. Le wafer peut alors être séché avec un pistolet à air. Avant de pouvoir passer à la prochaine étape, il faut similairement s'assurer qu'il ne reste pas de solution ANP sur le plan de travail, ce qui peut potentiellement mettre en danger les prochains utilisateurs. Il faut absolument rincer les gants et le plan de travail et les sécher avec plusieurs serviettes en papier afin d'éviter de laisser une seule goutte d'eau restante.

Nous avons alors changé de salle pour pouvoir utiliser le banc de solvant afin d'entamer l'extraction de la résine photosensible du wafer. Nous avons rempli un béccher du solvant SVC-14, qui a d'excellentes performances de décollage du métal et qui est 100% soluble dans l'eau. Ces deux facteurs, entre autres, font que ce solvant soit optimal pour le décapage rapide de la résine photosensible. En effet, le wafer a seulement dû être mis dans ce bain pour une minute avant d'être déplacé à un bain d'eau déionisé. Comme précédemment, le wafer doit être soigneusement rincé et séché. La gravure chimique humide est donc faite.

Finalement, il faut assurer la propreté du banc de solvant et du banc d'acide, ainsi que tous les bécchers, supports, et autres outils utilisés, afin de garantir la sécurité de nos collègues.

#### 4. Résultats et analyses

Pour la caractérisation électrique, nous disposons d'un outil qui passe un courant entre 2 points et mesure la différence de tension résultante pour déterminer la résistance.

Les tableaux ci-dessous contiennent les valeurs des résistances mesurées des pistes en aluminium en fonction de leurs longueurs et largeurs théoriques.

Voici les valeurs trouvées :

Contact	V1-V2	V1-V3	V2-V3	V2-V4	V3-V4	V4-V5	W [ $\mu\text{m}$ ]	Nom étudiant
L [ $\mu\text{m}$ ]	400	700	300	500	200	100	X	X
R [ $\text{m}\Omega$ ]	3634	6322	2691	4479	1783	942	10	Oussama
R [ $\text{m}\Omega$ ]	1282	2262	986	1678	692	403	20	Aly
R [ $\text{m}\Omega$ ]	830	1454	624	1054	440	257	30	Selma
R [ $\text{m}\Omega$ ]	584	1032	444	762	310	182	40	Loïc
R [ $\text{m}\Omega$ ]	270	496	225	370	158	96	80	Mehdi

À partir du tableau ci-dessus, voici les courbes  $R = f(L)$  selon la largeur du circuit :

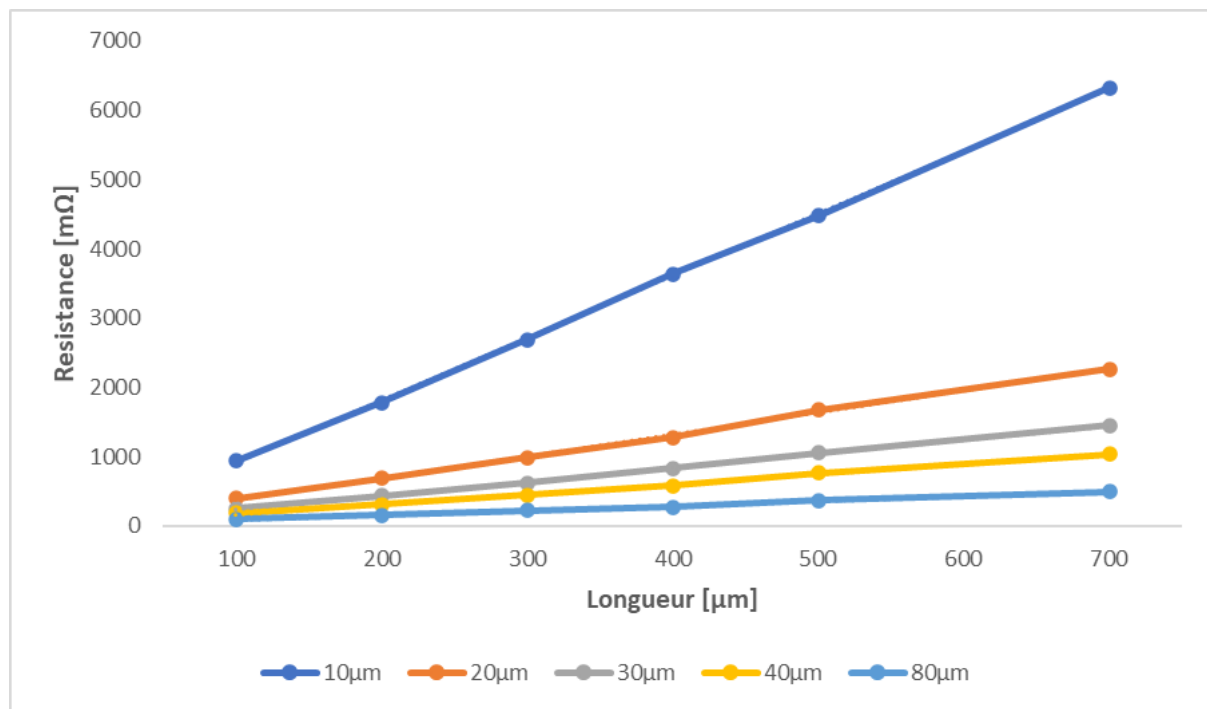


Fig IV.4.1.1: Tableau de relation entre la résistance et la longueur du circuit

Nous remarquons que les courbes sont linéaires. Ceci est bien le résultat attendu, car la résistance est donnée par la formule :

$$R = \rho \frac{L}{W.T}$$

Cette formule donne la relation  $R \propto L$ , avec le facteur de proportionnalité donné par la pente de la courbe visible dans la figure 4.1.1.

Pentes des différents graphes :

À partir du graphe ci-dessus, voici les valeurs des pentes :

Nous noterons la pente des courbes de résistance  $p_w$  avec  $W$  la largeur théorique.

$W80$	$p_{80} = 0,671 \Omega/mm$
$W40$	$p_{40} = 1,436 \Omega/mm$
$W30$	$p_{30} = 2,011 \Omega/mm$
$W20$	$p_{20} = 3,136 \Omega/mm$
$W10$	$p_{10} = 8,991 \Omega/mm$

Afin de déterminer la résistance  $R_s$ , nous suivons le même protocole utilisant avant sur l'ensemble des 8 structures. Ensuite nous appliquons cette relation :

$$R_s = \frac{\pi}{\ln(2)} \times \frac{V_{34}}{I_{12}}$$

Structure	A	B	C	D	E	F	G	H
$R_s$ [mΩ]	X	48.40	48.45	48.08	X	48.48	47.81	48.44

Remarque :

*Nous n'avons pas trouvé les circuits A et E imprimés sur notre wafer. Nous avons observé à leurs places deux autres circuits dupliqués (H et D). Cependant ceci ne modifierait pas nos calculs, vu que ces deux motifs (A et E) sont aussi symétriques.*

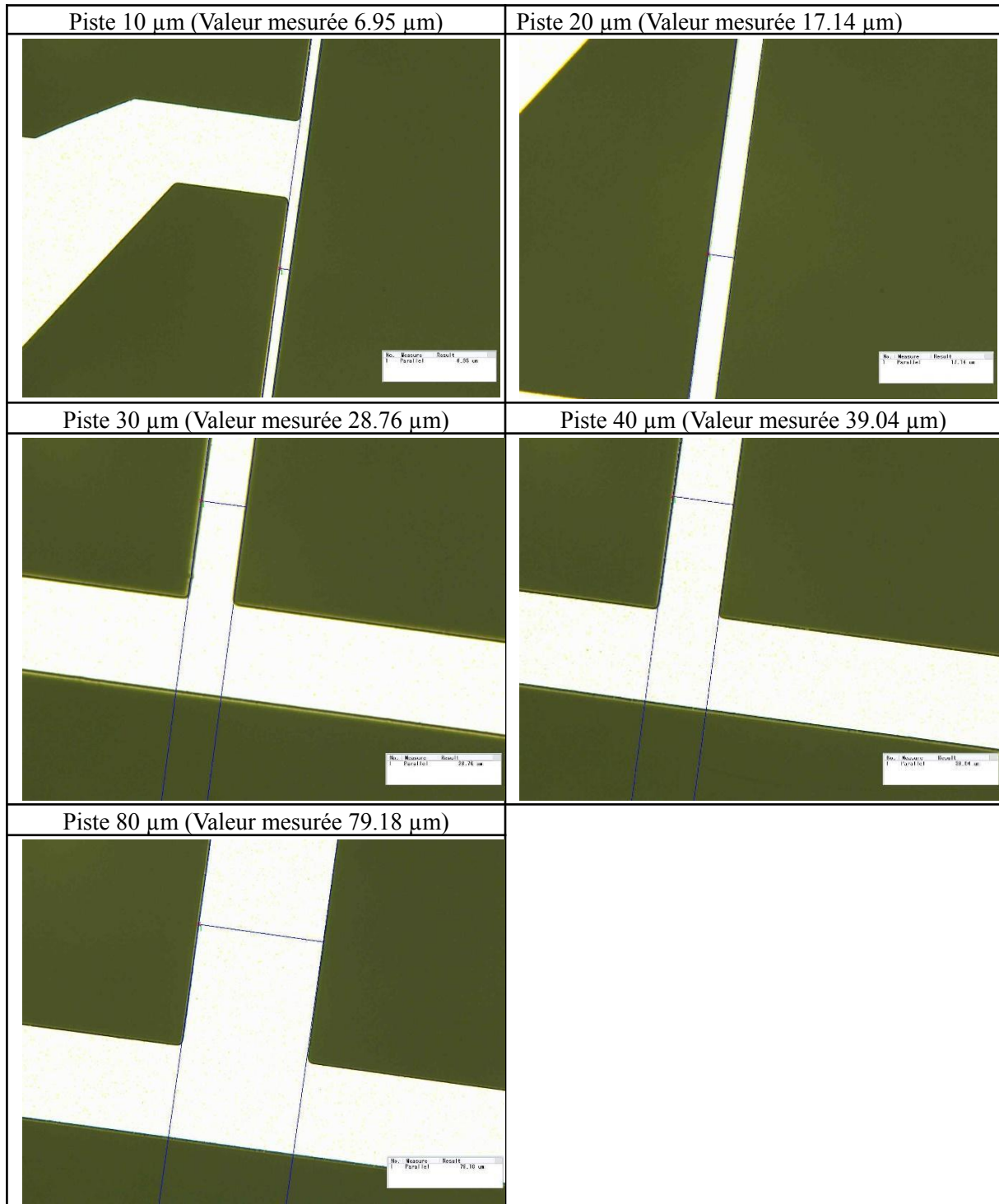
Nous trouvons une valeur moyenne  $R_s = 48.29[m\Omega]$  que nous allons utiliser dans la suite des calculs.

En s'aidant de la valeur  $R_s$  et des pentes des courbes  $R = f(L)$  obtenues avant, nous pouvons calculer la largeur réelle de chaque piste mesurée en utilisant la relation suivante :

$$R = R_s \times \frac{L}{W} = p_w \times L \Rightarrow W = \frac{R_s}{p_w}$$

$W_{th}$ [μm]	10	20	30	40	80
$W_{elec}$ [μm]	5.37	15.39	23.93	33.52	71.73

En moyenne nous retrouvons une erreur absolue de valeur égale à 5  $\mu\text{m}$  entre les valeurs théoriques et électriques. Cette différence est prévisible et logique. Elle est due principalement au phénomène d'*overetch*. Nous avons gravé l'aluminium dans l'ANP pendant 8 minutes avec un taux de gravure de 300  $\text{nm}/\text{min}$  de l'aluminium de chaque côté, qui est égal à 2.4  $\mu\text{m}$  à la fin de la procédure. Ceci valide les mesures électriques prises.



$W_{elec} [\mu m]$	5.37	15.39	23.93	33.52	71.73
$W_{opt} [\mu m]$	6.95	17.14	28.76	39.04	79.18

Les valeurs optiques mesurées sont différentes des valeurs électriques avec une erreur moyenne de  $4.23\mu m$ . Cela ne nous permet pas de valider notre calcul. Nous soupçonnons que cela doit être dû à des erreurs de mesure avec le microscope, comme l'exposition du microscope et la hauteur de l'oculaire par rapport à la plaque, des valeurs qui ont été choisies de manière approximative selon la lisibilité de l'image sur l'écran. Il faut aussi prendre en considération l'erreur humaine en plaçant les bars de mesure le long des pistes à l'échelle du micromètres. On suppose donc les résultats électriques plus fiables que les résultats optiques. Nous sommes cependant satisfaits de nos résultats qui ne sont pas si loin des résultats désirés.

## 5. Conclusion

Ce TP nous a permis de comprendre pratiquement la réalisation de circuits intégrés à travers la gravure d'Aluminium, ainsi que ses caractéristiques électriques liées.

## V. Conclusion finale

Ces séances en salle blanche furent très enrichissantes et nous ont permis de mettre en pratique les connaissances vues précédemment dans le cours de Microfabrication. Nous avons appris les différents protocoles et règles à respecter dans une salle blanche, ce qui fût fort intéressant. Elles nous ont donné une perspective nouvelle sur le monde de la microtechnique, ainsi que les étapes et protocoles nécessaires pour réaliser des composants importants dans ce domaine à l'instar des MEMs et autres circuits intégrés.

Nous tenons à remercier Monsieur Abdeljalil Sayah et notre assistant Yang Zhiwei qui nous ont aidé au fil de ces TPs.

## VI. Références et annexes

[1]

“Süss MJB4.” *EPFL*

<https://www.epfl.ch/research/facilities/cmi/equipment/photolithography/suss-mjb4/>

[2]

“MIF Developers.” *MicroChemicals*

[https://www.microchemicals.com/products/developers/azr\\_326\\_mif\\_developer](https://www.microchemicals.com/products/developers/azr_326_mif_developer)

[3]

Fred E. Lytle. *An Introduction to Diffraction ... - Journals.sagepub.com.*

<https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1366/0003702991947117>

[4]

“ATMsse OPTIspin SB20 User Manual.” *EPFL*

[https://www.epfl.ch/research/facilities/cmi/wp-content/uploads/2020/04/ATMsse\\_SB20\\_std\\_manual.pdf](https://www.epfl.ch/research/facilities/cmi/wp-content/uploads/2020/04/ATMsse_SB20_std_manual.pdf)

[5]

“Center of Micronanotechnology.” *EPFL*

<https://www.epfl.ch/research/facilities/cmi/>

[6]

“HMDS.” *EPFL*

<https://www.epfl.ch/research/facilities/cmi/process/photolithography/hmds-application/>

**Projet :** TP Micro332(a) - Photolithography

**Student :**

**Group:** 27

**Date :**

1						
WAFER PREPARATION						
1,1	Stock out "litho" wafers	ID: 37342 Si wafer - orientation <100>				
1,2	Stock out "align" wafers	ID: 61871 Si wafer with a 200 nm SiO2 layer - orientation <100>				
1,3	Stock out "Al/Glass" wafers	Glass wafer with an 800 nm Al layer				
Step	Description	Equipement	Program / Parameters	Target	Actual	Remarks
2						
PHOTOLITHOGRAPHY: "LITHO"						
	Check machines	Z13/SSE coater		100mm chuck in position		
		Z13/SSE hotplate		100°C		
		Z13/MJB4		Lamp on		
2,1	HMDS priming	ATM sse HMDS unit	135°, 150 mbar, 5min, HDMS standard	Wafer silicon		Wettability test
2,2	AZ1512HS coating	ATM sse coater	5s at 500 rpm 45s at 3000 rpm			
2,3	AZ1512HS softbake	SSE prazitherm hotplate PTZ	50s at 100°			
2,4	AZ1512HS relaxation time		4 min	Humidity absorption		
2,5	AZ1512HS expose	Suss MJB4	$I = 20 \text{ mW/cm}^2$ $\lambda = 365 \text{ nm}$	Expose the wafer		Different exposure times to evaluate different thicknesses
2,6	AZ1512HS develop	AZ726MIF	45 s in the developer	Remove the photoresist in the non-protected areas		The wafer is supported by a spider
2,7	Water cleaning	Deionized water	1 min in DI water			
2,8	Inspection					
3						
MEASUREMENTS: "LITHO"						
3,1	AZ1512HS Thickness	FilMetrics Reflectometer				

Step N°	Description	Equipement	Program / Parameters	Target	Actual	Remarks
<b>ETCHING</b>						
4,1	Wear protection	Z14/acid bench				
4,2	Prepare hot plate + sensor + magnetic stirrer to reach 35°C	Z14/acid bench	APN			to do in advance to reach temp.
4,3	Etching	Z14/acid bench	select the etching time between 8 and 14 min	Remove Al		etching rate: 300nm/min structures still not completely open
4,4	water cleaning	Z14/				
<b>RESIST STRIPPING</b>						
5,1	Resist stripping	Z12/solvent bench	use SVC14			1 min
5,2	Rinse	Z12/solvent bench	rinse with DI water and dry	Clean the wafer		