



HAL
open science

Contrôle qualité des motifs géométriques 2D sur les masques de photolithographie optique

David Colin, Pierre-François Calmon

► **To cite this version:**

David Colin, Pierre-François Calmon. Contrôle qualité des motifs géométriques 2D sur les masques de photolithographie optique. Rapport LAAS n° 21047. 2021. hal-03164214

HAL Id: hal-03164214

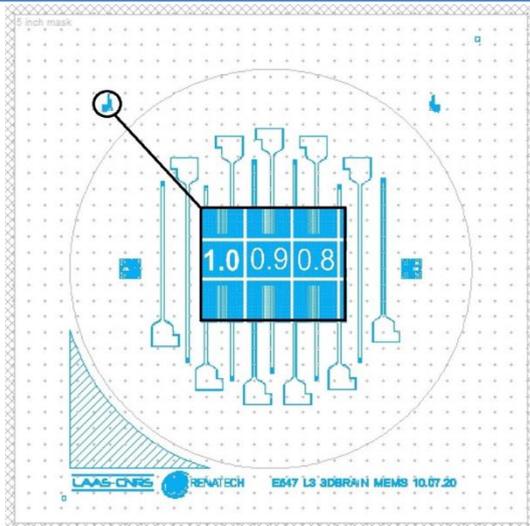
<https://laas.hal.science/hal-03164214v1>

Submitted on 9 Mar 2021

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.

Contrôle qualité des motifs géométriques 2D sur les masques de photolithographie optique



Janvier 2021

Auteurs : René-David COLIN

Pierre-François CALMON

Table des matières

Introduction	3
Motifs géométriques 2D	3
Procédé d’insolation laser.....	4
Procédé de développement.....	5
Procédé de gravure chrome	6
Procédé de nettoyage.....	7
Etude de l’effet du paramètre focus de la tête d’insolation laser	7
Principe	7
Etude d’une structure à damiers	8
Etude d’une structure de lignes.....	11
Etude de l’effet du paramètre durée de développement de la résine.....	13
Etude du respect des côtes pour différentes tailles de géométrie.....	16
Conclusion.....	17
Annexe 1 : Tableaux des corrections a appliquer au dessin pour obtenir des formes circulaires de différents diamètres et des lignes de différentes largeurs.....	18

Introduction

Les moyens de la plateforme RENATECH du LAAS permettent la fabrication de différents formats (carrés de 2,5 / 4 / 5 / 6 / 7 pouces de côté) de masque verre / chrome et réticule quartz / chrome pour la photolithographie optique.

La précision des motifs géométriques sur les masques dépend essentiellement du procédé d'insolation par laser, du procédé de développement d'une résine positive (épaisseur 500 nm) et du procédé de gravure d'une couche de chrome (épaisseur 100 nm) par voie humide. La figure 1 représente le profil des différents matériaux nécessaires pour la fabrication d'un masque.

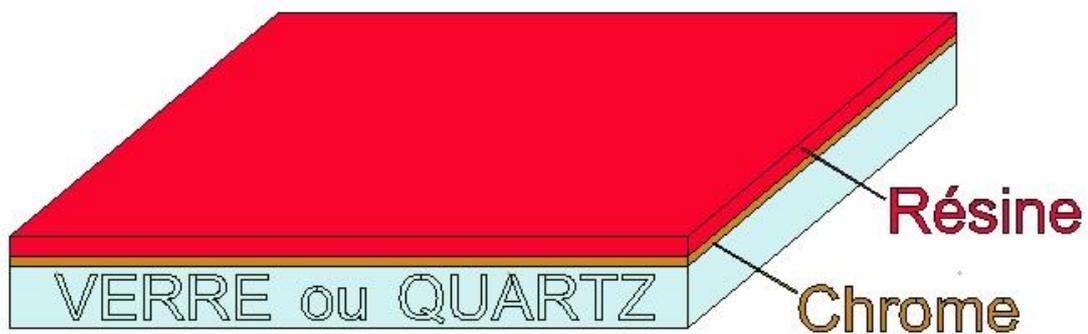


Figure 1 : Profil d'un masque de photolithographie avant insolation laser

Notre procédé d'insolation laser est réalisé avec l'équipement DWL 200 (HIMT)¹ depuis 2005. De 2005 à 2017 la source laser UV d'insolation était de type laser à gaz hélium cadmium (442 nm). Depuis 2017 cette source d'insolation a été remplacée par un laser UV à diode (405 nm) pour réduire les coûts de fabrication des masques et réticules.

Les traitements post-insolation par voie humide (développement et gravure) sont réalisés avec l'équipement HMP90 (Hamatech)² depuis 2007. Cet équipement de deuxième main et de conception ancienne sera remplacé en 2021 par un équipement neuf et plus performant dénommé HMxSquare (Suss).

Motifs géométriques 2D

Pour contrôler et suivre notre procédé de fabrication nous importons sur tous les masques des motifs géométriques critiques spécifiques. Il s'agit de formes de largeurs comprises entre 0,5 et 2,5 μm répétées par pas de 0,1 μm (figure 2).

¹ <https://lms.laas.fr/WebForms/Equipment/EquipmentView.aspx?toolId=183>

² <https://lms.laas.fr/WebForms/Equipment/EquipmentView.aspx?toolId=187>

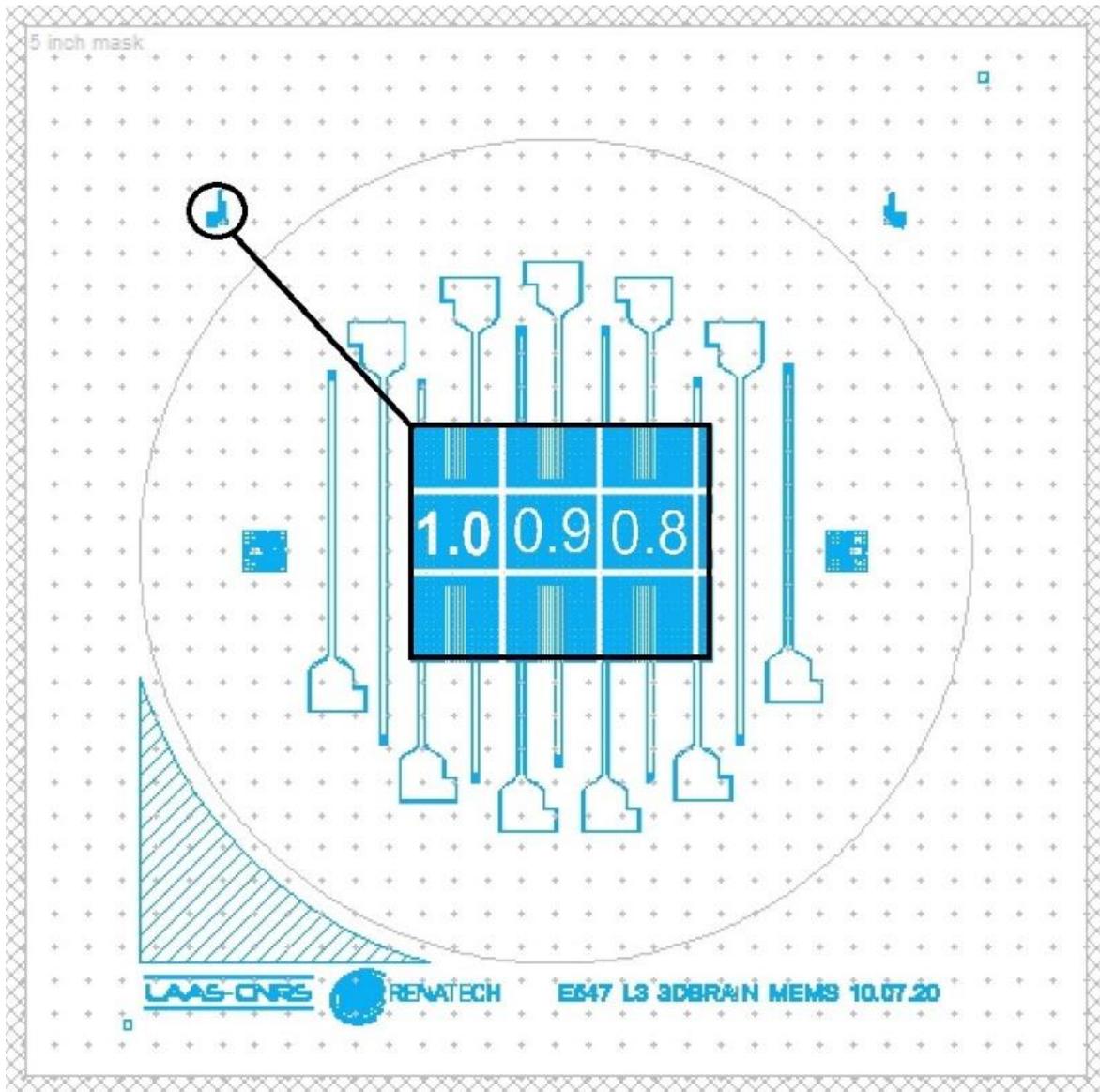


Figure 2: Motifs de résolution en bordure du masque

Procédé d'insolation laser

Durant la fabrication d'un masque l'équipement DWL 200 offre la possibilité d'insoler une résine positive par écriture laser UV. Le traitement optique du faisceau laser d'écriture permet de moduler l'intensité d'insolation avec un 1^{er} modulateur opto-acoustique, générer des pixels avec un 2^{ème} modulateur opto-acoustique et ordonner un balayage des pixels lumineux avec un déflecteur opto-acoustique. Ce traitement optique du faisceau est couplé avec un mouvement XY du masque contrôlé par interférométrie laser et un mouvement Z d'auto-focus de l'objectif d'insolation. La synchronisation de tous ces organes (figure 3) permet l'écriture laser avec une précision sub-micronique et une vitesse proche de 1 mm/s.

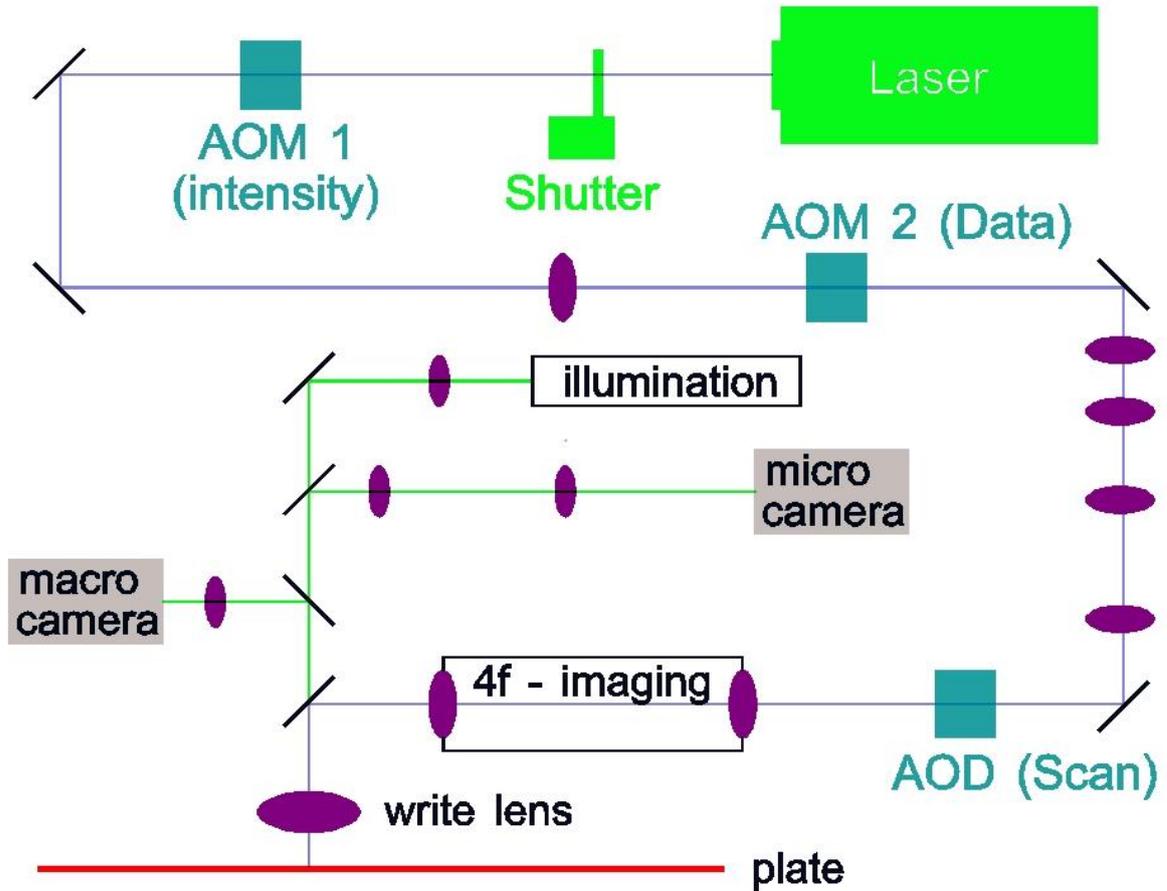


Figure 3: Schéma de principe DWL 200

Procédé de développement

Après l'insolation laser du masque l'équipement HMP 90 assure la révélation de la résine avec un spray de développeur MF-CD26 régulé à 22°C. Durant ce traitement chimique (figure 4) la buse d'injection mélange un flux d'azote gazeux avec le flux liquide de développeur pour générer un brouillard qui est dispensé en continu sur le masque. Pour améliorer l'uniformité du traitement chimique le masque est maintenu en rotation avec une vitesse contrôlée à $\pm 1\%$. La répétabilité du procédé est garantie par un suivi et une gestion d'alarmes des paramètres vitesse et température. La fin du développement est contrôlée par l'injection d'eau DI sur toutes les surfaces.



Figure 4: Buse de développeur équipement HMP 90

Procédé de gravure chrome

Après révélation de la résine et rinçage, la surface du masque est maintenue humide pour favoriser la gravure chimique du chrome des motifs de dimensions proches de quelques microns.

L'équipement HMP 90 grave chimiquement la couche de chrome (figure 5) par l'injection d'un flux continu d'acides dilués (4,2% d'acide perchlorique et 11% d'amonium cerium nitrate). Durant cette étape le masque est maintenu en rotation. Après gravure, l'équipement assure la collecte pour traitement des déchets d'acides, le rinçage à l'eau DI des surfaces et l'essorage du masque.



Figure 5: Buse de gravure chrome équipement HMP 90

Procédé de nettoyage

Le procédé de nettoyage permet d'éliminer la résine de fabrication et finaliser le masque avant caractérisation et mise à disposition pour la photolithographie. Ce procédé consiste en une pré-dissolution de la couche de résine dans un bain d'AZ 100 remover chauffé à 60°C pendant deux fois 5 minutes puis une destruction des résidus de résine dans un mélange H₂SO₄/H₂O₂ chauffé à 130 °C pendant 2 minutes. Au final le masque est rincé et essoré avec l'équipement HMP 90 puis contrôlé au microscope optique.

Etude de l'effet du paramètre focus de la tête d'insolation laser

Principe

La réalisation de motifs test en bord de masque nous permet d'étudier l'effet du paramètre focus sur les dimensions x et y des motifs. Dans un fichier d'écriture le paramètre focus est une valeur nommée FOC, sans unité comprise entre -128 et +128. Cette plage de valeurs permet de moduler la distance (mouvement piézo-électrique d de la figure 6) entre l'objectif de la tête d'écriture et la surface de la résine à insoler. Cette course du focus (d) est égale à 100 µm. Chaque incrément du paramètre FOC correspond donc à une variation de 390 nm de la distance objectif/surface du substrat.

La valeur FOC optimale recherchée permet de projeter un faisceau de diamètre minimal concentrant un maximum d'intensité lumineuse. La répétabilité de cette valeur FOC est assurée par la présence d'une chambre d'environnement qui assure une régulation en température du système à $\pm 0,1^\circ\text{C}$ pour limiter la déformation des matériaux. Durant l'écriture ce réglage de focalisation est maintenu par un système autofocus pneumatique (figure 6) quelle que soit la position XY de l'objectif au-dessus du masque. Ce système permet de corriger les défauts de planéité de la platine motorisée XY et du masque.

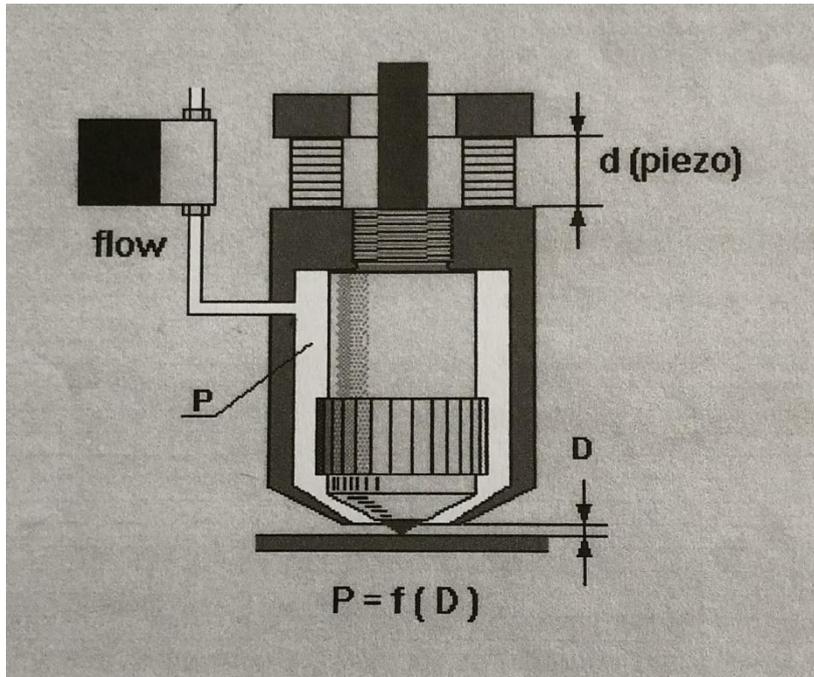


Figure 6 : schéma de principe de la tête d'écriture

Ainsi les différents automatismes qui commandent les paramètres critiques du procédé nous assurent la répétabilité des dimensions des motifs générés avec une tolérance en x et y comprise entre 50 et 100 nm. Lorsque les valeurs de ces paramètres critiques sont optimisées la dimension minimale d'un motif peut atteindre 800 nm.

Etude d'une structure à damiers

Pour étudier l'effet de ce paramètre nous avons créé un fichier permettant la répétition de géométries de type damier (formes carrées de $4\ \mu\text{m}$) avec 51 valeurs différentes du paramètre FOC. Les figures 7,8,9,10 et 11 sont des images MEB pour des valeurs FOC égales respectivement à -80, -70, -65, -60 et -10.

Des observations au MEB nous permettent d'analyser les surfaces ouvertes dans le chrome et d'ordonner les images les plus fidèles aux formes carrées du fichier gds. La meilleure résolution est obtenue pour la valeur FOC égale à -65.

Pour la valeur FOC égale à -10 (figure 11) les coins des carrés sont déformés car le faisceau laser d'écriture est défocalisé.

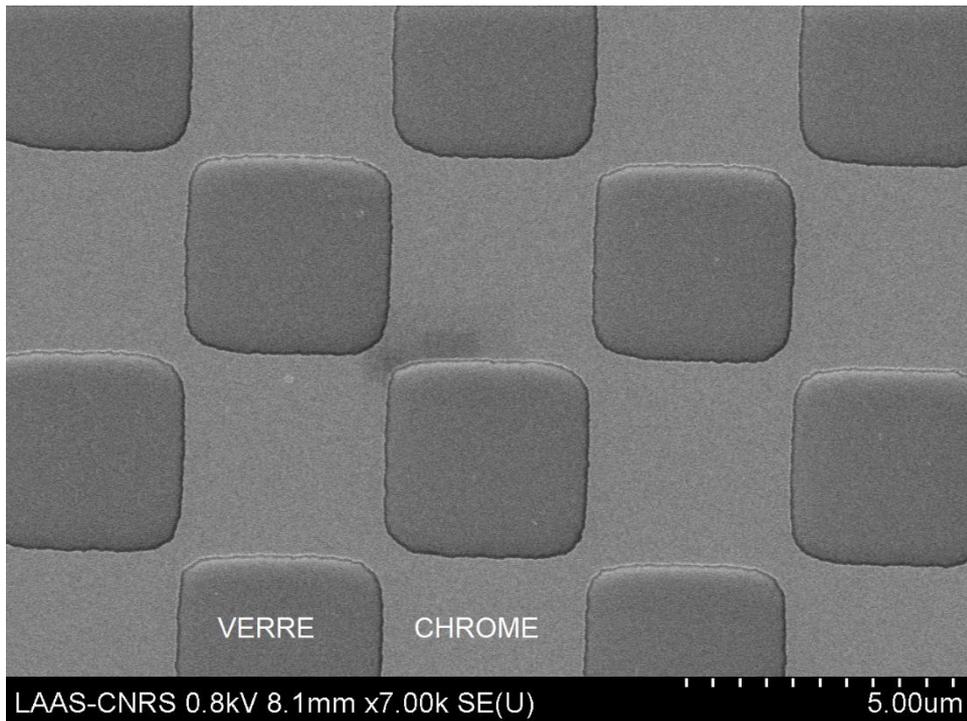


Figure 7 : image MEB FOC=-80

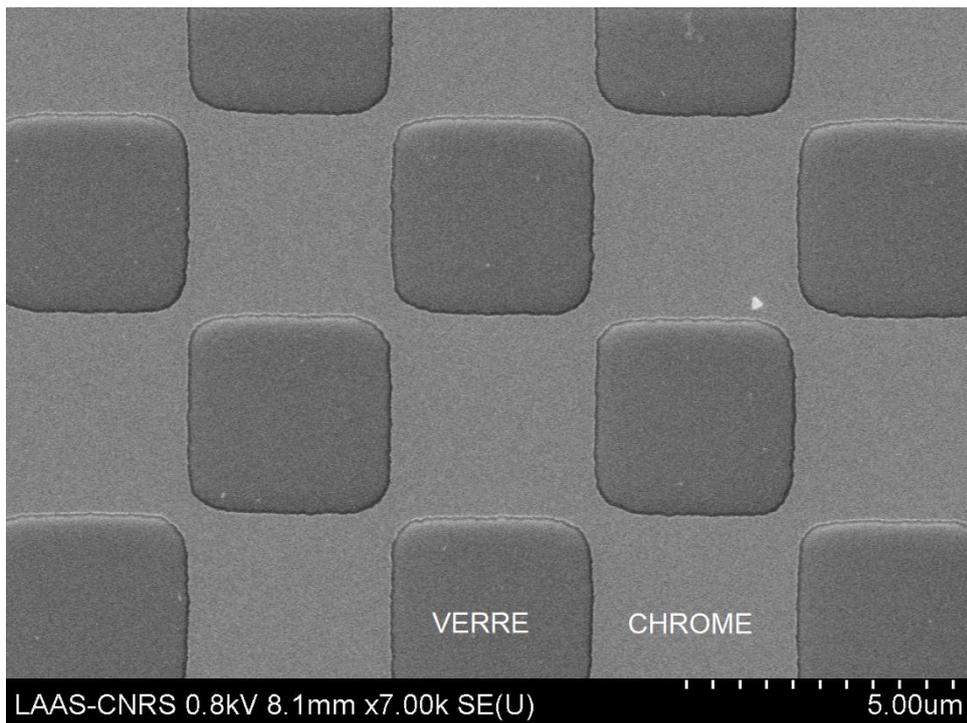


Figure 8 : image MEB FOC=-70

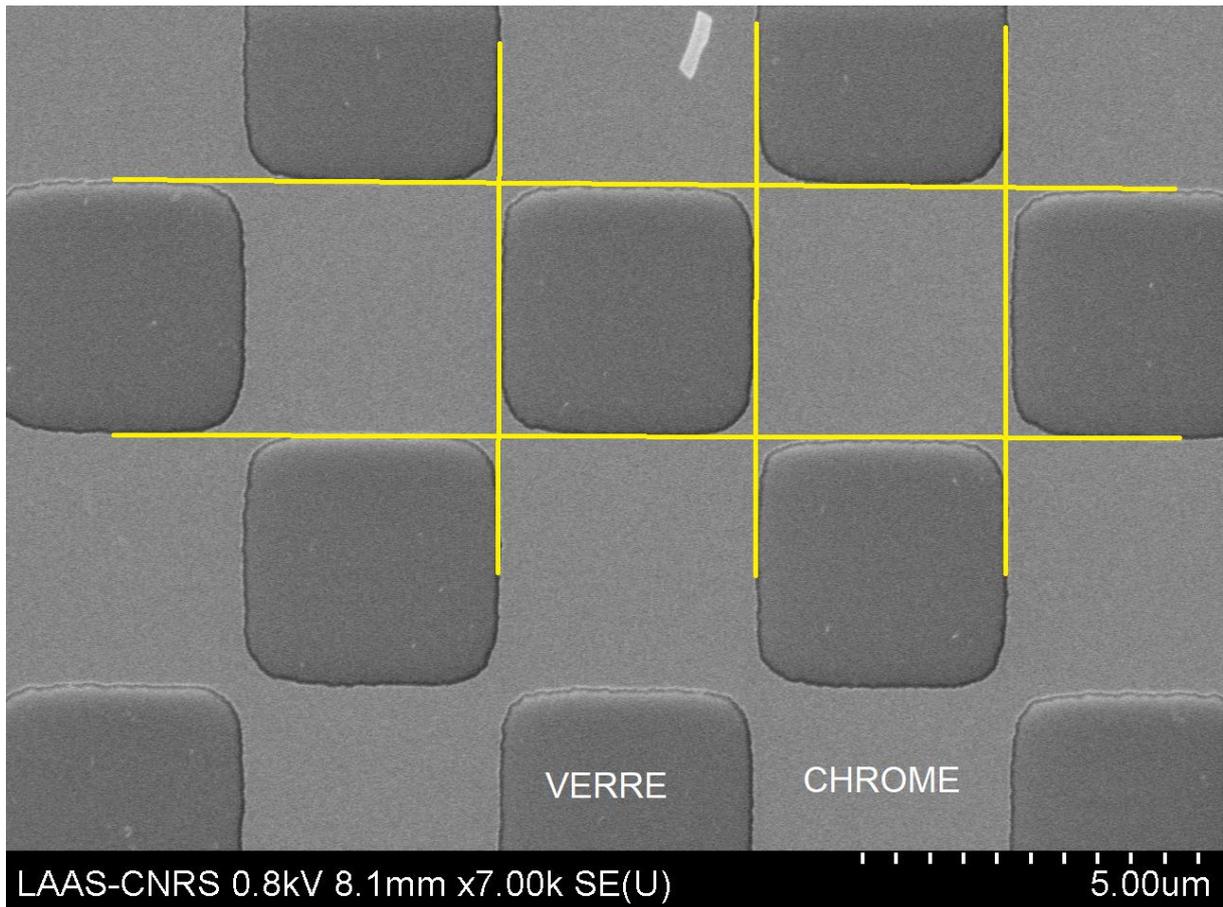


Figure 9 : image MEB FOC=-65

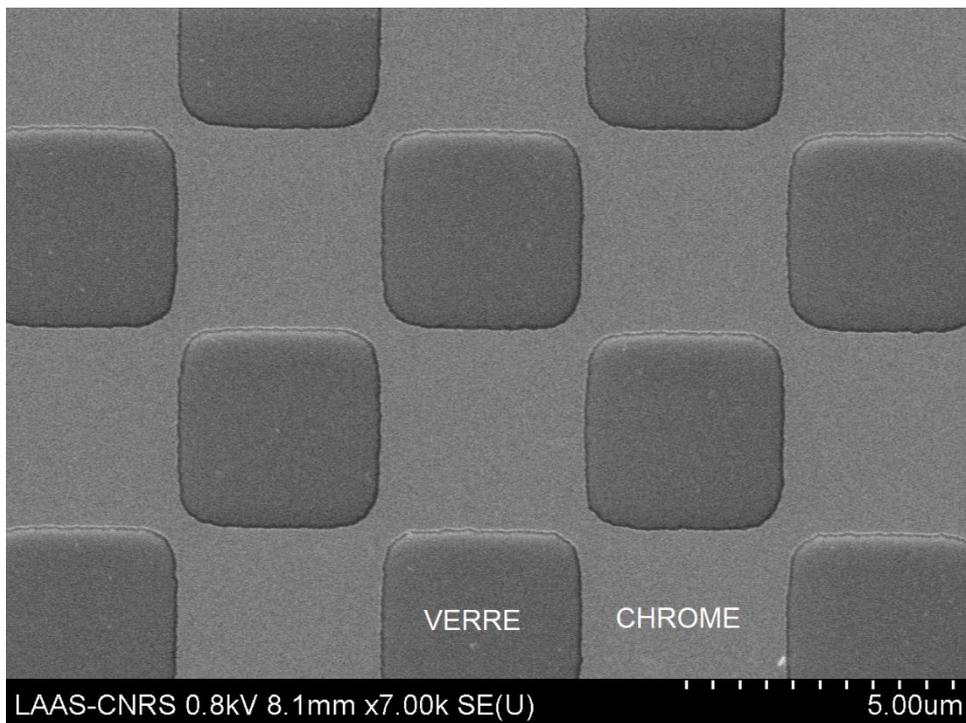


Figure 10 : image MEB FOC=-60

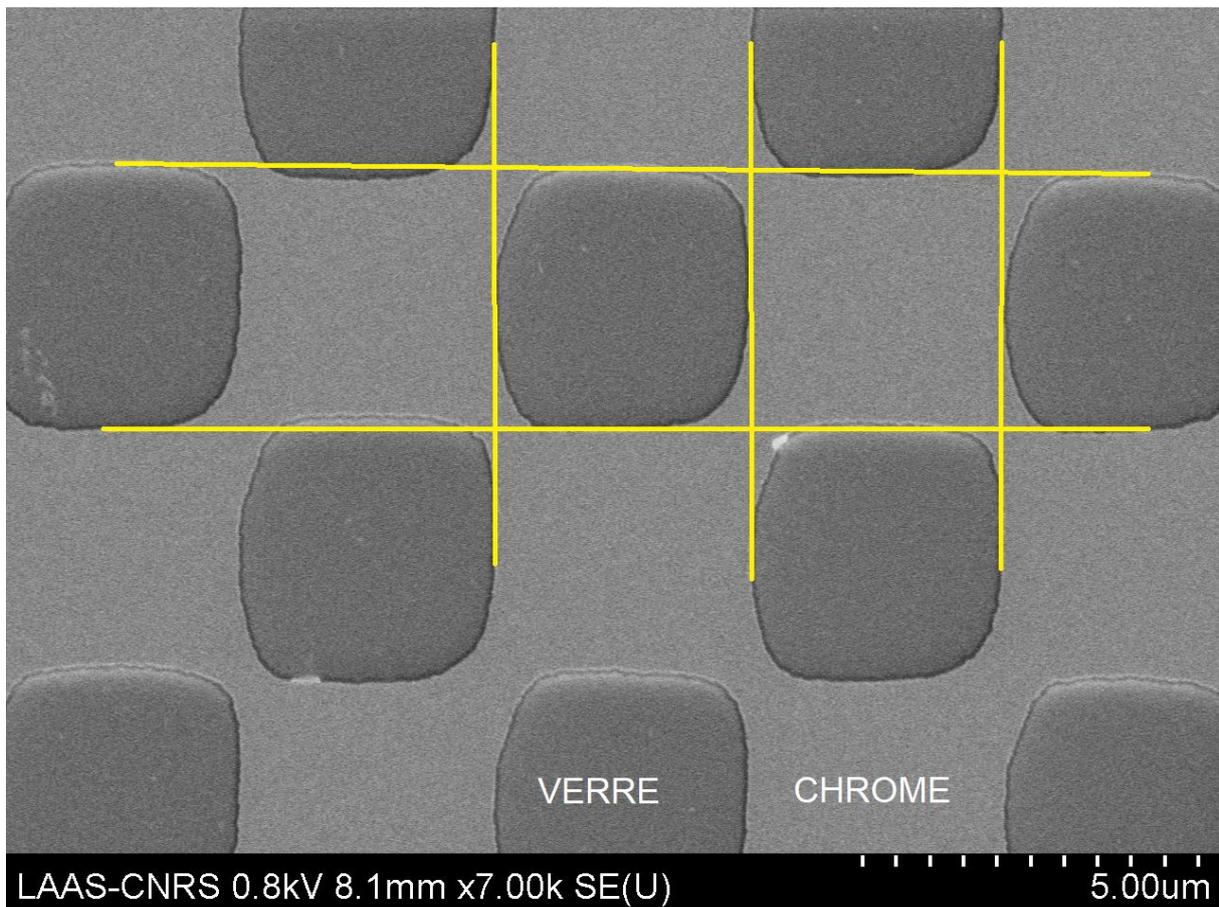


Figure 11 : image MEB FOC=-10

Etude d'une structure de lignes

Nous avons appliqué les mêmes variations des valeurs FOC pour mesurer les effets sur les dimensions d'un réseau de lignes de largeur $8\ \mu\text{m}$ au pas de $16\ \mu\text{m}$. La figure 12 est une image MEB utilisée pour la mesure du réseau. Dans le cas de l'écriture de lignes une plus grande densité de pixels est générée pour insoler les motifs. La distance entre les arêtes qui définissent la largeur de la ligne est plus régulière. Cela permet une mesure plus précise car il est possible de s'affranchir des déformations géométriques présentes dans les coins des motifs. C'est le diamètre de $800\ \text{nm}$ du faisceau focalisé dans la résine qui provoque ces déformations. Un diamètre de faisceau plus réduit permettrait réduire ces déformations tout en augmentant les durées d'écritures.

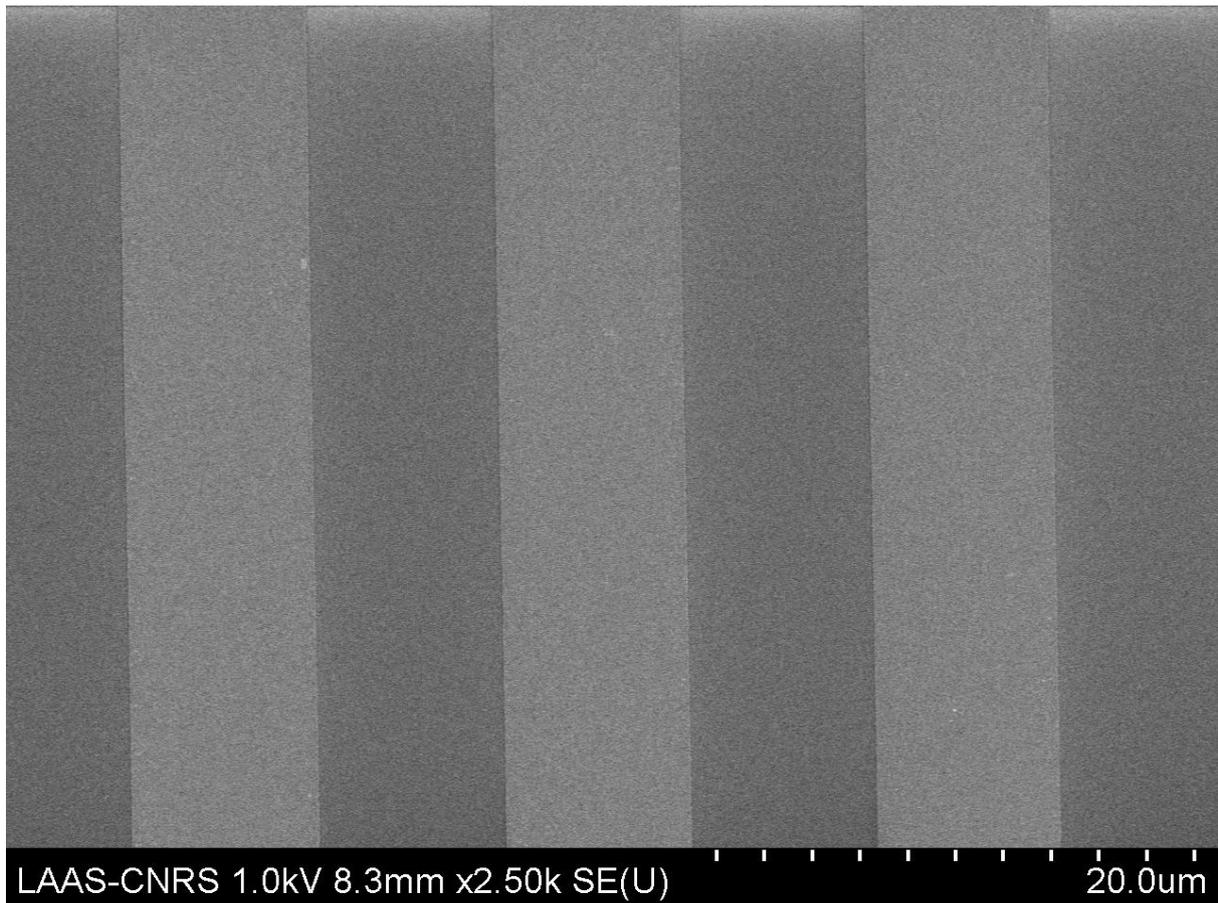


Figure 12: image MEB réseau de lignes de largeur 8 μm au pas de 16 μm

Le graphique de la figure 13 présente les mesures MEB des largeurs de lignes transparentes du réseau en fonction du paramètre FOC. Le graphique de la figure 14 présente les mesures MEB des largeurs de lignes opaques du réseau en fonction du paramètre FOC. La côte nominale de 8 μm définit par le dessin est respectée lorsque la valeur du focus est égale ou proche de la valeur -65.

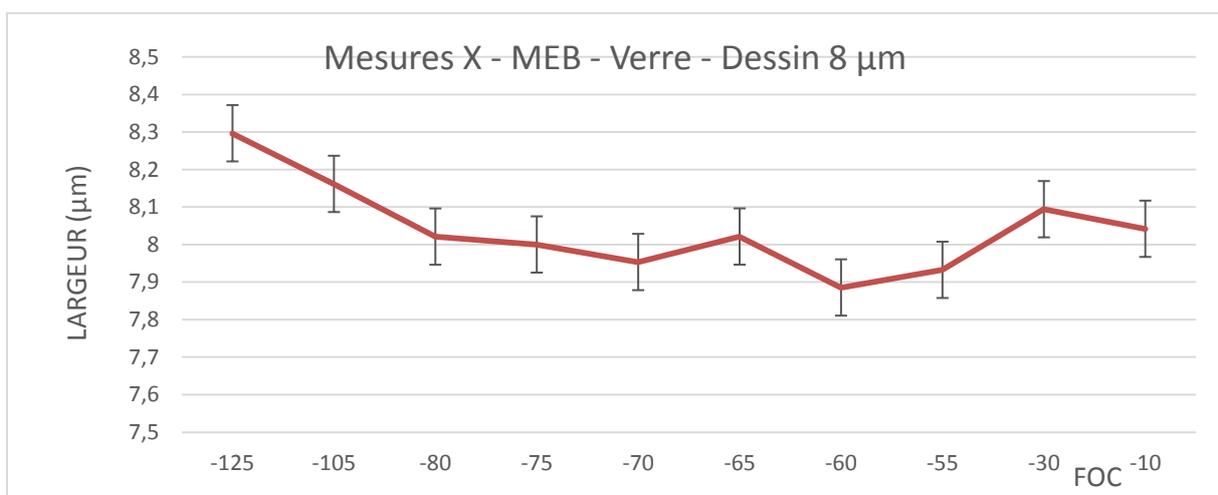


Figure 13 : Largeurs de lignes transparentes en fonction du paramètre FOC

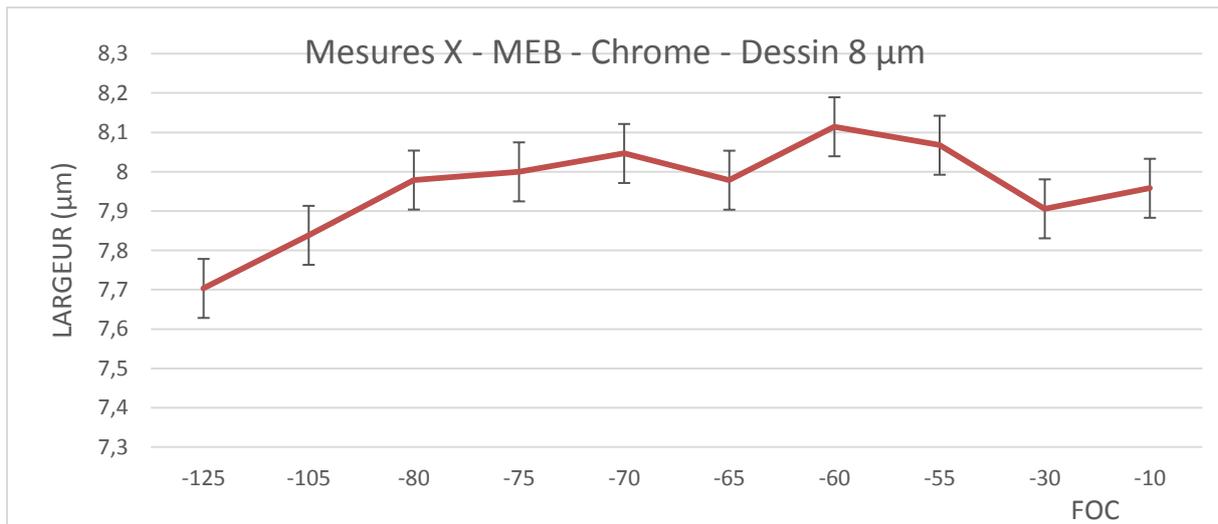


Figure 14 : Largeurs de lignes opaques en fonction du paramètre FOC

La réalisation et l'observation de ces motifs tests nous permettent de vérifier que le système autorise un ajustement de la valeur FOC avec une grande sensibilité (400 nm).

Etude de l'effet du paramètre durée de développement de la résine

Dans cette partie nous avons à nouveau réalisé et mesuré des réseaux de lignes de largeur 8 µm au pas de 16 µm et des géométries de type damier (formes carrées de 4 µm) pour quantifier l'effet de la durée de développement de la résine. Les graphiques des figures 15 et 16 présentent les mesures MEB des largeurs de lignes transparentes et opaques du réseau en fonction du paramètre FOC pour 3 durées de développement.

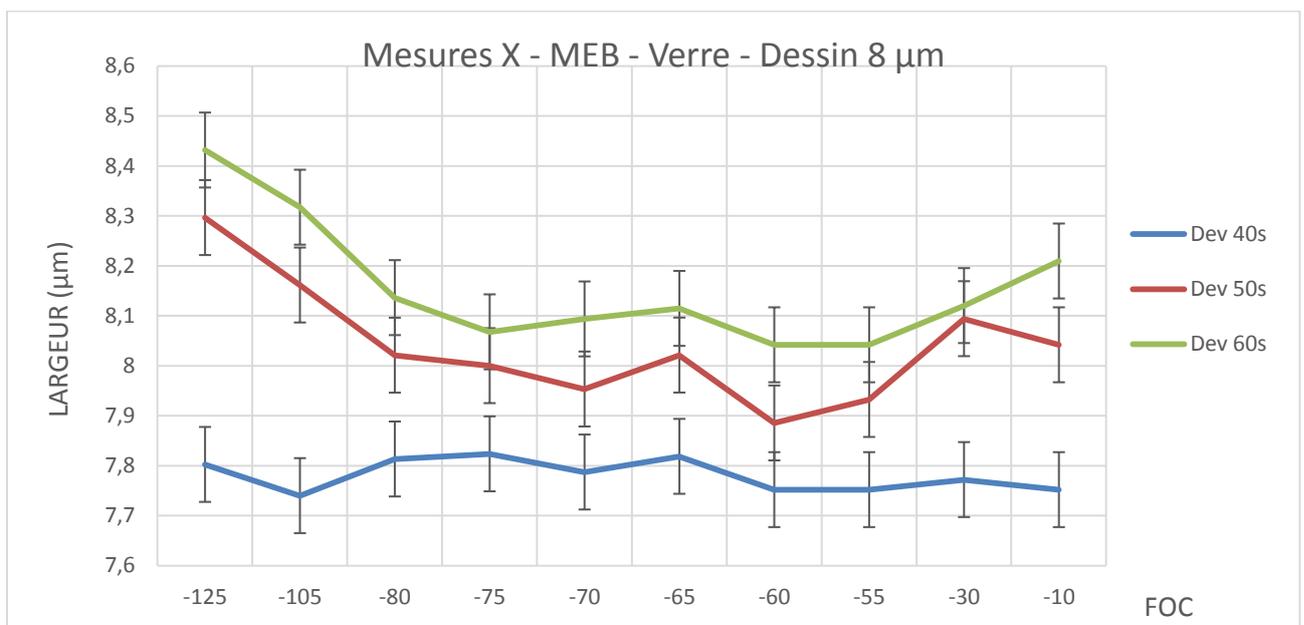


Figure 15 : Largeurs de lignes transparentes en fonction des paramètres FOC et durée de développement

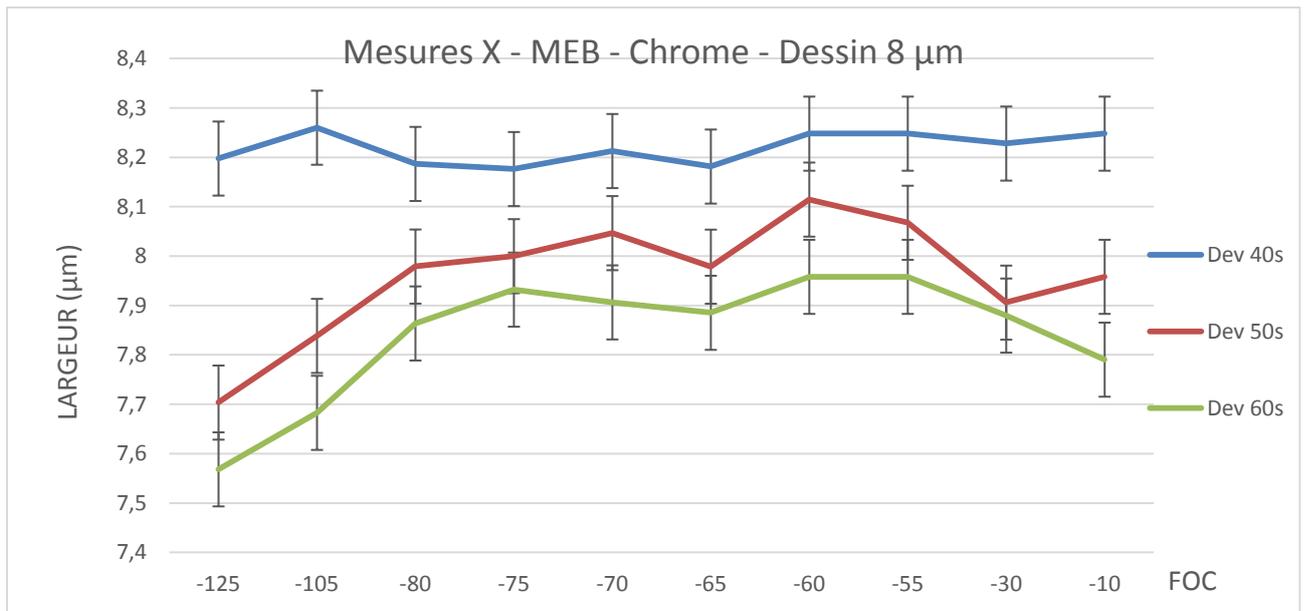


Figure 16 : Largeurs de lignes opaques en fonction des paramètres FOC et durée de développement

Les figures 17,18 et 19 sont des images MEB des damiers obtenus avec des durées de développement égales à 40, 50 et 60 secondes et une valeur FOC égale à -65.

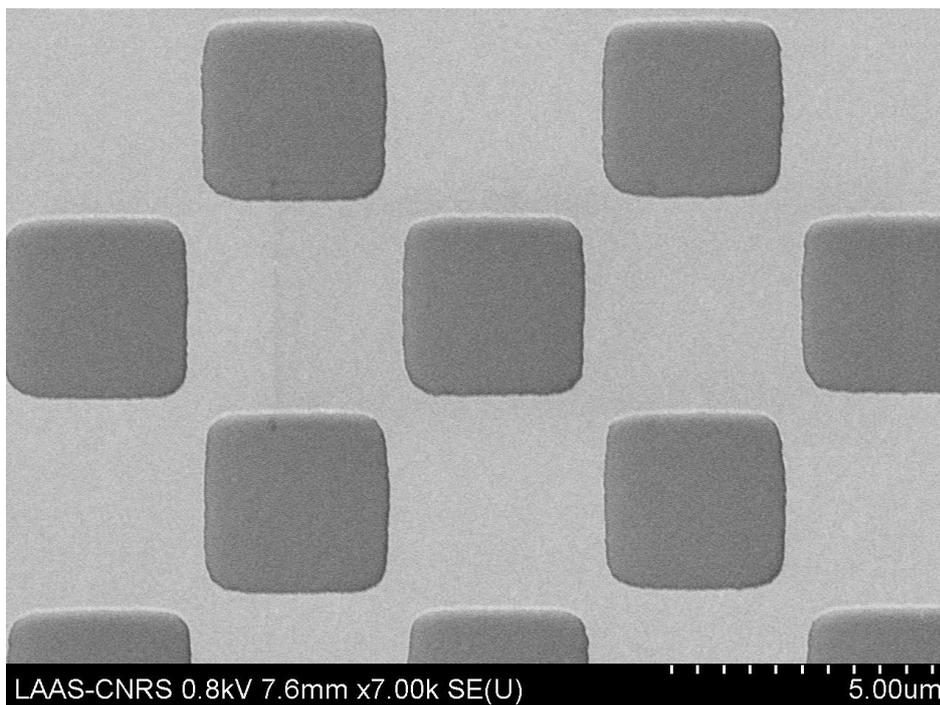


Figure 17 : image MEB, durée de développement 40 secondes

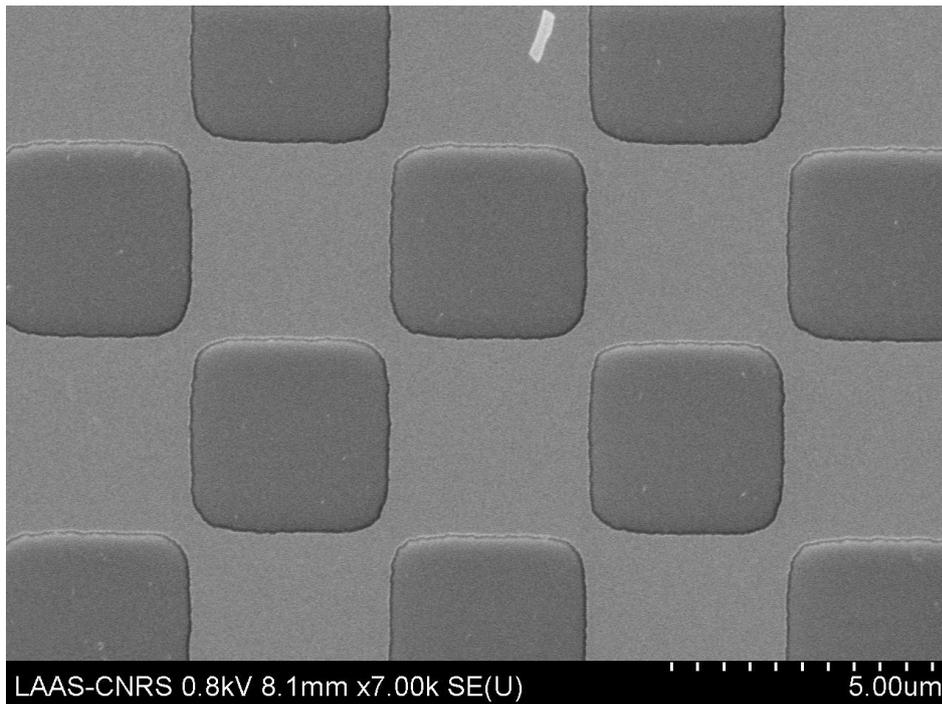


Figure 18 : image MEB, durée de développement 50 secondes

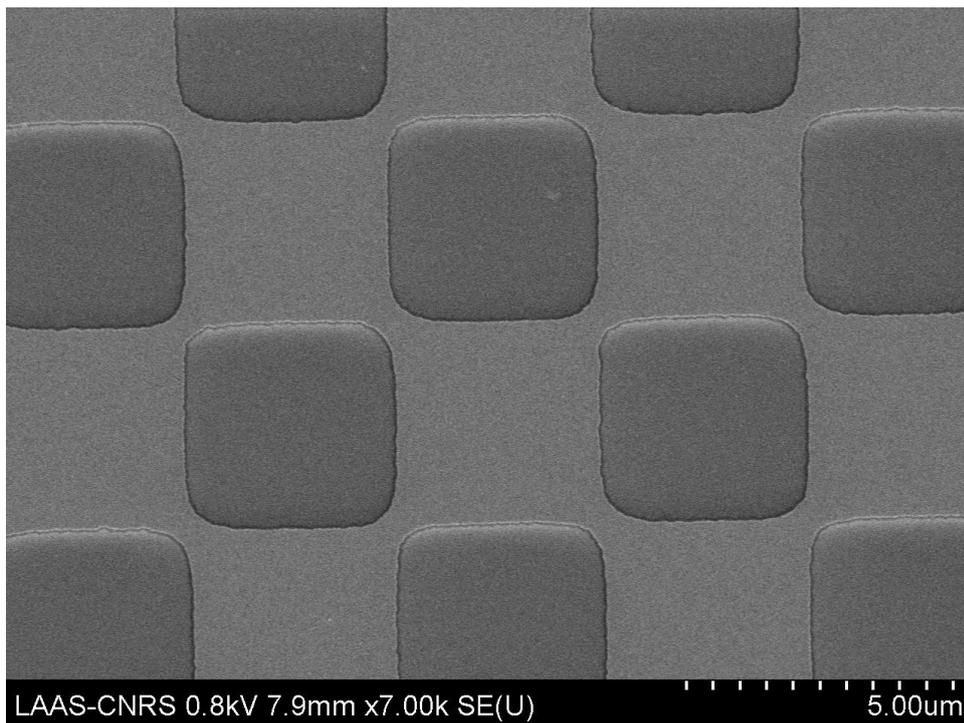


Figure 19 : image MEB, durée de développement 60 secondes

L'analyse des résultats nous permet de fixer la durée de développement à 50 secondes pour obtenir le meilleur respect des côtes.

Etude du respect des côtes pour différentes tailles de géométrie

Dans cette partie nous avons réalisé des géométries de type damier avec des formes carrées comprises entre 1.5 et 15 μm puis mesuré les largeurs des carrés en verre et chrome au MEB. Le graphique de la figure 20 présente les écarts relatifs mesurés en fonction des largeurs du dessin.

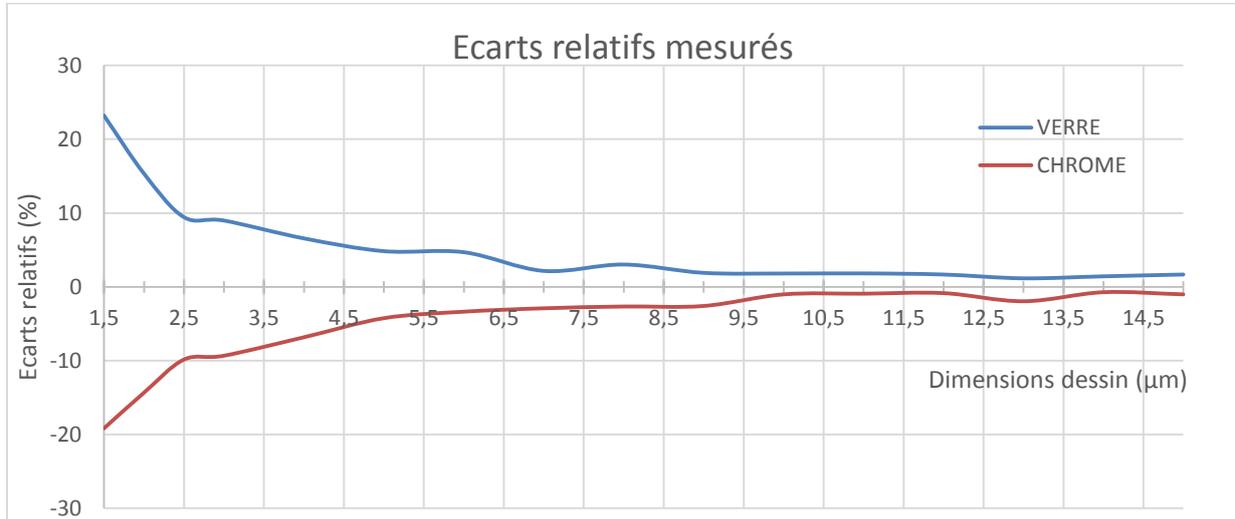


Figure 20 : Mesures relatives en fonction des dimensions du dessin pour des géométries de type damier

Pour des motifs de dimensions supérieures à 3 μm l'écart relatif avec la côte nominale du dessin est inférieure à 10 % et pour les motifs de dimensions supérieures à 7 μm l'écart relatif est inférieure à 3%.

Nous avons aussi réalisé cette étude avec des géométries de type réseau de lignes de largeurs comprises en 1 et 15 μm et des périodes égales au double de cette largeur. Les largeurs des lignes (CHROME) et des interlignes (VERRE) ont été mesurées au MEB. Le graphique de la figure 21 présente les écarts relatifs mesurés en fonction des largeurs du dessin.

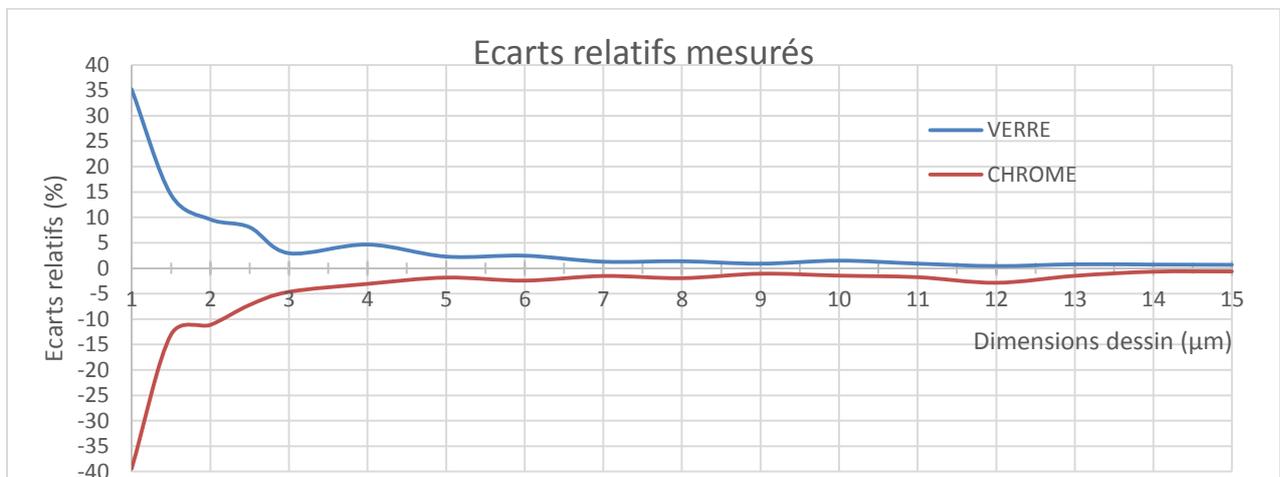


Figure 21 : Mesures relatives en fonction des dimensions du dessin pour des géométries de type réseau de lignes

Pour des motifs de dimensions supérieures à $3\ \mu\text{m}$ l'écart relatif avec la cote nominale du dessin est inférieure à 5 % et pour les motifs de dimensions supérieures à $5\ \mu\text{m}$ l'écart relatif est inférieure à 3%.

Cette étude nous permet de confirmer que pour obtenir un bon respect des côtes pour des géométries de petites dimensions (inférieures à $3\ \mu\text{m}$) il faut prévoir une correction des dimensions dans le fichier de conception des masques. Par exemple pour obtenir une forme de type disque chrome diamètre $2,5\ \mu\text{m}$ la correction de dimension nous impose de dessiner un disque de diamètre $2,75\ \mu\text{m}$ dans le fichier de conception. A l'inverse pour obtenir une ouverture transparente de diamètre $2,5\ \mu\text{m}$ la correction de dimension nous impose de dessiner un disque de diamètre $2,25\ \mu\text{m}$ dans le fichier de conception. Les tableaux en annexe 1 indiquent les corrections à appliquer au dessin pour obtenir des formes circulaires de différents diamètres et des lignes de différentes largeurs.

Conclusion

Les étapes critiques de la fabrication d'un masque sont associées à la mise en forme de la résine qui va définir les dimensions des motifs. Les paramètres d'insolation laser et les conditions de développement sont les facteurs qui influencent la mise en forme de la résine. Nous avons étudié l'effet de la variation du paramètre focus du système d'écriture laser et l'effet de la variation de durée de développement de la résine. Ces études nous ont permis de mettre en évidence que pour l'écriture de motifs de dimensions critiques il est nécessaire d'anticiper des corrections de dimensions lors de la conception du dessin si l'on souhaite optimiser le respect des côtes. Le résultat de ces observations et mesures nous a permis d'éditer des tableaux de correction.

Les résultats de ces études nous permettent d'agir sur ces paramètres pour compenser le vieillissement de l'équipement d'écriture et plus particulièrement de la source UV laser d'insolation. Tous les mois des motifs test sont contrôlés en bord de masques pour optimiser l'ajustement des paramètres influant sur la qualité de fabrication.

Annexe 1 : Tableaux des corrections à appliquer au dessin pour obtenir des formes circulaires de différents diamètres et des lignes de différentes largeurs.

Diamètre du disque (μm)	Diamètre corrigé d'un disque opaque (dimension du motif chrome en μm)	Diamètre corrigé d'un disque transparent (dimension de l'ouverture en μm)
2	2,50	1,50
2,1	2,55	1,65
2,2	2,60	1,80
2,3	2,65	1,96
2,4	2,70	2,10
2,5	2,75	2,25
2,6	2,85	2,35
2,7	2,96	2,44
2,8	3,07	2,53
2,9	3,17	2,63
3	3,28	2,72
3,2	3,48	2,92
3,4	3,67	3,13
3,6	3,87	3,33
3,8	4,07	3,53
4	4,27	3,73
4,2	4,46	3,94
4,4	4,64	4,16
4,6	4,83	4,37
4,8	5,02	4,58
5	5,21	4,79
5,2	5,41	4,99
5,4	5,61	5,19
5,6	5,80	5,40
5,8	6,00	5,60
6	6,19	5,81
6,2	6,39	6,01
6,4	6,59	6,21
6,6	6,78	6,42
6,8	6,98	6,62
7	7,18	6,82
7,2	7,37	7,03
7,4	7,56	7,24
7,6	7,76	7,44
7,8	7,95	7,65
8	8,14	7,86
8,2	8,33	8,07
8,4	8,52	8,28
8,6	8,70	8,50

8,8	8,90	8,70
9	9,08	8,92
9,2	9,26	9,14
9,4	9,46	9,34
9,6	9,64	9,56
9,8	9,82	9,78
10	10,01	9,99

Largeur de ligne (μm)	Largeur corrigée d'une ligne opaque (dimension du motif chrome en μm)	Largeur corrigée d'une ligne transparente (dimension de l'ouverture en μm)
2	2,25	1,75
2,1	2,33	1,87
2,2	2,40	2,00
2,3	2,47	2,13
2,4	2,55	2,25
2,5	2,63	2,38
2,6	2,73	2,47
2,7	2,83	2,57
2,8	2,93	2,67
2,9	3,04	2,76
3	3,14	2,86
3,2	3,34	3,06
3,4	3,54	3,26
3,6	3,74	3,46
3,8	3,94	3,66
4	4,14	3,86
4,2	4,33	4,07
4,4	4,52	4,28
4,6	4,72	4,49
4,8	4,91	4,69
5	5,11	4,90
5,2	5,30	5,10
5,4	5,50	5,30
5,6	5,70	5,50
5,8	5,90	5,70
6	6,10	5,90
6,2	6,30	6,10
6,4	6,49	6,31
6,6	6,69	6,51
6,8	6,89	6,71
7	7,09	6,91
7,2	7,29	7,11
7,4	7,48	7,32
7,6	7,68	7,52
7,8	7,87	7,73
8	8,07	7,93

8,2	8,27	8,13
8,4	8,46	8,34
8,6	8,65	8,55
8,8	8,85	8,75
9	9,04	8,96
9,2	9,23	9,17
9,4	9,43	9,37
9,6	9,62	9,58
9,8	9,81	9,79
10	10,01	10,00