



Qualification de procédés de photolithographie de résines de 1 μm à 500 μm d'épaisseur. Développement d'un procédé "Correction Optique de Proximité" utilisé pour la technique de photolithographie

Florian Lecoutre

► To cite this version:

Florian Lecoutre. Qualification de procédés de photolithographie de résines de 1 μm à 500 μm d'épaisseur. Développement d'un procédé "Correction Optique de Proximité" utilisé pour la technique de photolithographie. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. 2015. <hal-01911232>

HAL Id: hal-01911232

<https://laas.hal.science/hal-01911232v1>

Submitted on 2 Nov 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

RAPPORT DE STAGE

DUT Mesures Physiques

Florian LECOUTRE

2014/2015

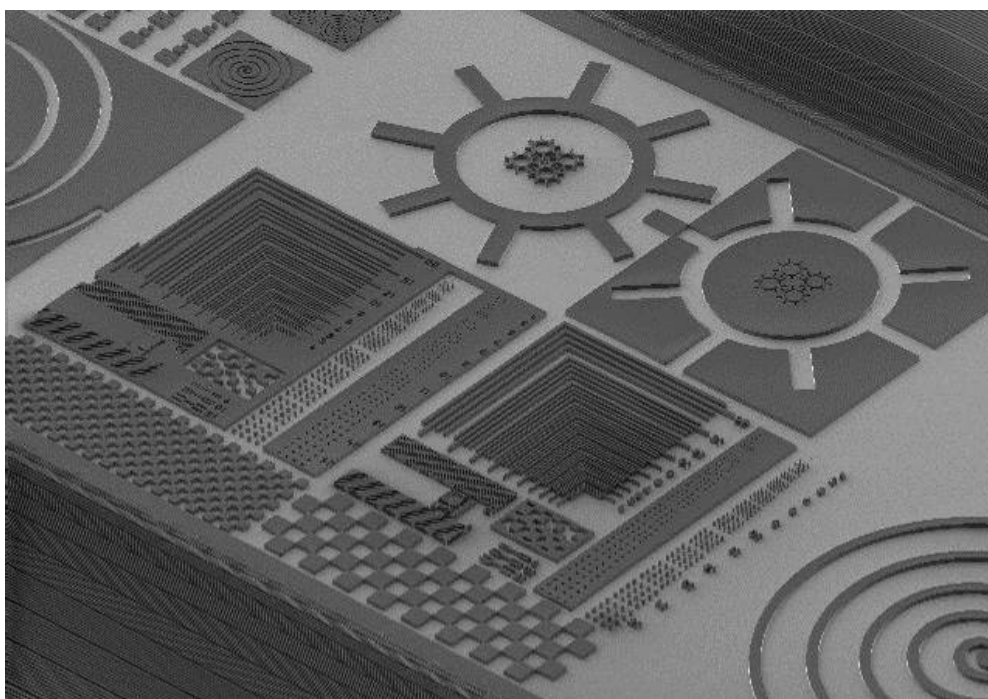


Figure 1 : Observation au Microscope Electronique à Balayage (MEB) de motifs de résine

Qualification de procédés de photolithographie de résines de 1 μm à 500 μm d'épaisseur.
Développement d'un procédé « Correction Optique de Proximité » utilisé pour la technique
de photolithographie.

Table des matières

Résumé/Abstract	
Remerciements	
Introduction.....	1
1. Présentation générale	
1.1 Le LAAS-CNRS	
1.2 Le service TEAM	
2. La photolithographie : objectif et étapes de réalisation	
2.1 Nettoyage du substrat et promoteur d'adhérence	
2.2 Enduction de résine	
2.3 Pré-recuit	
2.4 Insolation UV	
2.5 Recuit après exposition (PEB)	
2.6 Révélation (ou développement)	
2.7 Contrôles	
2.8 Application	
3. Qualification de procédés	
3.1 Réalisation des procédés existants	
3.2 Caractérisation des procédés	
3.3 Elaboration des rapports de qualification de procédés	
3.4 Correction des divergences	
4. Corrections Optiques de Proximité (OPC)	
4.1 Simulations à l'aide du logiciel GenISys LAB®	
4.2 Réalisation des plaquettes test	
5. Résultats	
5.1 Qualification de procédés	
5.2 Corrections Optiques de Proximité	
5.3 Applications de ces travaux	
6. Conclusion	
7. Lexique	
8. Bibliographie	
9. Annexes	

Résumé/Abstract

Résumé

J'ai effectué mon stage de fin d'études au laboratoire du LAAS-CNRS. Ma première mission a consisté à fiabiliser et améliorer des procédés de photolithographie, en ajustant les erreurs au niveau des épaisseurs de résines photosensibles. Pour y parvenir, il m'a fallu réaliser les procédés pour cerner les résines concernées, ajuster leurs vitesses d'enduction et enfin caractériser les résultats. Les épaisseurs de 3 types de résines ont été réajustées à moins de 5 % d'erreur de leurs valeurs théoriques.

Mon deuxième objectif était de réduire les erreurs de déformation, sur les dimensions et les formes, de motifs micrométriques. Ces erreurs sont liées à la diffraction du rayonnement UV utilisé au travers d'un masque lors du procédé de photolithographie. L'amélioration s'est faite par l'ajout de Corrections Optiques de Proximité qui, par une déformation spécifique des motifs originaux sur le masque, a permis de contrer les effets de la diffraction. Ces tests ont été réalisés par simulation sur le logiciel GenISys LAB®, et expérimentalement sur des équipements de photolithographie. Des Corrections Optiques de Proximité de 0,2 μm à 0,4 μm de côté, et distants de -0,075 μm à 0 μm du motif, ont permis de limiter les déformations.

Abstract

In this paper, my internship at the LAAS-CNRS research laboratory is described. Firstly, I was required to enhance photolithography process reliability, by correcting light sensitive photoresists thicknesses errors. To now which resists were concerned, I had to do the process, corrections where then made by increasing or decreasing the spin speed during the resist coating. Characterization was finally done to know final resists thicknesses. As a result, 3 resists thicknesses were corrected and are now less than 5 % different from theoretical values.

Secondly, I was asked to reduce the deformation on sizes and shapes of micrometric patterns. These errors result from UV light diffraction. UV rays are used to expose photoresists trough a mask during the photolithography process. Corrections were done by adding Optical Proximity Corrections to the original patterns, which compensate light diffraction. Tests were done by simulating process with the GenISys LAB® software, and by doing process on photolithography equipment. Therefore, Optical Proximity Corrections from 0,2 μm to 0,4 μm sizes, and distant from -0,075 μm to 0 μm away from the original patterns successfully reduced deformations.

Mots clés :

Key words :

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier le directeur du LAAS-CNRS, Jean ARLAT, et le responsable du service TEAM, Hugues GRANIER, de m'avoir accueilli pour mon stage de fin d'études.

Je remercie également mon maître de stage, Laurent MAZENQ, pour m'avoir accordé sa confiance et attribué des missions valorisantes, ainsi que pour l'aide qu'il m'a apporté. Je remercie Adrian LABORDE, Rémi COURSON et Aurélie LECESTRE de m'avoir aidé et conseillé dans l'accomplissement de mes missions.

Je tiens aussi à remercier toutes les personnes en salle blanche qui ont su répondre à mes questions et me faire découvrir leur environnement de travail.

Enfin je remercie mon enseignant tuteur, Jean-Philippe GASTELLU-ETCHEGORRY, ainsi que l'ensemble de l'équipe pédagogique du département Mesures Physiques pour leurs enseignements et leur aide dans le bon déroulement du stage.

Introduction

La microélectronique est l'étude et la fabrication de composants à des échelles de l'ordre du micromètre aux nanomètres.

Ces « microsystèmes » étaient historiquement fabriqués pour des applications électroniques. Les nouvelles techniques de fabrication ont permis l'émergence de ces composants dans d'autres domaines tels que les capteurs, l'optique, les hyperfréquences, la médecine et la biologie.

Les premières avancées dans le domaine de la microélectronique ont eu lieu dans les années 1940 à 1960 avec notamment la création du premier ordinateur. Les progrès technologiques sur les matériaux et les équipements ont permis un abaissement des coûts de production et sont devenus le moteur de la miniaturisation des composants. Le résultat est un gain d'espace et de matière. Ceci a permis d'améliorer de manière significative les performances des microcomposants tout en diminuant l'énergie consommée.

En 1969, le scientifique et cofondateur d'Intel, Gordon Earle Moore, émet l'hypothèse prédisant un doublement du nombre de transistors par puce tous les 18 mois à prix constant. Cette hypothèse appelée Loi de Moore est toujours vérifiée à ce jour.

L'une des techniques utilisée en micro fabrication consiste à structurer un matériau grâce à l'utilisation d'une résine photosensible exposée à un rayonnement Ultraviolet au travers d'un masque. La résine permet de protéger certaines parties du matériau pour le structurer, cette étape essentielle est la photolithographie.

Il existe différentes sortes de résines photosensibles selon l'épaisseur désirée sur le matériau et l'emploi qui en est fait. La résine est généralement utilisée comme protection temporaire mais peut parfois être intégrée de manière définitive au matériau. Durant mon stage au LAAS, j'ai travaillé sur 5 sortes de résines : l'ECI, l'AZ40XT, l'AZ4562, la NLOF et la SU8. Chacune d'entre elles est utilisée à des épaisseurs précises sur le matériau, couvrant dans mon cas une plage de 1.1 μm à 100 μm . L'épaisseur est un paramètre important pour le bon déroulement du procédé de fabrication, et des écarts entre les valeurs voulues et obtenues ont été constatés au LAAS. La tâche m'a donc été confiée d'identifier les résines concernées, de quantifier ces divergences et de les réduire au maximum.

D'autre part, nous avons observé sur ces procédés des erreurs sur les formes et les dimensions de motifs nano et micrométriques. C'est la seconde partie de mon stage qui a consisté à initier une méthodologie pour comprendre ces erreurs et les réduire afin que les motifs créés soient plus proches des formes et dimensions souhaitées. Pour remédier à ce problème, des méthodologies type OPC (Optical Proximity Correction) sont utilisées de façon conventionnelle dans l'industrie. Mon objectif principal est de définir quels OPC utiliser pour chaque résine et épaisseur.

1. Présentation générale

1.1 Le LAAS-CNRS

Le LAAS-CNRS (Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes) est un laboratoire de recherche du CNRS à Toulouse. Il a été créé par Jean Lagasse en 1968. Au départ centré sur l'automatique à des fins spatiales, le laboratoire a évolué vers trois nouvelles thématiques de recherche : l'informatique, la robotique et les micro-nano systèmes.

Le laboratoire bénéficie de nombreux partenariats avec des universités et entreprises. Le LAAS associe formation et recherche et compte plus de 600 salariés pour 22 groupes de recherche. Les applications concernent entre autres l'espace, l'aéronautique, les systèmes embarqués et la santé.



Figure 2 : Vue aérienne du LAAS-CNRS

Le LAAS disposait en 2012 d'un budget de 13 485 000 Euros (hors salaires), d'origines diverses (CNRS, industries, région, université, etc.).

Pour mener ses recherches autour des micro-nano systèmes, le laboratoire s'est doté en 2005 d'une nouvelle salle blanche. Cette salle blanche fait partie d'un réseau français de centrales technologiques, le réseau Renatech. Ce réseau regroupe 6 laboratoires en France disposant de salles blanches et d'équipements dédiés aux micro et nano sciences. Le but est de disposer de moyens technologiques de pointe et accessibles auprès de la communauté académique et privée.



Photo 3 : Logo du réseau Renatech

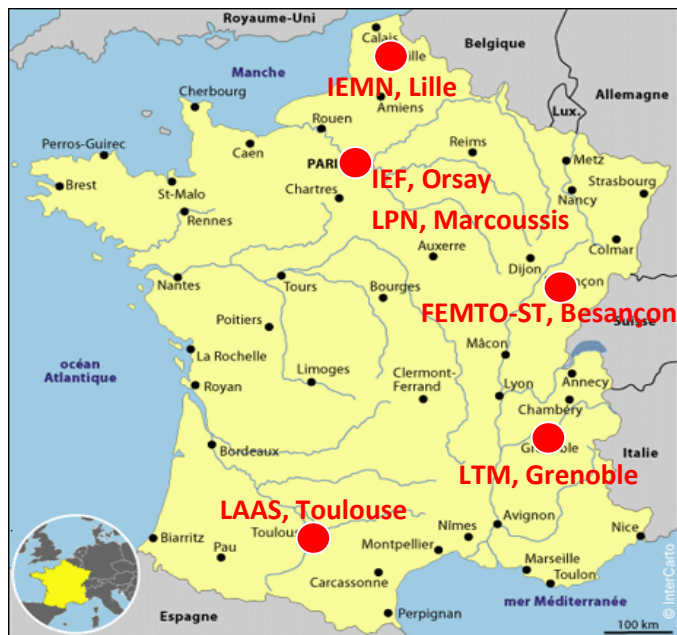


Figure 4 : Laboratoires membres du réseau Renatech

La salle blanche qui équipe le LAAS offre une superficie de 1600 m² et permet le développement, l'élaboration et la caractérisation des procédés dans un environnement où température, pression, hygrométrie, lumière et concentration particulaire sont contrôlés. La bonne gestion de ces paramètres permet notamment d'éviter la détérioration des objets et matériaux utilisés. Elle permet aussi de réaliser des procédés sensibles aux variations extérieures.

La salle blanche du LAAS est, suivant les zones, certifiée classe 10 000 ou classe 100 selon le « Federal Standard 209d ». La classe 100 concerne des procédés particulièrement sensibles à la pollution particulaire, comme la photolithographie.

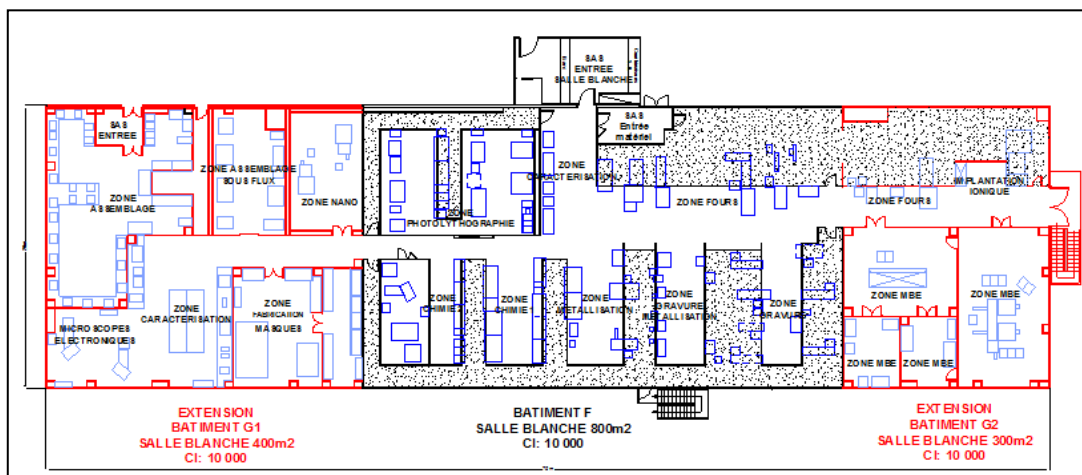


Figure 5 : Plan de la salle blanche du LAAS

- **Zone d'Épitaxie par Jets Moléculaires** : Dépôt de matériaux III/V sur substrats dans trois bâtis Riber, sous ultra-vide, permettant notamment la création de différentes sortes de lasers.
- **Zone de Lithographie Laser** : Utilisation d'un système optique d'écriture laser et de procédés chimiques pour fabriquer et contrôler des masques de photolithographie.
- **Zone Assemblage** : Réalisation des différentes étapes d'assemblage (découpe, montage sur support, connexions électriques, protection).
- **Zone de Photolithographie** : Mise en forme d'un matériau (résine photosensible) sur un substrat grâce à une exposition UV. La résine fait office de couche protectrice pour les étapes postérieures : gravure, dépôts de matériaux, implantation ionique, etc.
- **Zone Chimie** : Utilisation de produits d'attaque et de solvants pour réaliser des opérations de gravure de matériaux ou de nettoyage.
- **Zone Electrochimie** : Procédés de gravure chimique anisotrope du silicium et croissance électrolytique de métaux (transformation d'ions métalliques en dépôt).
- **Zone Dépôt sous vide** : Dépôt de couches de métaux par évaporation thermique ou pulvérisation cathodique.
- **Zone de Gravure par Plasma** : Ablation de matériaux par plasma, permettant de créer des motifs ou de faire du traitement de surface.
- **Zone Implantation Ionique** : Implantation d'ions dans un matériau de manière à réaliser un dopage de ce dernier ou un traitement de surface.
- **Zone Jet d'Encre** : Synthèse des encres destinés aux dépôts de nano particules sur des substrats silicium ou polymère.
- **Zone des Procédés Thermiques** : Croissance, dépôt et traitement de matériaux sur substrat grâce à des fours de recuit et à des réacteurs plasma.
- **Zone Lithographie Electronique** : Insolation de résines électro sensibles à l'aide d'un faisceau d'électrons pour structurer un matériau.
- **Zone Nano Impression** : Reproduction de motifs nanométriques par moulage dans le but de structurer un matériau.
- **Zone Caractérisation** : Validation de la qualité des procédés grâce à divers instruments d'observation et de mesure (MEB, microscope, profilomètre, ...).

1.2 Le service TEAM

Le service TEAM (Techniques et Equipements Appliqués à la Microélectronique) est en charge de la gestion de la salle blanche du LAAS. Il comprend 38 ingénieurs et techniciens.

Il assure la gestion organisationnelle, la maintenance des équipements, le développement des procédés ainsi que les formations des utilisateurs. Il participe également aux activités de recherche en coordonnant les projets sur le plan technique ou en les réalisant. De ce fait le personnel TEAM est source de conseils et de suggestions quant à la réalisation des procédés.

C'est dans ce service que j'ai effectué mon stage de fin d'étude dans le cadre du DUT Mesures Physiques.

2. La photolithographie : objectif et étapes de réalisation

La photolithographie est l'une des étapes permettant d'aboutir à la réalisation d'un composant (transistor, micro capteur, ...). Elle permet au final de définir la forme d'un matériau. Prenons l'exemple d'un transistor :

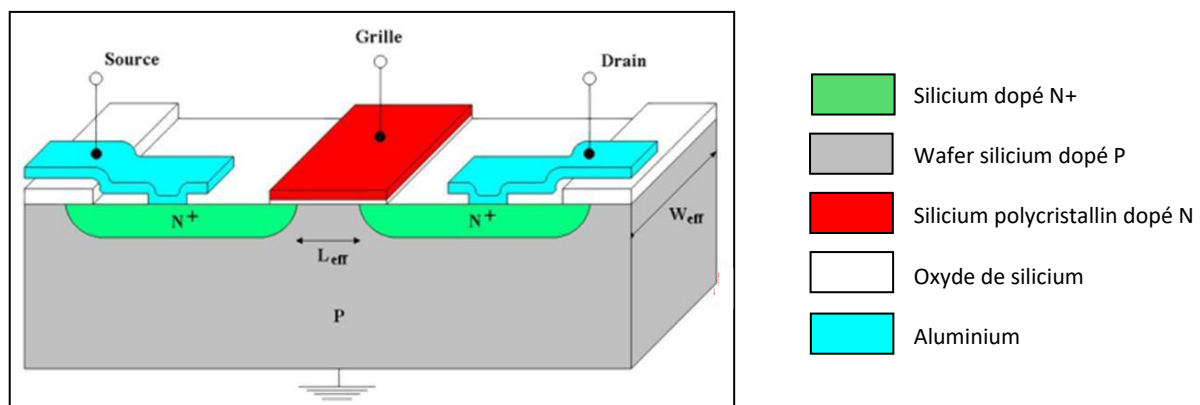


Figure 6 : Vue en coupe d'un transistor MOS

Ce composant est constitué de 4 différents matériaux empilés sous forme de couches minces. Pour le fabriquer, on procède par addition de couches avec pour chacune d'entre elles les 3 étapes suivantes :

- Dépôt – élaboration du matériau.
- Photolithographie pour définir la forme.
- Gravure pour attaquer le matériau.

On procède à ces 3 opérations de base pour chacune des couches, soit 12 étapes pour réaliser le transistor. C'est pourquoi l'étape de photolithographie est une étape clé dans le processus de fabrication des composants.

La base matérielle (appelé substrat ou wafer) de nombreux composants est constituée de silicium dopé positif (P) ou négatif (N), c'est-à-dire contenant une très faible quantité d'éléments différents du silicium qui vont soit créer une carence en électrons et donc l'apparition de « trous », soit un excès d'électrons. Ces techniques de dopage permettent d'augmenter la conductivité du matériau. C'est sur cette base que vont être déposées les couches, en commençant dans notre exemple avec l'oxyde de silicium en blanc, puis le silicium polycristallin et enfin l'aluminium.

Les différentes étapes du processus de photolithographie sont les suivantes :

2.1 Nettoyage du substrat et promoteur d'adhérence

Avant toute opération, il faut s'assurer que les surfaces du wafer soient débarrassées de toute contamination ou impureté, de façon à ne pas générer de défauts durant le procédé. La mise en condition du wafer peut être faite suivant deux techniques : par plasma O_2 ou bain chimique, appelé aussi bain Piranha.

La première consiste à placer le wafer sous vide et à le soumettre à un plasma d'oxygène qui, grâce aux réactions chimiques et au bombardement ionique, va permettre l'élimination des résidus et impuretés. Cette technique permet également de déshydrater le wafer, l'humidité étant une source importante de contamination.

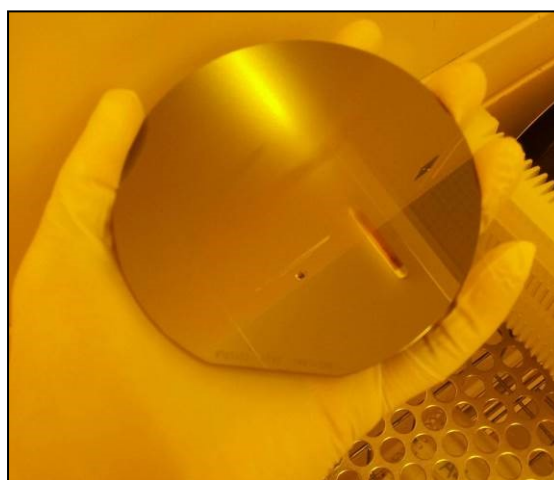


Figure 7 : Wafer/substrat en silicium

La seconde technique consiste à placer le wafer dans un mélange Piranha composé pour moitié d'eau oxygénée H_2O_2 et d'acide sulfurique H_2SO_4 . La réaction est fortement exothermique ($100^\circ C$) et produit du H_2SO_5 appelé « acide de Caro » qui va éliminer les impuretés. Suite à cela, le wafer est déshydraté sur une plaque chauffante (supérieure à $100^\circ C$).

Une fois le wafer en condition, on va appliquer à sa surface un promoteur d'adhérence HMDS (hexamethyldisilazane). L'HMDS va former des liaisons chimiques avec les résines polymères utilisées en photolithographie, et donc permettre une meilleure tenue de ces dernières sur le wafer. On peut aussi utiliser du BARC (Bottom Anti-Reflective Coating) qui va agir comme une couche antireflet en créant des interférences destructives, et donc éviter des polymérisations non désirées de la résine lors de l'insolation.

2.2 Enduction de résine

Suite à cela vient l'étape de l'enduction de résine. Cette dernière est déposée à l'aide d'une pipette sur le substrat de silicium préalablement déposée sur une tournette qui sera maintenu en place par vide. Une fois le dépôt effectué, on actionne la tournette dont la

rotation va permettre d'étaler la résine par centrifugation, de manière uniforme et à une épaisseur voulue sur l'ensemble du wafer. Cette méthode est celle du spin coating, il en existe deux autres : le spray coating ou slit coating qui consiste à enduire le substrat par projection au moyen de micro buses (technique très utilisée pour les grands substrats difficiles à faire tourner). La dernière est un mélange des deux méthodes précédentes : le slit/spin qui combine enduction par buses micrométriques et centrifugation.

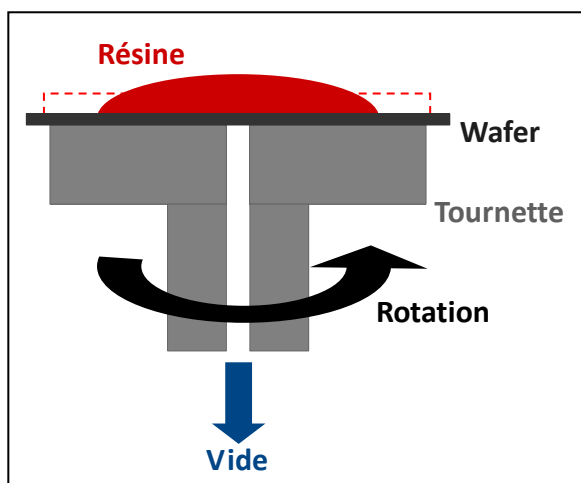


Figure 8 : Représentation schématique de l'enduction de résine (spin coating)



Figure 9 : Dépôt de résine

2.3 Pré-recuit

Le pré-recuit consiste à placer le wafer enduit de résine sur une plaque chauffante (environ 110°C) dans le but de faire s'évaporer une partie des solvants présents dans la résine, ainsi que les traces d'eau. Cette évaporation permet de durcir la résine qui ne sera plus collante, ce qui permettra de la mettre en contact avec le masque lors de l'insolation UV. Elle aura aussi des conséquences positives sur l'une des dernières étapes de la photolithographie, la révélation.

L'évaporation des solvants influe également sur l'épaisseur de la résine, entraînant une diminution de l'ordre de 10 % dont il faut tenir compte étant donné que l'on souhaite une épaisseur précise de résine à la fin du procédé.

Une fois l'enduction effectuée, on réalise un détournage qui consiste à enlever la résine sur le pourtour du wafer à l'aide d'acétone. Le but est d'obtenir la surface de résine la plus plane possible, car la force centrifuge crée la formation d'un bourrelet de résine sur le pourtour du wafer. L'épaisseur est donc plus importante sur les bords qu'au centre. Cette étape est importante, notamment pour les résines épaisses, car un défaut de planéité ne permettra pas au masque et à la résine d'être parfaitement en contact lors de l'étape ultérieure d'insolation. Cela engendrerait un phénomène de diffraction du rayonnement UV déformant de manière importante la structure voulue pour le matériau.

2.4 Insolation UV

L'insolation aux Ultraviolets est l'étape qui va permettre de retranscrire les motifs désirés dans la résine, permettant par la suite de structurer le matériau. Ces motifs sont dessinés sur un masque fait de quartz transparent et de chrome opaque dont les parties chromées vont arrêter les rayons UV, alors que les zones uniquement en quartz vont laisser passer ces rayonnements.

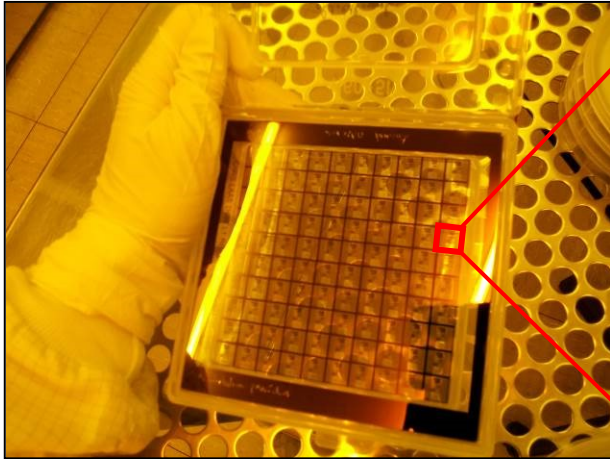


Figure 10 : Masque de photolithographie

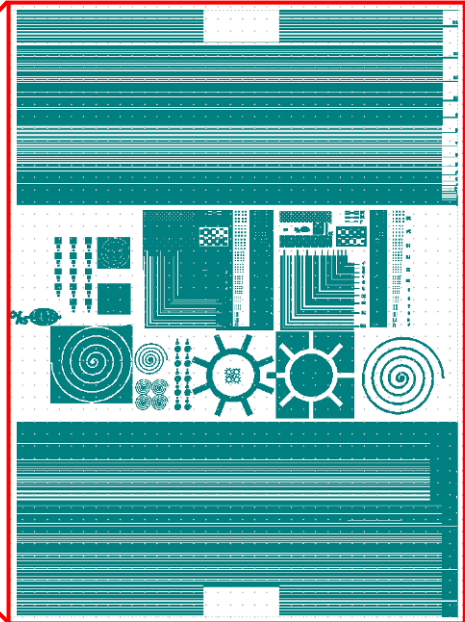


Figure 11 : Motif issu du masque pour insolation par contact

L'insolation UV peut être réalisée de trois manières différentes suivant la précision voulue :

- **Par contact** : le masque et la résine sont directement en contact l'un avec l'autre ce qui permet une bonne définition des motifs mais peut entraîner des détériorations du masque et de la résine, notamment lorsqu'on crée un vide entre les deux (vacuum contact).
- **Par proximité** : masque et résine ne sont plus en contact direct, il y a un écart entre les deux, ce qui permet de préserver l'intégrité de ces éléments mais entraîne une baisse de résolution due à la diffraction engendrée par ce gap.
- **Par projection** : On augmente l'écart précédent et on place une lentille optique convergente entre le masque et la résine, ce qui permet de focaliser les rayons UV en un point précis, et donc d'obtenir une résolution meilleure qu'avec les deux autres techniques tout en évitant les frottements entre les composants. Cette technique permet également de réduire la taille des motifs que l'on retranscrit du masque sur la résine, facilitant en amont la fabrication du masque.

Prenons l'exemple d'une insolation par contact :

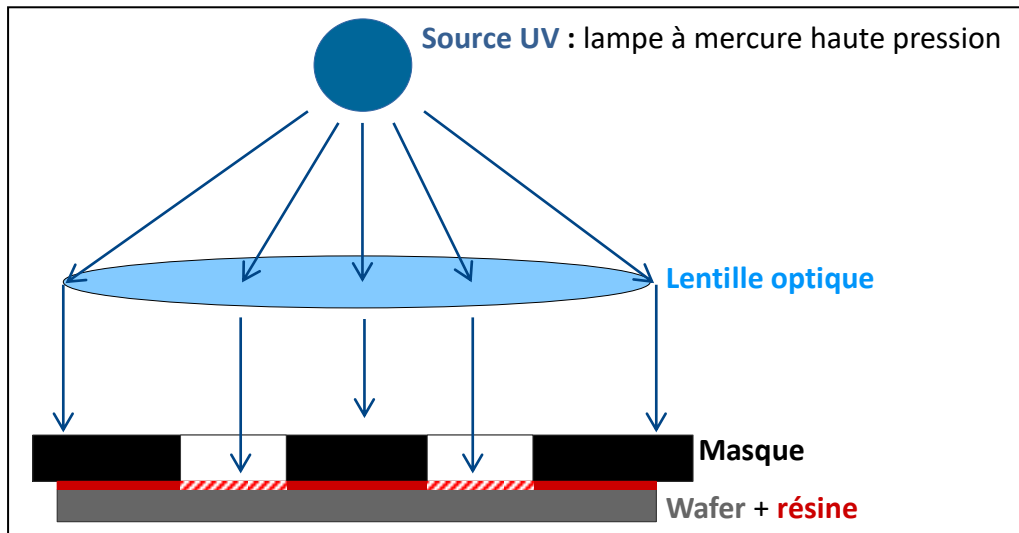


Figure 12 : Représentation schématique d'une insolation UV par contact

On observe que les rayons UV arrivant sur la partie foncée (chrome) sont arrêtés, les autres passent au travers du masque et insolent la résine. Pour la plupart des procédés multi matériaux, il est nécessaire de préalablement aligner le masque et le substrat afin que les motifs soient situés à l'endroit voulu. Cet alignement se fait par rotation et translation du masque dans les trois plans de l'espace et grâce à des marquages d'alignement présents sur le masque.

La bande spectrale des UV se situe entre environ 100 nm et 450 nm. La source UV est généralement constituée d'une lampe à vapeur de mercure dont les pics de forte intensité dans cette partie du spectre sont au nombre de trois :

- Le pic à 365 nm (I-line)
- Le pic à 405 nm (H-line)
- Le pic à 436 nm (G-line)

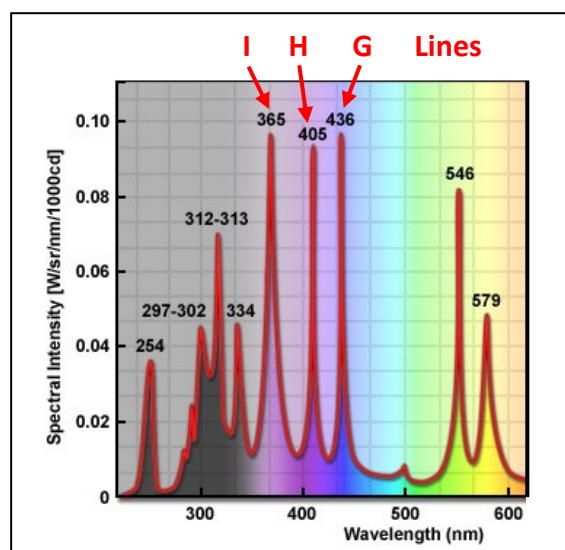


Figure 13 : Partie du spectre d'émission d'une lampe à vapeur de mercure

Les résines sont plus ou moins sensibles à certaines longueurs d'onde, les résines négatives réagiront mieux sous une exposition à 365 nm, contre 405 nm pour les positives. La sélection de la longueur d'onde désirée se fait au moyen de filtres avant insolation. En règle générale, plus la longueur d'onde est faible, plus la résolution des motifs obtenus est élevée.

2.5 Recuit après exposition (PEB)

Le PEB (Post Exposure Bake) s'effectue, tout comme le pré-recuit, sur une plaque chauffante à environ 110 °C. Il permet d'évaporer les restes de solvants, d'éliminer la photosensibilité de la résine, de catalyser et participer à la photo réaction initiée avec l'insolation, mais aussi de durcir la résine la rendant ainsi plus adhérente au wafer.

2.6 Révélation (ou développement)

La révélation constitue la dernière étape de réalisation en photolithographie, elle permet :

- De dissoudre la résine exposée aux UV dans le cas d'une résine positive.
Pour se faire, on plonge la plaquette (wafer + résine) dans un bain chimique alcalin, on peut aussi projeter le révélateur par spray. La partie de la résine qui a été exposée aux UV va devenir soluble et partir.
- De dissoudre la résine non exposée dans le cas d'une résine négative.
Dans ce cas, on plonge la plaquette dans un bain organique. L'effet est ici contraire car la résine qui a été exposée aux UV va devenir insoluble et rester sur la plaquette, c'est la résine qui n'a pas été insolée qui va partir.

Nous allons distinguer les deux cas suite à l'exemple d'insolation réalisé en partie 2.4 :

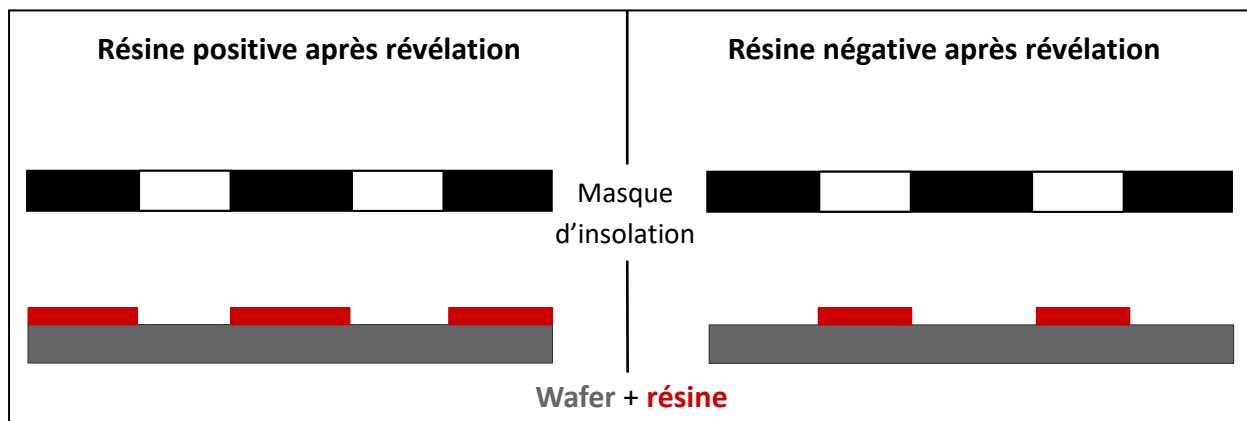


Figure 14 : Représentations schématiques de plaquettes après révélation

2.7 Contrôles

Suite à cela il faut caractériser cette plaquette afin de s'assurer de la bonne qualité du résultat.

Il faut contrôler :

- La résolution (ligne de résine la plus fine obtenue dans un réseau périodique de lignes) au microscope optique.
- L'épaisseur de résine au profilomètre mécanique.
- Le profil des côtes au Microscope Electronique à Balayage (MEB).

2.8 Application

La résine restante forme une couche protectrice pour le matériau se trouvant en dessous pour les étapes ultérieures à la photolithographie, notamment celle de gravure qui consiste à attaquer un matériau.

Par exemple, on souhaite créer des structures en aluminium. On va déposer une couche d'aluminium sur l'ensemble du wafer, puis réaliser la technique de photolithographie décrite précédemment. Suite à cela on va pouvoir graver l'aluminium à l'endroit où la résine a été dissoute et enfin éliminer la résine protectrice.

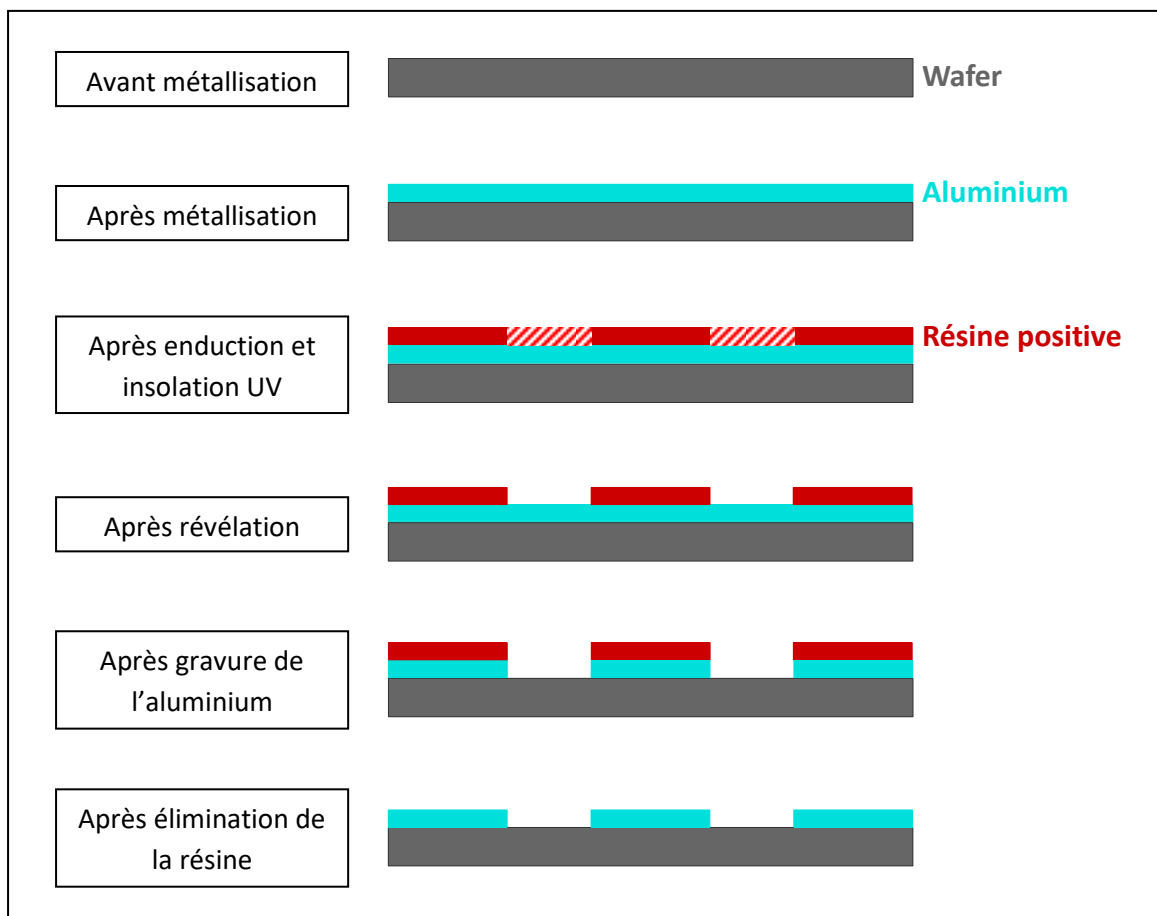


Figure 15 : Représentation schématique d'une structuration d'aluminium par photolithographie et gravure

3. Qualification de procédés

Différents types de résines sont utilisées au LAAS-CNRS, parmi elles l'ECI, l'AZ40XT et l'AZ4562 sont positives, les résines NLOF et SU8 sont quant à elles négatives. J'ai travaillé sur ces résines car ce sont les plus utilisées au LAAS (66 % des procédés). Le choix de la résine se fait principalement en fonction de l'épaisseur désirée : l'ECI sera par exemple utilisée pour de faibles épaisseurs de 1.1 μm et 2.6 μm , la SU8 pouvant quant à elle atteindre des épaisseurs de 100 μm et 500 μm . Ce paramètre est très important car il va influencer sur la résolution finale des motifs. Il joue également un rôle important lors d'une gravure car une partie de la résine protectrice est gravée pendant l'opération et une épaisseur trop faible pourrait entraîner la disparition de cette protection et conduire à la gravure d'un matériau qui ne devait pas l'être.

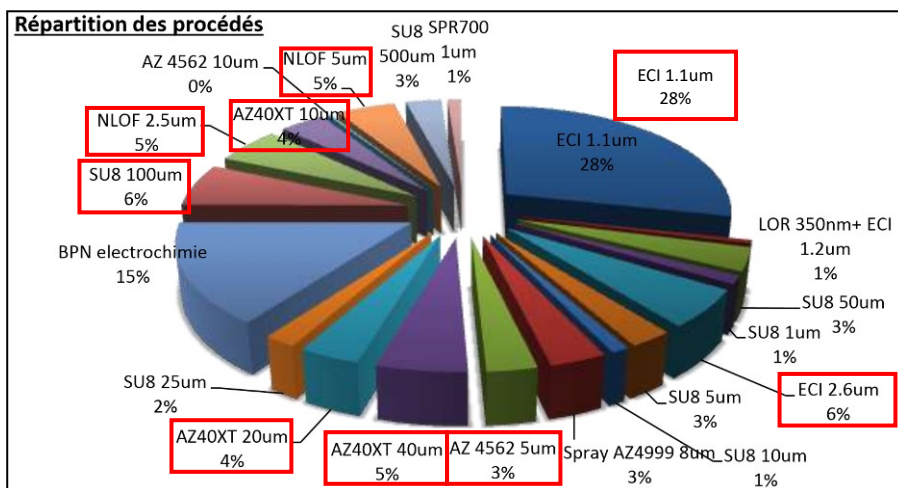


Figure 16 : Répartition de la consommation des résines pour l'année 2014

Un autre paramètre important est le profil (en degrés) des motifs, qui doit être proche de 90°. Le profil d'un motif en résine va influencer sur la forme finale du matériau, notamment là encore, dans le cas d'une gravure. Reprenons l'exemple de la gravure d'aluminium (cf. figure 15) :





Après révélation		
Après gravure et élimination de la résine		

Figure 17 : Effets de profils corrects (à gauche) et évasés (à droite) sur une gravure d'aluminium

Ces paramètres sont primordiaux. Ils sont vérifiés tous les mois afin de garantir le plus haut niveau de précision, aussi bien pour l'étape de photolithographie que pour les étapes en aval. C'est suite à ces vérifications que des dérives ont été observées entre les valeurs théoriques et expérimentales, d'où la nécessité d'une qualification de procédés.

3.1 Réalisation des procédés existants

Afin de cerner les résines, ainsi que les valeurs d'épaisseurs concernées par ces dérives, il a fallu réaliser les différents procédés avec l'ensemble des paramètres tels qu'ils étaient sur les modes opératoires à disposition des utilisateurs. Ils reprennent toutes les étapes du processus de photolithographie avec, pour chaque type de résine et pour chaque épaisseur, ses spécificités.

On distingue deux parties sur ces modes opératoires :

- La partie gauche consacrée à la réalisation du procédé à l'aide des équipements manuels.
- La partie de droite consacrée à l'utilisation des équipements automatiques.

La qualification concerne les deux façons de procéder, il a donc fallu faire deux fois chaque opération de photolithographie en utilisant les équipements adaptés. Le paramètre permettant de définir l'épaisseur finale de la résine est la vitesse de rotation du wafer. Plus la vitesse est élevée, moins l'épaisseur finale sera importante, comme le montre la formule suivante :

$$e = \frac{kp^2}{\sqrt{v}}$$

e : épaisseur de la résine (μm)

k : constante de la tournette

p : viscosité (cP)

v : vitesse de rotation (tr/mn)

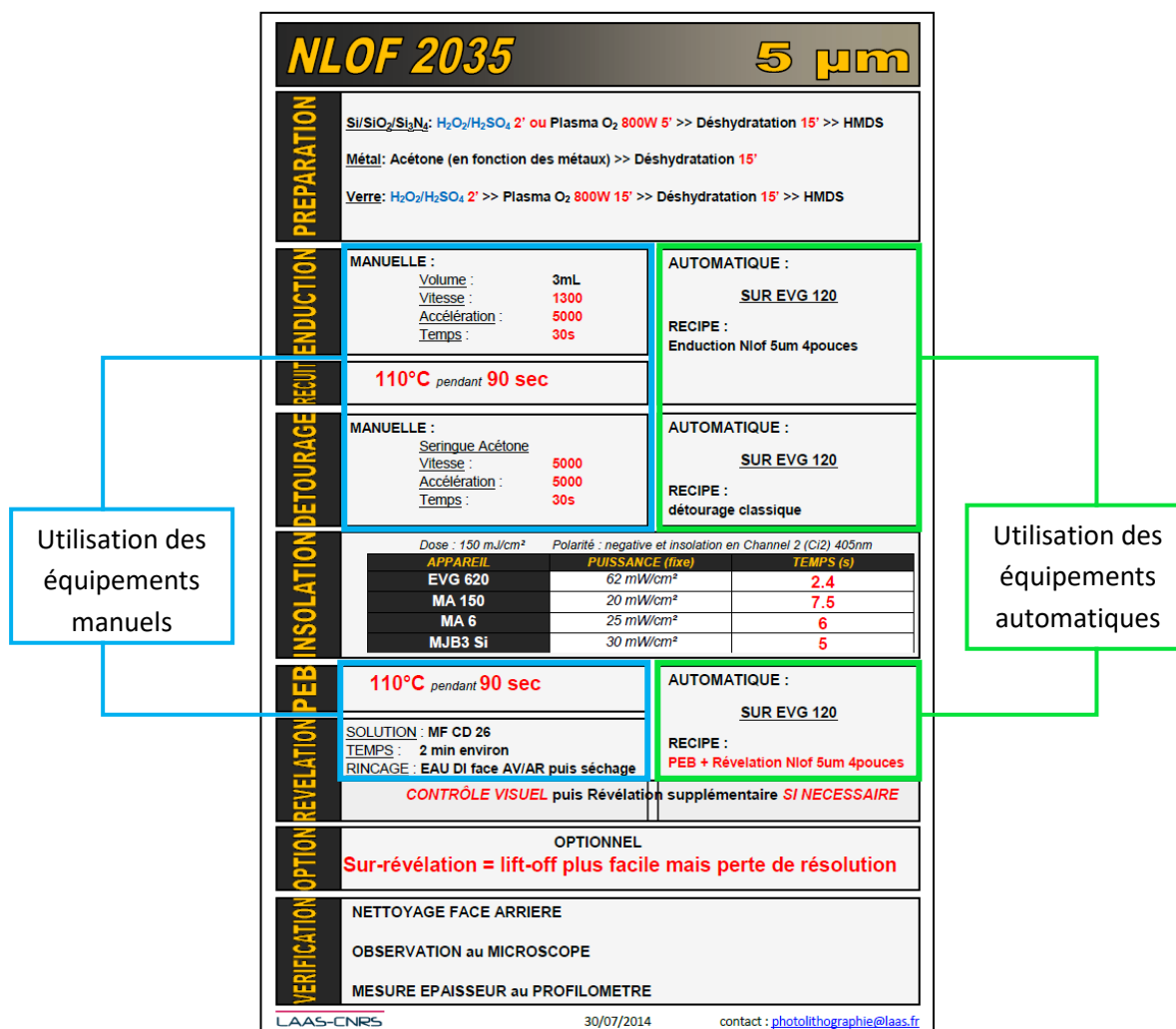


Figure 18 : Mode opératoire d'un procédé de photolithographie pour une résine NLOF de 5 µm d'épaisseur

Concernant l'enduction de la résine, la méthode manuelle consiste à utiliser une tournette de type Gyrset SUSS MICROTEC, la dépose de la résine sur le wafer se fait à l'aide d'une pipette. Les paramètres tels que la vitesse, l'accélération et le temps de rotation sont rentrés manuellement sur le panneau de contrôle de la tournette.

La méthode automatique est quant à elle, réalisée sur l'EVG-120, un équipement constitué d'un bras robotisé permettant la manipulation automatique du substrat. On charge une « recette » créée en amont, qui peut être modifiée par la suite et qui contient l'ensemble des paramètres liés à l'opération. Cette machine comprend les divers équipements nécessaires à la photolithographie (plaques chauffantes, bol d'enduction de résine, bol de révélation de résine), ainsi que les résines les plus utilisées, stockées en seringues ou en bidon. Le dépôt de résine se fait selon la méthode du spin coating aussi bien pour l'enduction manuelle qu'automatique.

L'étape d'insolation peut se faire de trois manières différentes (cf. 2.4). J'ai pour ma part réalisé les qualifications de procédés par contact et pas projection. Le LAAS est équipé de trois équipements d'insolation UV en service, deux permettant l'exposition par contact et une dédiée à la projection :

- **La SUSS MA6 et la SUSS MA150** permettent une exposition par contact. Il existe différents types de contacts (soft, hard, low vacuum, vacuum), j'ai pour ma part utilisé de manière systématique le mode vacuum contact qui crée un vide entre le masque et la résine. Cela permet de diminuer les effets de diffraction et de ne pas trop endommager masque et résine, contrairement au hard contact. On peut constater sur le mode opératoire (figure 15) que suivant l'équipement (MA6 ou MA150), la puissance et le temps d'insolation varient. Ce changement est dû à la différence de puissance des lampes à vapeur de mercure : 1000 W pour la MA6 et 350 W pour la MA150.
- **Le Stepper Canon** permet une exposition par projection. Lors d'une insolation sur ce type d'équipement, deux paramètres influent sur la forme des motifs : la dose d'exposition UV qui correspond à l'énergie délivrée par unité d'aire (J/m^2), et le focus qui détermine le déplacement (μm) de la lentille par rapport à la résine. Pour les qualifications de procédés, j'ai réglé le Stepper avec les paramètres de dose et de focus connus comme étant les plus adaptés pour chaque résine et épaisseur. Pour une insolation sur un type de résine donné avec une épaisseur donnée, la dose ainsi que le focus étaient constants.

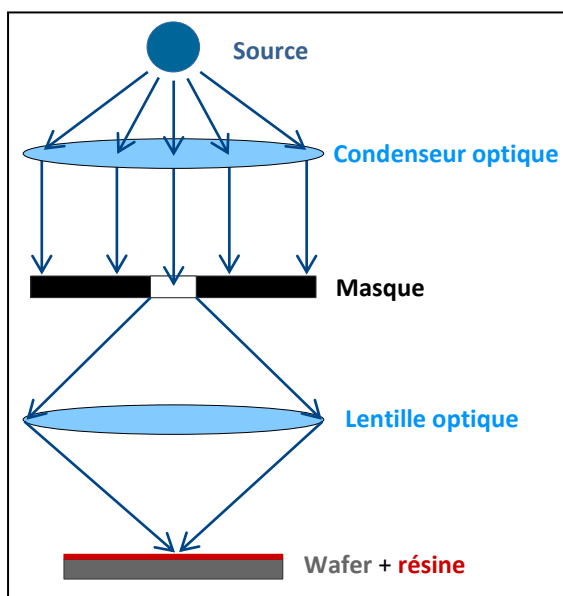


Figure 19 : Représentation schématique d'une insolation par projection

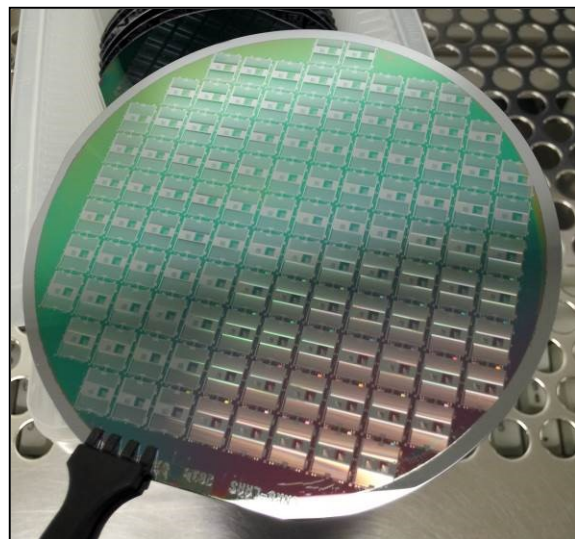


Figure 20 : Plaquette après photolithographie

Lors de la réalisation des procédés, je me suis concentré sur les résines et les épaisseurs les plus utilisées :

Type de résine	Epaisseur théorique	Type d'enduction	Type d'insolation
ECI 3012	1,1 μm	Automatique	Contact (MA150)
ECI 3012	1,1 μm	Automatique	Projection (Stepper)
ECI 3012	2,6 μm	Automatique	Contact (MA150)
NLOF 2035	2,5 μm	Manuelle	Contact (MA150)
NLOF 2035	5 μm	Manuelle	Contact (MA150)
AZ40XT	13 μm	Automatique	Contact (MA150)
AZ40XT	20 μm	Automatique	Contact (MA150)
AZ40XT	40 μm	Automatique	Contact (MA6)
SU8 3050	100 μm	Manuelle	Contact (MA6)

Figure 21 : Tableau récapitulatif des procédés réalisés sans modification des paramètres

3.2 Caractérisation des procédés

A la fin de chaque procédé de photolithographie, il fallait caractériser les plaquettes obtenues afin de connaître :

- La résolution.
- L'épaisseur réelle de résine.
- Le profil des motifs.

La résolution est la ligne de résine la plus fine obtenue dans un réseau périodique de lignes.

La première étape consiste à observer la plaquette au microscope optique LECIA afin d'observer la résolution obtenue. Le masque référence utilisé contient des motifs de 20 μm à 0,2 μm . Les résultats après photolithographie pour une résine ECI 1,1 μm d'épaisseur insolée au Stepper sont les suivants (les valeurs sont exprimées en μm) :

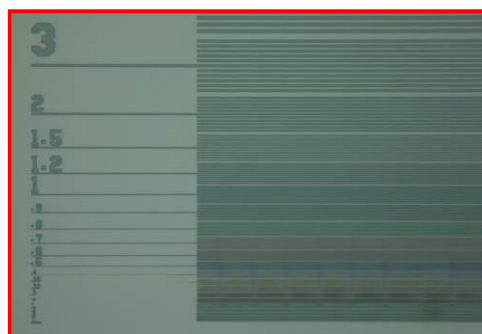


Figure 22 : Motifs de résolution



Figure 22 : Motifs de résolution

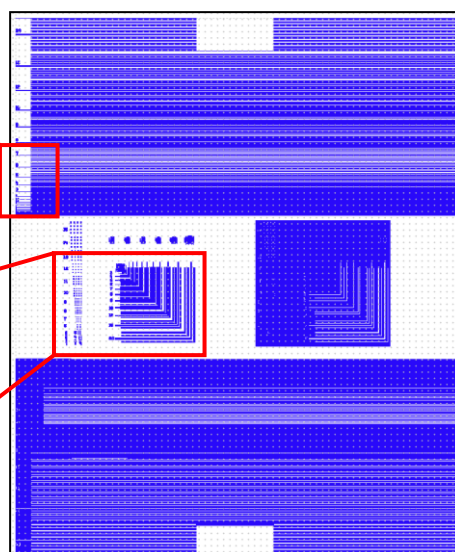


Figure 23 : Motifs issus du masque pour insolation par projection

L'étape suivante consiste à mesurer l'épaisseur de résine sur le wafer à l'aide d'un profilomètre mécanique TENCOR. La mesure se fait grâce à une pointe très fine en diamant se déplaçant sur une marche de résine.

En voici l'exemple pour une résine AZ40XT d'épaisseur théorique 20 μm :

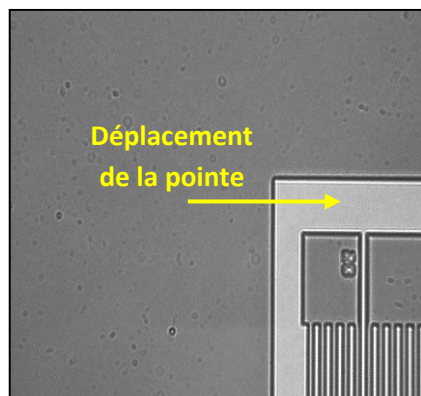


Figure 24 : Marche de résine (vue de dessus)

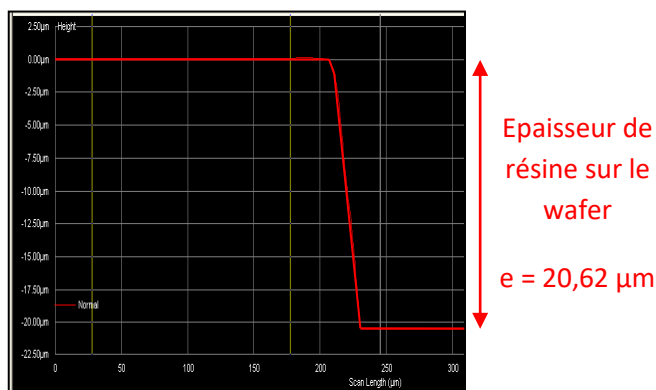


Figure 25: Tracé de la mesure

Enfin, la dernière étape de caractérisation est l'observation et la mesure des motifs et profils au Microscope Electronique à Balayage (MEB) HITACHI S-4800. Dans une enceinte sous vide, un faisceau d'électron est envoyé sur la plaquette à caractériser. L'interaction entre le faisceau et la matière entraîne l'émission d'électrons secondaires captés par des détecteurs. A chaque point d'impact correspond un signal électrique. L'image finale est issue de la cartographie des électrons secondaires.

Les mesures suivantes ont été faites sur la même plaquette que précédemment :

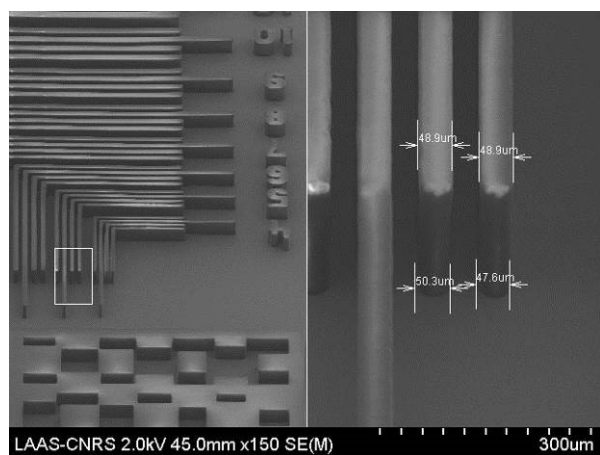


Figure 26 : Mesure des côtes

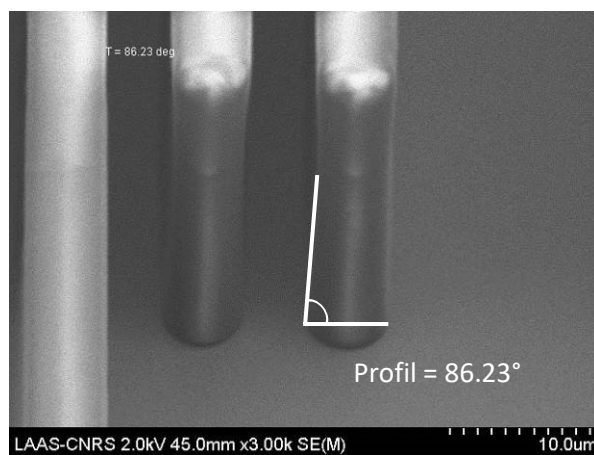


Figure 27 : Mesure du profil

3.3 Elaboration des rapports de qualification de procédés

Une fois les procédés réalisés et contrôlés, il faut regrouper l'ensemble des informations sur ces opérations sur un même document. Le but est en premier lieu d'identifier les résines concernées par des défauts d'épaisseur de l'ordre de $\pm 5\%$ par rapport à la valeur théorique.

En voici l'exemple pour une résine NLOF 2035 de 5 μm d'épaisseur théorique :

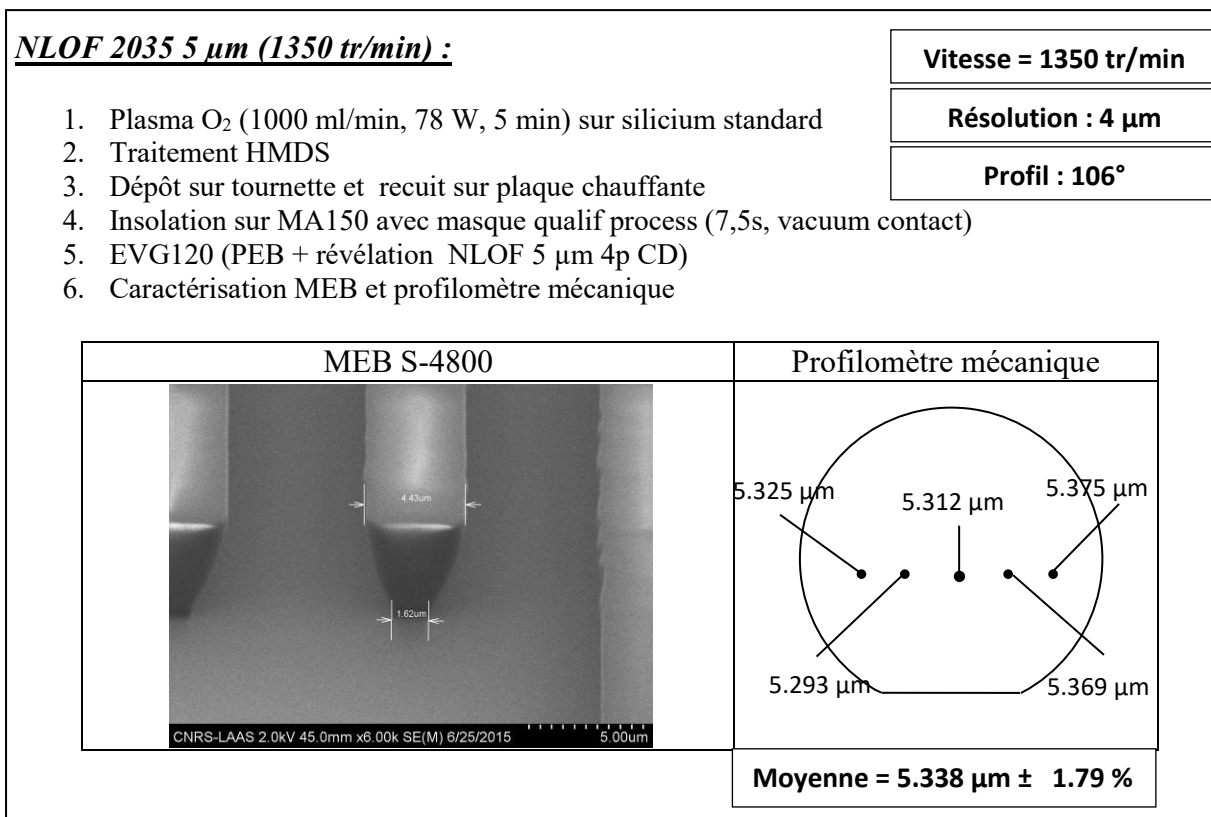


Figure 28 : Résultat d'une qualification de procédé pour une résine NLOF de 5 μm d'épaisseur théorique

Une image MEB des lignes de résolution est ajoutée et un schéma de la plaquette indique l'emplacement des points de mesures d'épaisseur réalisés au profilomètre. Juste en dessous figure la moyenne de ces mesures avec une incertitude de 3σ (erreur de mesure, erreurs liées à la fabrication, ...). On constate ici que la moyenne obtenue est en dehors de la zone d'acceptabilité de % 5 (5.338 μm > 5.25 μm). L'épaisseur de résine de ce procédé doit donc être ajustée.

3.4 Correction des divergences

Comme expliqué en début de partie 3.1, c'est la vitesse de rotation du wafer pendant l'enduction qui définit l'épaisseur de résine. C'est donc ce paramètre qui doit être modifié pour supprimer ou réduire les divergences.

La modification se fait grâce à des courbes donnant l'épaisseur d'une résine donnée en fonction de la vitesse de rotation pendant l'enduction : les courbes de spin. Ces courbes sont fournies par le fabricant de la résine dans la fiche de données techniques. L'ajustement tient compte de la vitesse (spin) actuelle et de l'épaisseur (thickness) correspondante. La modification est plus ou moins importante suivant la divergence observée, mais aussi suivant la viscosité de la résine : plus la résine est visqueuse, plus la modification de vitesse sera importante.

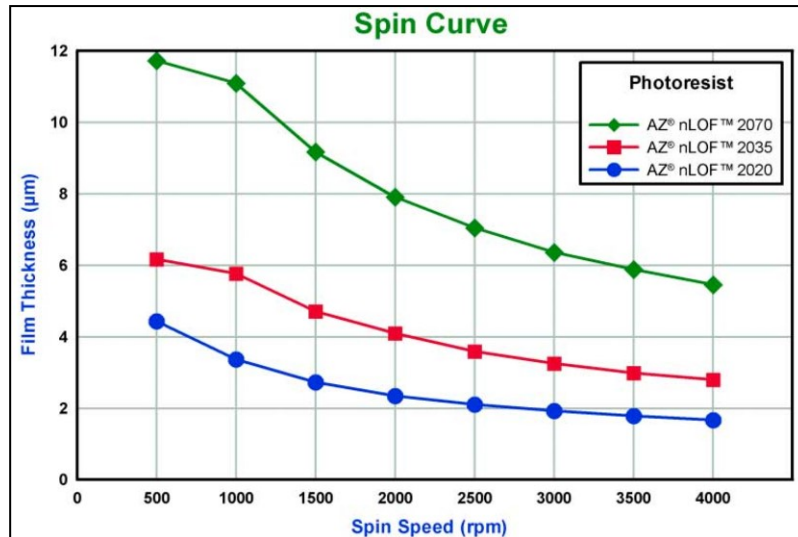


Figure 29 : Courbes de spin d'une résine NLOF

Les procédés présentant une divergence ont donc dû être réalisés une nouvelle fois en changeant la vitesse de rotation. L'ensemble des informations sur ces nouvelles opérations a également été regroupé sur un même document afin de constater ou non la disparition des divergences.

4. Corrections Optiques de Proximité

Les procédés de Correction Optique de Proximité (OPC) sont des corrections appliquées sur le diaphragme de l'équipement d'insolation ou sur le masque de photolithographie. Ces corrections dépendent de la forme du motif et de sa taille.

Le but est de supprimer ou de réduire les effets de diffraction, engendrés lors du passage de la lumière au travers des fentes micro et nanométriques du masque.

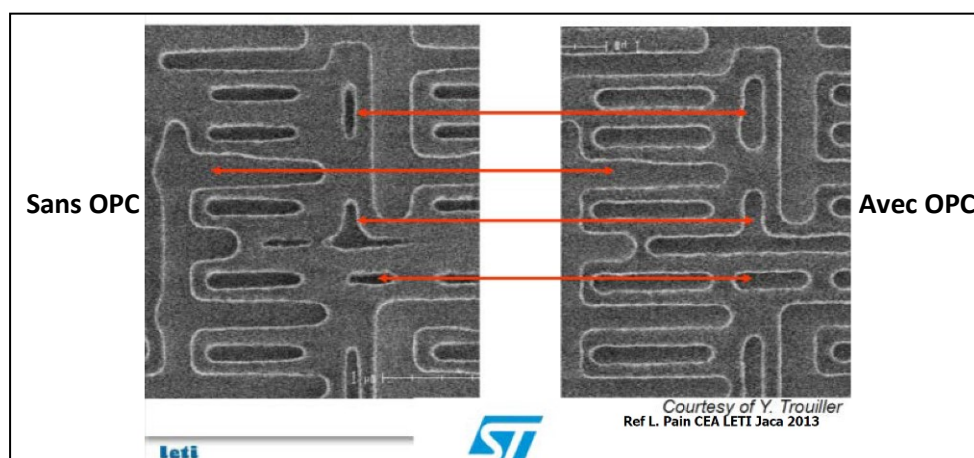


Figure 30 : Effets des OPC sur des motifs micro et nanométriques (Yorick TROUILLER)

En effet, la diffraction entraîne une déformation des motifs désirés (réduction des côtes, création de contacts entre des motifs). Les conséquences seront alors importantes sur le bon fonctionnement d'un composant :

- Fonctionnement électrique d'un transistor ou d'une résistance.
- Fonctionnement mécanique de dispositifs microfluidiques.
- Longueur d'onde pour un réseau de diffraction.

Les OPC permettent de contrer ces effets pour se rapprocher au plus près de la forme et de la dimension originale des motifs.

4.1 Simulations à l'aide du logiciel GenISys LAB®

La première étape consiste à réaliser des simulations sur ordinateur. Le logiciel GenISys LAB® permet de simuler l'influence de l'exposition UV en modifiant de nombreux paramètres, dont ceux :

- De la résine (type, épaisseur, ...).
- Du masque (motifs).
- De l'exposition (type, dose, focus, temps d'exposition, ...).

Les motifs choisis étaient des carrés de $2\text{ }\mu\text{m}$ et $1\text{ }\mu\text{m}$ de côté. Pour cette forme de motifs, les OPC se présentent comme des carrés supplémentaires (« oreilles de Mickey ») de taille et de disposition variables. Ils sont situés à chaque sommet du motif souhaité. Les simulations ont été réalisées en faisant varier la taille et la disposition des OPC afin de définir ceux donnant le meilleur résultat.

Voici l'exemple pour trois simulations avec résine ECI d' $1,1\text{ }\mu\text{m}$ d'épaisseur, avec Dose = 1000 J/m^2 et Focus = $-0.5\text{ }\mu\text{m}$:

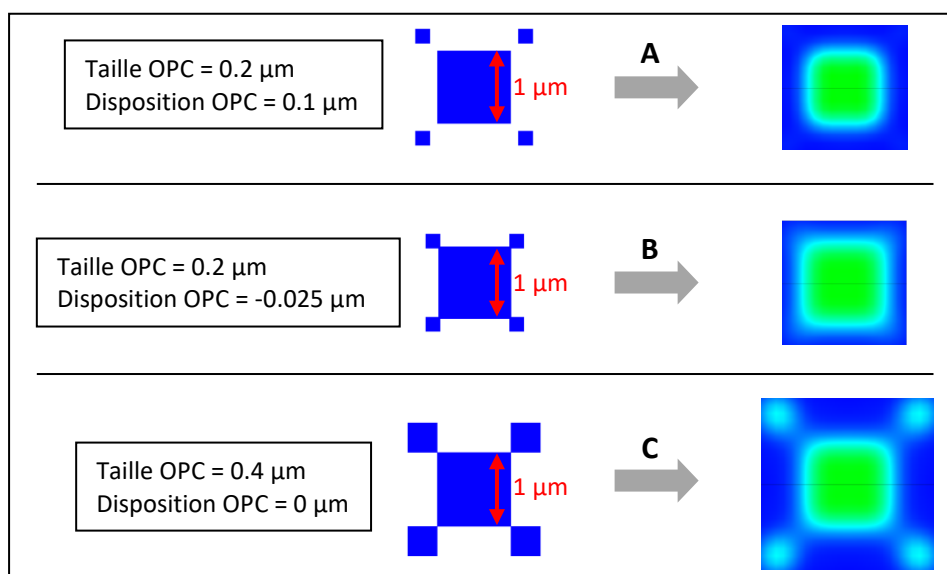


Figure 31 : Résultats de simulations d'OPC avec variation de taille et de disposition

Comme on peut le constater, la simulation A donne des sommets plutôt arrondis, pour la C, les OPC ont une taille trop importante et apparaissent sur le résultat final. Pour cette résine, le meilleur résultat semble être obtenu avec la simulation B : les bords apparaissent moins arrondis et les OPC n'apparaissent pas. Afin de vérifier la validité des

simulations, il a fallu réaliser expérimentalement ces tests d'OPC.

4.2 Réalisation des plaquettes test

La réalisation expérimentale des plaquettes pour les tests d'OPC s'est faite exclusivement par enduction automatique et insolation au Stepper. Le but était d'obtenir la meilleure résolution possible, étant donné la taille des motifs qui nous intéressaient (1 et 2 μm). Les résines utilisées étaient, là encore, les plus couramment utilisées au LAAS : ECI, NLOF, AZ4562.

Les changements par rapport à la qualification de procédés concernaient :

- Le masque utilisé : le masque n'était pas le même, celui-ci contenait les motifs carrés de 1 et 2 μm nécessaires pour nos tests d'OPC.
- La variation de la dose et du focus. Ces paramètres ayant une grande influence sur la forme des motifs, nous avons décidé de les faire varier, en fonction des résines et sur chaque plaquette réalisée. La variation de la dose s'est faite verticalement, celle du focus horizontalement.

Ci-dessous un exemple pour une résine ECI d'1,1 μm d'épaisseur, avec Dose = 1000 J/m^2 et Focus = -0.5 μm :

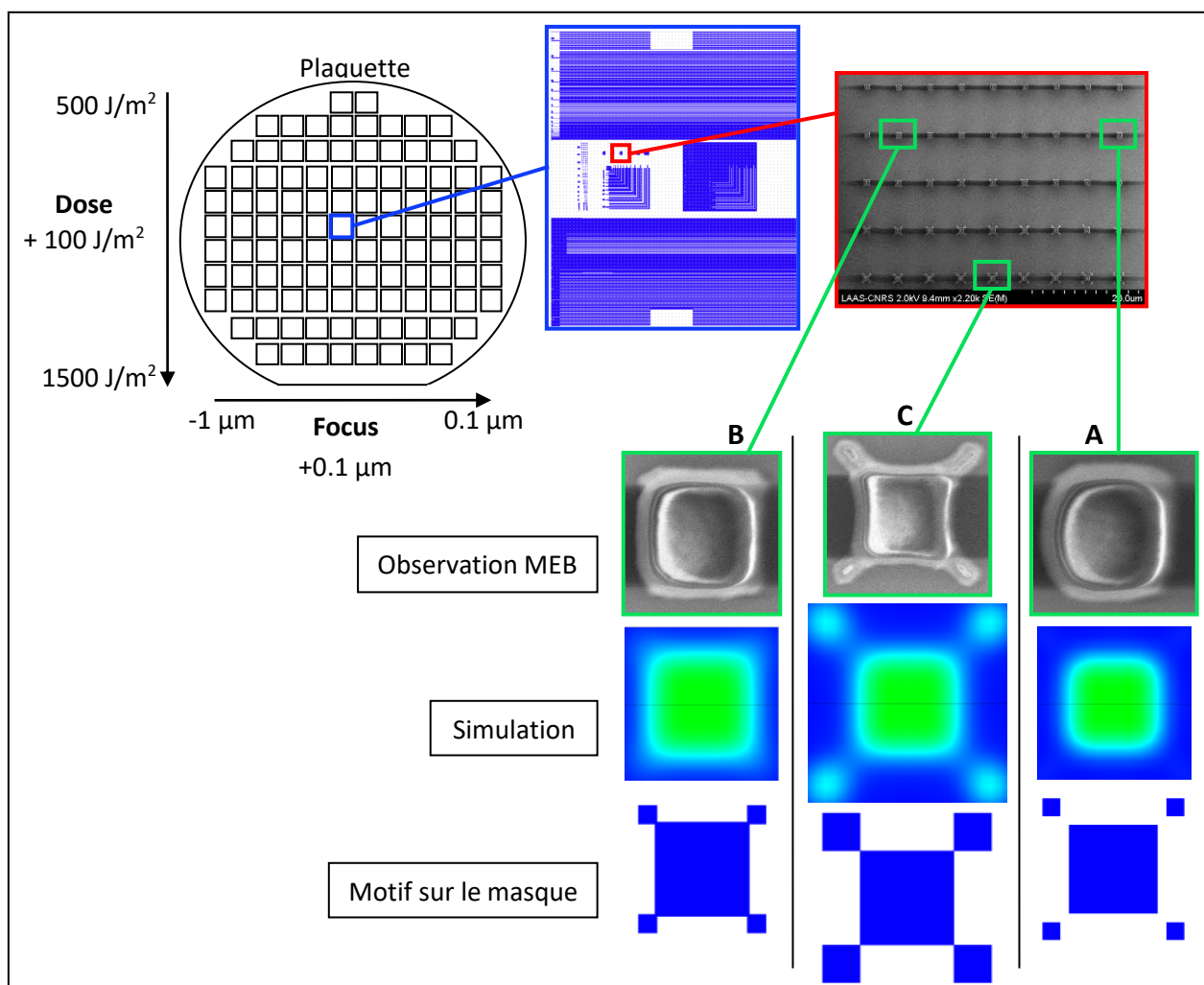


Figure 32 : Les motifs test : emplacement sur la plaquette, observation et comparaison des résultats

Chaque cellule contient les motifs test carrés. Les motifs représentés ci-dessus sont les mêmes que ceux présentés lors des simulations avec le logiciel GenISys LAB® (cf. 4.1). On remarque que les observations de ces trois motifs au Microscope Electronique à Balayage (MEB) concordent avec les simulations effectuées.

En pratique, pour chaque résine, on n'observait pas seulement trois motifs comme vu dans cet exemple, mais quinze. La taille des OPC variait de 0.2 μm à 0.4 μm et leur espacement par rapport au motif de -0.075 μm à 0.1 μm .

Dans le cas ci-dessus, on peut affirmer grâce à la simulation et à l'observation au MEB, que la meilleure Correction Optique de Proximité pour un motif d'1 μm de côté, avec résine ECI 1,1 μm d'épaisseur, est la B (taille = 0,2 μm , disposition = -0,025 μm).

Ces simulations et observations ont été réalisées pour les meilleures valeurs de dose et de focus pour les résines. Mais en se déplaçant sur la plaquette, on a pu observer l'effet de la variation de ces paramètres sur la forme des motifs.

En voici l'exemple sur un motif carré de 2 μm de côté, avec une résine positive de 6 μm d'épaisseur. Les OPC ont une taille de 0,2 μm et une disposition de 0 μm . Dans ce cas, on fait varier le focus avec une dose constante :

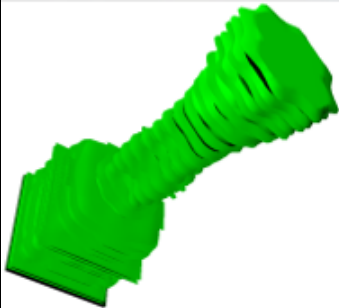
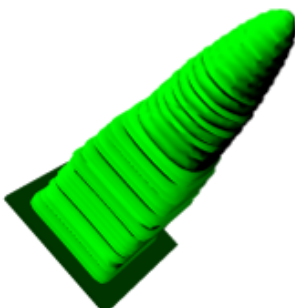
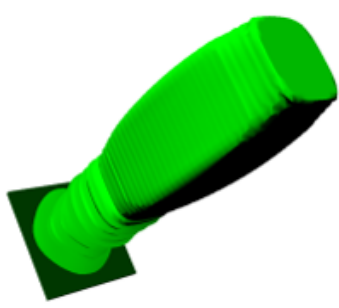
Forme			
Focus (μm)	-10	-3	-1

Figure 33 : Evolution de la forme d'un motif en fonction du focus

L'ensemble des résultats obtenus lors des tests de Correction Optique de Proximité ont été rassemblés, pour chaque résine, sur un même document. La comparaison entre le dessin sur le masque (motif original), la simulation et l'observation au Microscope Electronique à Balayage, a permis le choix des bons paramètres d'OPC (taille et disposition).

5. Résultats

5.1 Qualification de procédés

Ci-dessous, les procédés qui ont nécessité un changement de la vitesse de rotation suite aux premiers essais réalisés :

Type de résine	Epaisseur théorique (μm)	Type d'enduction	Type d'insolation	Vitesse initiale (tr/min)	Epaisseur initiale mesurée (μm)	Nouvelle vitesse (tr/min)	Nouvelle épaisseur mesurée (μm)
NLOF 2035	5	Manuelle	Contact (MA150)	1350	5,338	1300	5,216
NLOF 2035	5	Automatique	Contact (MA150)	1350	/	1300	5,682
AZ40XT	20	Manuelle	Contact (MA)	2600		3000	
AZ40XT	20	Automatique	Contact (MA150)	2600	22,54	3000	20,60
AZ40XT	40	Manuelle	Contact (MA150)	1750	/	1700	36,45
AZ40XT	40	Manuelle	Contact (MA)	1750	/	1600	
AZ40XT	40	Automatique	Contact (MA6)	1750	36,34	1700	36,75
SU8 3050	100	Manuelle	Contact (MA6)	1650	94,66	1400	110,5
SU8 3050	100	Automatique	Contact (MA)	1650	/	1400	

Figure 34 : Tableau récapitulatif des procédés réalisés avec changement de la vitesse de rotation

Les valeurs apparaissant en rouge sont en dehors de l'intervalle d'erreur de 5 % de la valeur théorique d'épaisseur. Les procédés concernés doivent donc être encore modifiés afin de se rapprocher de la valeur d'épaisseur théorique.

Pour certains procédés, les valeurs initiales d'épaisseurs mesurées n'apparaissent pas. Ceci est dû au fait que les procédés concernés avaient déjà été réalisés avec l'autre type d'enduction de résine (automatique ou manuelle). L'incrément ou la diminution de vitesse s'est donc faite à partir de l'épaisseur obtenue durant cette première étape.

La nouvelle épaisseur mesurée pour la SU8 100 μm manuelle apparaît en vert, bien qu'en dehors des 5 %. Ceci est dû au fait que l'épaisseur n'était pas uniforme sur toute la surface de wafer, mais la nouvelle valeur de vitesse est correcte.

5.2 Corrections Optiques de Proximité

Type de résine	Epaisseur (μm)	Côté du motif carré (μm)	Meilleure Dose (J/m ²)	Meilleur Focus (μm)	Taille des meilleurs OPC (μm)	Disposition des meilleurs OPC (μm)
ECI 3012 avec HMDS	1,1	1	1000	-0,5	0,2	0
ECI 3012 avec BARC	1,1	1	1200	-0,6		
NLOF 2035	2,5	1	1200	0,5		
ECI 3012 avec HMDS	1,1	2	1000	-0,5	0,2	-0,075
ECI 3012 avec BARC	1,1	2	1200	-0,6	0,2	-0,075
NLOF 2035	2,5	2	1100	0,5	0,4	-0,075
AZ4562	6	2	4000	-3		

Figure 35 : Tableau récapitulatif des tests de Corrections Optiques de Proximité

5.3 Applications de ces travaux

Les qualifications de procédés ont permis de déceler les résines concernées par des défauts d'épaisseurs. La modification des vitesses a permis de réduire ces écart pour certaines d'entre elles.

Les modes opératoires des procédés suivant ont été modifiés :

- NLOF 2035 de 5 μm d'épaisseur : la vitesse d'enduction manuelle est passée de 1350 à 1300 tr/min.
- AZ40XT de 40 μm d'épaisseur : la vitesse d'enduction manuelle est passée de 1750 à 1600 tr/min.
- SU8 3050 de 100 μm d'épaisseur : la vitesse d'enduction manuelle est passée de 1650 à 1400 tr/min.

Concernant les Corrections Optiques de Proximité, les résultats obtenus sur la taille et la disposition des OPC pour des motifs carrés, de 1 μm et 2 μm de côté, pourront être utilisés pour tous les procédés nécessitant ces motifs.

Conclusion

Le premier objectif de mon stage était de fiabiliser et améliorer les procédés de photolithographie, en ajustant les erreurs au niveau des épaisseurs de résines.

FAIT, PAS FAIT, DIFFICULTES.

Le second objectif était de réduire les erreurs sur les formes et les dimensions de certains motifs.

FAIT, PAS FAIT, DIFFICULTES.

Ce stage de fin d'études au LAAS-CNRS m'a permis d'acquérir de l'expérience dans le monde professionnel, et notamment dans celui des techniques appliquées aux micro et nano composants. Ne connaissant que très peu ce domaine avant le DUT Mesures Physiques, j'ai pu le découvrir et faire le lien entre la théorie vue à l'IUT et la réalité sur le terrain. J'ai également fait la rencontre de nombreuses personnes auprès desquelles j'ai beaucoup appris, tant par leurs explications techniques sur les équipements et procédés, que par leur expérience dans le domaine. La découverte de la salle blanche, la diversité des opérations, des équipements et des applications fût pour moi un enrichissement important sur le plan personnel et professionnel.

Lexique

OPC (Correction Optique de Proximité): Technique d'amélioration du procédé de photolithographie utilisée pour compenser des déformations de motifs dues à la diffraction lumineuse ou à d'autres effets du procédé.

Wafer/Substrat : Base matérielle en matériau semi-conducteur sur laquelle vont être effectuées les différentes étapes de micro et nano fabrication.

Matériaux III/V : Matériaux semi-conducteurs composés d'éléments chimiques provenant des colonnes III et V du tableau périodique des éléments.

Plaquette : Ensemble constitué du wafer/ substrat et des micro et nano structures réalisées dessus.

Tournette Gyrset SUSS MICROTEC : Equipement manuel de photolithographie permettant le dépôt de résine sur wafer par force centrifuge.

EVG-120 : Equipement automatique de photolithographie permettant le dépôt de résine sur wafer par force centrifuge.

Spin coating : Technique d'enduction de résine par centrifugation utilisée en photolithographie.

MA6 et MA150 : Equipements de photolithographie permettant l'alignement de masque et l'insolation UV par contact ou proximité (bonne/moyenne résolution).

Stepper : Equipement de photolithographie permettant l'alignement de masque et l'insolation UV de résines par projection (très bonne résolution).

Résolution : Ligne de résine la plus fine obtenue dans un réseau périodique de lignes.

CD (Critical Dimension) : Largeur réelle d'un motif de résine de 0,5 μm de côté sur le masque.

MEB (Microscope Electronique à Balayage) : Equipement d'observation permettant d'obtenir des images haute résolution à l'échelle micro et nanométrique par interaction électrons-matière.

Lift-Off : Technique de photolithographie permettant la création de micro et nano structures grâce à l'utilisation d'un matériau sacrificiel.

Centipoise (cP) : L'une des unités de mesure de la viscosité dynamique (1 cP = 1 mPa.s).

σ (Sigma) : Ecart-type quantifiant l'incertitude associé au résultat de la mesure.

Bibliographie

Table des illustrations :

Figure 1 : Observation au MEB de motifs de résine

Figure 2 : Vue aérienne du LAAS-CNRS

Document Power Point, « *Présentation du LAAS* »

Figure 3 : Logo du réseau Renatech

<http://jnte13.cnrs.fr/>

Figure 4 : Laboratoires membre du réseau Renatech

Document Power Point, « *Présentation du LAAS* »

Figure 5 : Plan de la salle blanche du LAAS

Cours de microélectronique de Laurent MAZENQ

Figure 6 : Vue en coupe d'un transistor MOS

Cours de microélectronique de Laurent MAZENQ

Figure 7 : Wafer/substrat en silicium

Figure 8 : Représentation schématique de l'enduction de résine (spin coating)

Figure 9 : Dépôt de résine

<https://www.laas.fr/public/fr/zone-photolithographie>

Figure 10 : Masque de photolithographie

Figure 11 : Motif issu du masque pour insolation par contact

Logiciel CleWin®

Figure 12 : Représentation schématique d'une insolation UV par contact

Figure 13 : Partie du spectre d'émission d'une lampe à vapeur de mercure

<http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/articles/lightsources/mercuryarc.html>

Figure 14 : Représentations schématiques de plaquettes après révélation

Figure 15 : Représentation schématique d'une structuration d'aluminium par photolithographie et gravure

Figure 16 : Répartition de la consommation des résines pour l'année 2014

Document Power Point du LAAS, « *Bilan 2014 des zones de la plateforme de micro et nanotechnologies* »

Figure 17 : Mode opératoire d'un procédé de photolithographie pour une résine NLOF de 5 µm d'épaisseur

Figure 18 : Effets de profils corrects (à gauche) et évasés (à droite) sur une gravure d'aluminium

Figure 19 : Représentation schématique d'une insolation par projection

Figure 20 : Plaquette après photolithographie

Figure 21 : Tableau récapitulatif des procédés réalisés sans modification des paramètres

Figure 22 : Motifs de résolution

Microscope LEICA

Figure 23 : Motifs issus du masque pour isolation par projection

Logiciel CleWin®

Figure 24 : Marche de résine (vue de dessus)

Figure 25 : Tracé de la mesure

Figure 26 : Mesure des côtes

Figure 27 : Mesure du profil

Figure 28 : Résultat d'une qualification de procédé pour une résine NLOF de 5 µm d'épaisseur théorique

Figure 29 : Courbes de spin d'une résine NLOF

Technical Data Sheet de la résine AZ40XT

Figure 30 : Effets des OPC sur des motifs micro et nanométriques (Yorick TROUILLER)

Cours de microélectronique de Laurent MAZENQ,

Figure 31 : Résultats de simulations d'OPC avec variation de taille et de disposition

Figure 32 : Les motifs test : emplacement sur la plaquette, observation et comparaison des résultats

Figure 33 : Evolution de la forme d'un motif en fonction du focus

Figure 34 : Tableau récapitulatif des procédés réalisés avec changement de la vitesse de rotation

Figure 35 : Tableau récapitulatif des tests de Corrections Optiques de Proximité

Références :

Introduction et Présentation générale

- Site internet du LAAS-CNRS
<https://www.laas.fr/public/fr/pr%C3%A9sentation-du-laboratoire>
<https://www.laas.fr/public/fr/histoire>
<https://www.laas.fr/public/fr/plate-forme-de-micro-et-nanotechnologies>
<https://www.laas.fr/public/fr/team>
- Document Power Point, « *Présentation du LAAS* »
- Cours de microélectronique de Laurent MAZENQ

2. La photolithographie : objectif et étapes de réalisation

- Cours de microélectronique de Laurent MAZENQ
- Document Power Point du LAAS, « *Traitement de surfaces* »
- Document Power Point du LAAS, « *Mise en forme* »
- Document Power Point de Véronique CONEDERA, « *Environnement et équipements en Photolithographie* »
- Document Power Point de Véronique CONEDERA, « *Procédés Photolithographie* »
- Site internet Brewer Science
<http://www.brewerscience.com/arc>
- Site internet de microélectronique de l'Université de Rennes
<http://www.microelectronique.univ-rennes1.fr/fr/chap10b.htm>
- Site internet du fabricant MicroChemicals
http://www.microchemicals.com/downloads/application_notes.html

3. Qualification de procédés

- Cours de microélectronique de Laurent MAZENQ
- Document Power Point du LAAS, « *Bilan 2014 des zones de la plateforme de micro et nanotechnologies* »
- Site internet du fabricant MicroChemicals
Technical Data Sheet de la résine AZ40XT

4. Correction Optique de Proximité

- Cours de microélectronique de Laurent MAZENQ

Annexes

Classe propriété

Equipements

Doc qualif process

Doc OPC

Doc Forme =f(focus)

Qualif Stepper