



# Evaluation de Réticules Avancés : Propriétés optiques des réticules et prise en compte de leur processus de fabrication dans l'amélioration des modèles OPC pour étendre les fenêtres de procédés en lithographie optique par immersion, pour les noeuds technologiques 28nm et 14nm

Nacer Zine El Abidine

## ► To cite this version:

Nacer Zine El Abidine. Evaluation de Réticules Avancés : Propriétés optiques des réticules et prise en compte de leur processus de fabrication dans l'amélioration des modèles OPC pour étendre les fenêtres de procédés en lithographie optique par immersion, pour les noeuds technologiques 28nm et 14nm. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université Grenoble Alpes, 2017. Français. NNT : 2017GREAT079 . tel-01748516

**HAL Id: tel-01748516**

**<https://theses.hal.science/tel-01748516>**

Submitted on 29 Mar 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.

## **THÈSE**

Pour obtenir le grade de

### **DOCTEUR DE LA COMMUNAUTE UNIVERSITE GRENOBLE ALPES**

Spécialité : **Nano électronique et Nano Technologies**

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

**Nacer ZINE EL ABIDINE**

Thèse dirigée par **Isabelle SCHANEN**, Professeur, Institut de  
**Microélectronique Electromagnétisme et Photonique - Laboratoire  
d'Hyperfréquences et de Caractérisation (IMEP- LaHC)** et Co-Encadré  
par **Frank SUNDERMANN**, Expert Masques, Société **STMicroelectronics  
CROLLES**

Préparée au sein du **Laboratoire de Microélectronique  
Electromagnétisme et Photonique – Laboratoire d'Hyperfréquences et  
de Caractérisation (IMEP-LaHC)** et de la Société **STMicroelectronics  
CROLLES** dans l'Ecole Doctorale d'Electronique, Electrotechnique,  
Automatique et Traitement du Signal (EEATS)

## **Evaluation de Réticules Avancés**

Propriétés optiques des réticules et prise en compte de leur processus de fabrication dans l'amélioration des modèles OPC pour étendre les fenêtres de procédés en lithographie optique par immersion, pour les nœuds technologiques 28nm et 14nm.

Thèse soutenue publiquement le **28 novembre 2017**

Devant le jury composé de :

**Madame Panagiota MORFOULI**

Professeur, INPG, GRENOBLE, Présidente du Jury

**Madame Carole DEUMIE**

Professeur, Centrale Marseille, MARSEILLE, Rapportrice

**Monsieur Raphael CLERC**

Professeur, Institut d'Optique Graduate School, SAINT-ETIENNE, Rapporteur

**Monsieur Patrick SCHIAVONE**

Professeur Détaché CNRS, CEO ASELT, GRENOBLE, Examineur

**Madame Isabelle SCHANEN**

Professeur INPG, GRENOBLE, Directrice de thèse

**Monsieur Frank SUNDERMANN**

Expert Réticules, STMicroelectronics CROLLES, Encadrant Technique

**Monsieur Bertrand LE GRATIET**

Expert en photolithographie, STMicroelectronics CROLLES, Invité





*À la mémoire de mon Père,  
Dans les yeux de qui j'ai toujours brillé. . .*



# Remerciements

Il est très étrange d'achever son manuscrit par les remerciements... Cependant c'est une étape à laquelle j'ai eu vraiment très hâte d'arriver, et c'est vraiment peu dire...

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à Frank Sundermann, mon encadrant, pour son soutien sans faille à travers ces trois années de thèse. Franky ce fut très enrichissant de travailler avec quelqu'un de passionné par son travail et de rigoureux. Je te remercie aussi pour la patience dont tu as fait preuve pour me former et m'initier au monde des masques. Merci de m'avoir épaulé pendant nos confs-call en Japanglais, on a bien rigolé quand ça grognait de l'autre côté faute de mes nombreuses questions. Merci d'avoir eu confiance en moi pour arriver jusqu'au bout, surtout à travers cette dernière année qui fut émotionnellement difficile et pendant laquelle tu ne m'as pas lâché. Merci de m'avoir poussé à toujours faire mieux. Merci pour l'après thèse où là encore tu as été d'un soutien émérite. Tu es vraiment une très belle personne et je te souhaite le meilleur.

Je remercie ma Directrice de thèse, Isabelle Schanen, pour sa rigueur et la régularité dans le suivi de mon travail tout au long de ses trois années de thèse et au-delà. Merci à toi pour ton soutien, ta prise de recul et ta perspective sur mon travail. Merci à Jumana Boussey pour m'avoir soutenu et apporté son réconfort. Merci à vous deux pour vos mails bienveillant.

Je remercie la société STMicroelectronics Crolles et le laboratoire IMEP-LAHC pour m'avoir accueilli. Je remercie tout particulièrement Emek Yesilada et Jean Galvier pour m'avoir confié ces travaux. Merci à toi Emek pour tes conseils avisés sur l'orientation de ma thèse, tes blagues et tes discours mémorables, surtout celui du chardon. Merci à toi Vincent pour tes conseils simu et ta visu sur mon travail. Merci à Loïc et Jean-No de m'avoir si gentiment aidé avec simrunner et à remettre la ferme up après mes manip foireuse. Merci à toute l'équipe RET, à Catherine, Charlotte, Elodie, Estelle, Anna, Jojo, Fredouille, JC et JC, Vins, Alex, Gugu, Loïc et Loic, Pierrot, Guillaume, Franck et Sylvain pour m'avoir accordé du temps et répondu à toutes mes questions, merci à vous aussi pour les moments partagés à se faire des piques niques improvisés, merci aussi pour les gâteaux, les galettes et les

croissants, j'ai pris à peu près 6kg entre mon arrivé et mon départ ☺ ☺ ☺. Merci à vous pour votre bonne humeur quotidienne qui fait que l'on ne vient pas au boulot à reculons.

Je remercie mes camarades de fortunes thésard pour leur bienveillance à mon arrivé et les partages scientifiques et existentielle au café et ailleurs....Merci à vous Anna, Sylvain, JC et Loic.

Je remercie Serdar et Clyve pour m'avoir initié à la modélisation dédié au réticule, merci à Yorick et à son équipe de m'avoir accueilli au CEA et de m'avoir initié au Multi-beam.

Je remercie la Mentor Team, Jorge, Clément, Nassima, Ana, Omar, Fred et Alex pour les blaguounettes, les théories de 7h du mat et leurs disponibilités pour m'épauler dans mon travail. Un Merci tout particulier à toi Omar pour ton implication sérieuse dans ma partie Mask Model d'abord où tu as été patient pour m'apprendre à pêcher au lieu de me donner du poisson ☺ ☺ ☺, et pour un être devenu un ami cher par la suite. Merci à vous aussi Fred et Ana pour votre implication dans ce chapitre de ma thèse où votre aide a été précieuse.

Merci à la ASML-Brion Team, à Laurent, Raf, Nico et Chris pour leur implication dans ma partie Best Focus Shift Mitigation mais aussi pour le plaisir d'avoir partagé votre quotidien.

Merci à vous JD et Cédric de m'avoir dégagé du temps pour terminer ce manuscrit, cela aurait été très difficile de l'achever autrement.

Merci à vous Bilal et père Alex pour avoir partagé mon quotidien, on a bien rigolé !!! Merci aussi pour votre soutien et vos encouragements précieux, j'espère que l'on continuera à rigoler encore longtemps ensemble ;)

Merci à mon père et à ma mère de m'avoir toujours poussé à aller plus loin, de m'avoir encouragé et épauler. Vous avez toujours cru en moi et je vous dédie en partie mon travail. Merci à mon frère et mes sœurs d'avoir toujours été fier de moi. Merci à vous cinq de m'avoir toujours renvoyé une image de moi-même qui m'a poussé et me pousse toujours à aller de l'avant.

Merci à toi ma chérie, à qui je dédie l'autre partie de mon travail et l'aboutissement de tous ces efforts, après 10 années de vie commune tu es toujours resté confiante, d'un

soutien sans faille et à toute épreuve. Merci pour m'avoir soutenu dans mes moments de fatigue, de m'avoir encouragé dans mes moments de flemme, de m'avoir relu un nombre incalculable de fois et d'avoir toujours été là même quand j'en avais besoin sans le savoir ☺ ☺ ☺, surtout quand j'en avais besoin sans le savoir :p.

Merci à Madame Carole DEUMIE et Monsieur Raphael CLERC d'avoir accepté le rôle de rapporteur pour ma soutenance de thèse.

Merci à Madame Panagiota MORFOULI d'avoir accepté le rôle de présidente du jury.

Merci à Monsieur Patrick SCHIAVONE d'avoir accepté le rôle d'examineur.

Un grand Merci à toi Bertrand pour tes retours pertinents et la finesse de la relecture de mon manuscrit ☺.

Merci enfin à ceux que j'aurai oublié de nommer et qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Une thèse est autant une aventure humaine qu'une expérience scientifique et j'ai vécu l'une et l'autre avec beaucoup d'enthousiasme.

Danke euch allen !!!

# Glossaire

Masque : Réticule

Blank : Substrat du réticule

IDM : Integrated Device Manufacturer

Mask Shop ou Mask House : Fabricant de réticule

ITRS : International Technology Roadmap of Semiconductors

NGL : Next Generation Lithography

OPC : Optical Proximity Correction – Correction des effets de proximité optique

ORC : Optical Review Check – Revue des configurations critiques du design

MPC : Mask Process Correction

MPI : Mask Process Information

Ebeam : Faisceau d'électrons

Design : Dessin du circuit électrique

RET : Resolution Enhancement Technics – Techniques d'amélioration de la résolution

UBM : Ultimate Binary Masks – Masques Binaires Avancés

EaPSM : Embeded attenuated Phase Shift Mask – Réticule à décalage de phase atténué

OMOG : Opaque MoSi On Glass – type de réticule

COMS : Chrome On MoSi - type de réticule

SRAF : Sub Resolution Assist Features

NA : Numerical Aperture – Ouverture Numérique

$\lambda$  : Longueur d'onde de la source

Pitch : Pas de réseau

L&S : Line and Space

FEM : Focus Exposure Matrix – Matrice Dose Focus

DOF : Depth Of Focus – Profondeur de champs

EL : Exposure Latitude – Latitude en énergie

PW : Process Window – Fenêtre de procédé

ILS/NILS : Image Log Slope/Normalized Image Log Slope

MEF ou MEEF : Mask Error Factor ou Mask Error Enhancement Factor

FDTD : Finite Domain Time Difference

RCWA : Rigorous Coupled-Wave Analysis

PEC : Proximity Effect Correction

FEC : Fogging Effect Correction

LEC : Loading Effect Correction

TMA : Thin Mask Approximation ou Approximation de Kirchhoff

GDS : Graphic Data System, extension du fichier contenant le design

EWS : Ebeam Writing System

MDP : Mask Data Preparation – Préparation des données du réticule

## SOMMAIRE

Remerciements .....	4
Glossaire .....	7
Introduction Générale .....	22
Partie A Etat de l'art de la photolithographie optique.....	26
Introduction.....	27
I. Présentation du contexte de l'étude .....	28
1. La microélectronique et les transistors.....	28
2. Les étapes de fabrication d'un circuit CMOS .....	30
II. Principes de base de la lithographie optique.....	31
1. Les bases de la lithographie optique par projection-réduction.....	33
2. Le système d'illumination .....	34
3. Le réticule ou masque .....	36
4. Le système optique de projection.....	38
5. La couche de résine photosensible .....	39
6. La formation de l'image aérienne .....	40
7. Le contraste de l'image aérienne et son adaptation à la lithographie .....	41
III. Les principaux paramètres de la lithographie.....	43
1. La Matrice DOSE/FOCUS, ou le paramétrage de la dose nominale et du focus nominal.....	43
2. La Latitude en énergie.....	45
3. La profondeur de champs .....	46
4. Le facteur d'erreur du réticule .....	46
IV. Les techniques d'améliorations de la performance lithographique.....	47
1. Amélioration de la résolution : le système d'illumination.....	48
2. RET : partie Masque .....	52
3. RET : partie Scanner et résine .....	55
4. Les effets de proximité optique et la correction de ces effets. ....	56
5. Construction d'un modèle OPC.....	58
a. Principes de bases .....	58
b. Le modèle optique .....	59
c. Les hypothèses et limites du modèle optique .....	61
V. La problématique .....	62

1.	Perte de PW liée au réticule.....	62
2.	Prise en compte rigoureuse des effets liés au réticule .....	63
VI.	Conclusion .....	65
Partie B Réduction des effets de focalisation en fonction du pas de réseau visé via l'optimisation des paramètres du masque .....		66
Introduction.....		67
I.	Etat des lieux : Perte sur la fenêtre de procédé & best focus shift .....	68
II.	Mise en évidence des phénomènes liés à notre problématique.....	71
1.	Définition de la notion de Best Focus .....	72
a.	Le Best Focus pour le lithographe .....	72
b.	Le Best Focus pour l'OPC.....	72
c.	Le Best Focus Shift : un phénomène de plus en plus prépondérant .....	73
2.	La prise en compte de la déformation du front d'onde : Le module FlexWave .....	74
3.	La prise en compte de l'épaisseur de l'absorbeur du réticule sur le trajet optique .	76
a.	Choix des structures 1D et 2D .....	78
b.	Approche d'Hopkins : la formation de l'image aérienne .....	79
i.	Obtention de l'intensité de l'image aérienne .....	79
ii.	Détermination du coefficient de transmission complexe.....	80
iii.	Obtention des surfaces de recouvrement normalisées en fonction du pas de réseau .....	81
iv.	Exploitation des résultats .....	83
c.	Conclusion .....	83
d.	Les méthodes rigoureuses .....	84
i.	La méthode FDTD .....	84
ii.	La méthode RCWA.....	84
iii.	Conclusion sur la méthode à utiliser .....	85
4.	Les paramètres de simulation (liés au simulateur et au scanner) .....	85
a.	Les paramètres de simulation liés aux éléments matériels.....	85
i.	Le réticule .....	85
ii.	Le scanner.....	87
iii.	L'empilement sous la résine.....	87
b.	Les paramètres de simulation liés au modèle physique .....	88
i.	La source.....	88
ii.	Choix des angles d'incidence des coefficients de diffraction non constants.....	89
iii.	Choix du pas de maillage en z et en x/y .....	89

5.	Résultats de la simulation .....	91
a.	Préambule .....	91
b.	Les structures 1D.....	92
c.	Conclusion sur les résultats 1D .....	93
d.	Les structures 2D.....	93
i.	Structure Golden Hotspot .....	94
i.	Structure Neck ou cou.....	94
ii.	Structure Neck ou Cou .....	95
e.	Conclusion sur la partie simulation.....	95
III.	Les résultats plaquettes .....	96
1.	Structures 1D, exploitation des résultats et méthodologie d'exploitation .....	96
a.	Pas de réseau de 90nm .....	97
i.	Courbes de Bossungs.....	97
ii.	Fenêtre de procédé .....	98
iii.	Conclusion .....	99
b.	Pas de réseau de 120nm .....	99
i.	Courbes de Bossungs.....	99
ii.	Fenêtre de procédé .....	100
iii.	Conclusion .....	101
c.	Pas de réseau de 200nm .....	101
i.	Courbes de Bossungs.....	101
ii.	Fenêtre de procédé .....	102
iii.	Conclusion .....	103
d.	Conclusion pour les structures 1D .....	103
2.	Structures 2D.....	105
a.	Les Courbes de Bossungs et le best focus pour les structures 2D .....	105
b.	Le Bossung tilt ou la dépendance du best focus à la dose.....	106
3.	Mise à jour de la méthodologie d'exploitation des résultats sur plaquette.....	107
a.	La sensibilité à la dose.....	107
i.	Tracé des courbes de variation de CD en fonction de la dose.....	108
ii.	Filtrage des données .....	109
iii.	Mise en place d'un intervalle de confiance .....	110
iv.	Tracé de la courbe de variation de la sensibilité à la dose en fonction du focus ...	111
v.	Récapitulatif de la méthodologie appliquée .....	113
vi.	Résultats .....	113



b.	La criticité des hotspots 2D et validation de l'apport du EaPSM par rapport à L'OMOG .....	115
4.	Conclusion .....	118
IV.	Comparaison EaPSM standard et EaPSM optimisé .....	119
1.	Variabilité liée à la fabrication des réticules .....	119
2.	Vérification en simulation de la variabilité des paramètres du réticule inhérent à sa conception.....	121
a.	Description des différents réticules de type EaPSM sélectionnés pour la simulation .....	121
b.	Paramètres de simulation et description des motifs choisis pour la vérification...	121
c.	Résultats de la simulation .....	122
i.	Structures 1D.....	122
ii.	Structure 2D .....	123
3.	Conclusion .....	124
V.	Conclusion .....	125
	Partie C .....	128
	Création d'un modèle de réticule .....	128
I.	Introduction.....	129
II.	Du procédé de fabrication des réticules avancés au modèle de réticule .....	131
1.	Fabrication du blank.....	131
2.	Transfert des motifs du design sur le réticule.....	133
a.	La préparation de données .....	133
b.	La machine d'écriture à faisceau d'électrons.....	134
i.	Principe de fonctionnement.....	134
ii.	Les effets de la machine d'écriture à faisceau d'électrons .....	136
3.	La prise en compte des effets physiques lors de l'écriture sur réticule .....	139
a.	Les effets liés à la préparation de données.....	139
i.	Le "Grid Snapping" ou l'adaptation de la grille aux motifs .....	139
ii.	Le "Scanfield Stitching" ou la superposition des motifs par rapport au champ d'exposition.....	140
b.	Les effets liés à la tension d'accélération du faisceau d'électrons primaires .....	141
i.	Les effets de proximité optique ou PEC .....	141
ii.	Les effets de nuage électronique ou FEC .....	145
iii.	L'élargissement du faisceau incident ou Beam Blur .....	146
c.	Les effets de charge liés à la phase d'écriture et à la technique de gravure.....	147
d.	Conclusion .....	148

4.	La calibration du modèle de réticule.....	150
a.	Les structures de calibration .....	151
b.	Le protocole d'écriture et de mesure .....	153
c.	La création du modèle et validation .....	154
i.	Description de l'outil de calibration MPC Center et du processus de calibration ..	154
ii.	Analyse de la qualité de l'écriture sur réticule.....	156
iii.	Le modèle de réticule retenu. ....	157
5.	Conclusion .....	161
III.	Le flow de correction.....	161
1.	Le modèle ORC .....	161
a.	La prise en compte des effets de fabrication du réticule dans le modèle ORC .....	161
b.	Le second réticule dédié à la calibration du nouveau modèle ORC.....	164
2.	Calibration des deux modèles ORC et comparaison .....	165
a.	Calibration du modèle optique et résine .....	166
i.	Le modèle optique .....	166
ii.	Le modèle résine .....	166
b.	Résultats de la calibration des modèles.....	167
c.	Comparaison des modèles ORC entre eux.....	168
i.	Précision des modèles lors de variation de CD et de pas de réseau.....	168
ii.	Comportement des modèles ORC à travers la fenêtre de procédé.....	170
d.	Conclusion .....	171
IV.	Validation/rejet de la prise en compte rigoureuse des effets du procédé de fabrication des réticules .....	172
1.	Méthodologie d'obtention des contours .....	172
2.	Comparaison des contours simulés par rapport aux images obtenues sur plaquettes .....	172
3.	Conclusion .....	176
V.	Conclusion et Ouverture .....	177
	Bibliographie .....	184
	Conférences avec publications.....	188
	Publications .....	188
	Résumé.....	189
	Abstract .....	189

## TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Architecture d'un transistor MOS. A gauche un transistor PMOS et à droite un NMOS .....	28
Figure 2 : Représentation du fonctionnement électrique d'un transistor NMOS. Si on applique une tension sous la grille on attire les électrons minoritaires du caisson sous l'Oxyde de Grille. La circulation d'électrons a lieu lorsque l'on applique ensuite une tension entre la source et le drain. ....	29
Figure 3 : Exemple de filière CMOS.....	30
Figure 4 : Etape clé du procédé de photolithographie optique .....	32
Figure 5 : Lithographie optique par contact (1) et par proximité (2) .....	32
Figure 6 : Lithographie optique par projection sans réduction. ....	33
Figure 7 : Système de projection utilisé en lithographie optique .....	34
Figure 8 : Système d'illumination de type Köhler .....	35
Figure 9 : Description du facteur de cohérence spatiale partielle.....	36
Figure 10 : Définition des deux facteurs de cohérence partielle pour une source annulaire ...	36
Figure 11 : Structure schématique d'un masque optique de 6 pouces x 6 pouces.....	37
Figure 12 : Illustration de la polarité d'un masque : à gauche un masque en champ clair, à droite un masque en champ obscur .....	37
Figure 13 : Influence de la polarité d'un masque sur un niveau contact 22nm. Les contacts sont mieux définis et plus régulier sur le réticule de type Light Field.....	38
Figure 14 : Illustration de l'ouverture numérique dans un système d'illumination de type Köhler .....	39
Figure 15 : Motifs après développement dans le cas d'une résine positive et négative.....	39
Figure 16 : Représentation schématique du système de projection optique et du filtrage des ordres de diffraction par la pupille. ....	40
Figure 17: Représentation des deux premiers ordres de diffractions dans le plan de la pupille pour une source annulaire de longueur d'onde $\lambda$ , d'ouverture numérique NA et de pas de réseau P.....	41
Figure 18 : Illustration du calcul du contraste en fonction de l'intensité de l'image .....	42
Figure 19 : illustration d'une matrice Dose /Focus réalisée sur plaquette. Le Champ en bleu correspond au point de fonctionnement paramétré par l'opérateur. ....	44
Figure 20 : Exemple de matrice Dose /Focus réalisée pour une structure. ....	44
Figure 21 : Illustration de la détermination du Best Focus et de la dose nominale. ....	45
Figure 22 : Exemple de courbe $EL_{CD}=f(DOF)$ , pour une structure Line & Space de pas 100nm et de $CD_{ligne}=50nm$ .....	45
Figure 23 : Description de la profondeur de champs par rapport au profil résine.....	46
Figure 24 : Descriptif des techniques d'amélioration de la résolution en fonction du parcours optique de la source au substrat .....	48
Figure 25 : Principe de l'illumination hors axe .....	49
Figure 26 : Surface de recouvrement entre les ordres de diffractions captés par la pupille. Cas d'une source conventionnelle de longueur d'onde $L$ , pour un pas $P$ , avec les ordres -1, 0 et +1. ....	49
Figure 27 : Exemple de sources classiques utilisées en photolithographie .....	50
Figure 28 : Exemple de sources paramétrées. A gauche deux contributions : Annulaire, $I = 1$ , $\sigma_{in} = 0.6$ , $\sigma_{out} = 0.7$ ; Cquad, $I = 0.5$ , $\sigma_{in} = 0.8$ , $\sigma_{out} = 0.95$ , angle d'ouverture = $20^\circ$ . A droite quatre contributions : Annulaire, $I = 1$ , $\sigma_{in} = 0.6$ , $\sigma_{out} = 0.7$ ; Cquad, $I = 0.5$ , $\sigma_{in} = 0.8$ , $\sigma_{out} = 0.95$ , angle	

<i>d'ouverture = 20° ; Cquad, <math>I = 0.8</math>, <math>\sigma_{in} = 0.4</math>, <math>\sigma_{out} = 0.6</math>, angle d'ouverture = 30°; Quasar <math>I = 7</math>, <math>\sigma_{in} = 0.9</math>, <math>\sigma_{out} = 1</math>, angle d'ouverture = 30°.....</i>	<i>51</i>
<i>Figure 29 : Exemple de sources dites pixélisées. ....</i>	<i>51</i>
<i>Figure 30 : Principe du décalage de phase dans un PSM atténué (détails dans la suite du document). Ici la différence de phase est de <math>\lambda/2</math>.....</i>	<i>53</i>
<i>Figure 31 : Schéma illustrant une comparaison entre les intensités lumineuses obtenues avec un masque binaire et divers masques à décalage de phase .....</i>	<i>54</i>
<i>Figure 32: Illustration du principe de double exposition .....</i>	<i>55</i>
<i>Figure 33 : Représentation des principales corrections apportées par l'OPC. ....</i>	<i>57</i>
<i>Figure 34 : Illustration du processus itératif de correction des effets de proximité optique basée sur l'utilisation de modèles mathématiques. ....</i>	<i>58</i>
<i>Figure 35 : Vue globale du flux de correction utilisé à STMicroelectronics.....</i>	<i>63</i>
<i>Figure 36 : Différence de Best Focus illustrée dans la hauteur de résine pour trois réseaux 1D différents. ....</i>	<i>68</i>
<i>Figure 37 : Cycle de fabrication et d'utilisation des réticules.....</i>	<i>69</i>
<i>Figure 38 : Matrice Dose/Focus utilisée pour la détermination du Best Focus.....</i>	<i>72</i>
<i>Figure 39 : Détermination du Best Focus à partir des courbes de Bossung .....</i>	<i>73</i>
<i>Figure 40 : Schéma de présentation du module FlexWave permettant de compenser les déformations du front d'onde .....</i>	<i>74</i>
<i>Figure 41 : Tracé des 64 premiers polynômes de Zernike sur le disque .....</i>	<i>75</i>
<i>Figure 42 : Illustration permettant de saisir le lien entre Best Focus, M2D et M3D .....</i>	<i>77</i>
<i>Figure 43 : Cellule contenant les motifs de test embarqués sur le réticule de type OMOG.....</i>	<i>78</i>
<i>Figure 44 : Structures 1D et 2D choisies pour l'étude comparative entre EaPSM et OMOG ...</i>	<i>78</i>
<i>Figure 45 : Schéma simplifié d'un équipement d'exposition optique utilisant une source annulaire.....</i>	<i>79</i>
<i>Figure 46 : Représentation schématique de l'empilement d'un réticule de type EaPSM en configuration monocouche. En rouge l'onde ne traversant que le quartz, et en bleu l'onde traversant le quartz et la couche en alliage de MoSi .....</i>	<i>80</i>
<i>Figure 47 : Détermination des surfaces de recouvrement S1 et S2 pour <math>NA/2 &lt; \lambda/P &lt; NA</math>.....</i>	<i>81</i>
<i>Figure 48 : Détermination des surfaces de recouvrement S1, S2 et S3 pour <math>\lambda/P &lt; NA/2</math>.....</i>	<i>81</i>
<i>Figure 49 : Evolution des surfaces de recouvrement S1, S2 et S3 normalisées par rapport à la pupille en fonction du pas de réseau P.....</i>	<i>82</i>
<i>Figure 50 : Courbe de variation de contraste, de NILS et de MEEF pour une structure 1D de type L&amp;S en fonction du taux d'ouverture <math>\beta</math>, pour des pas de réseau de 90nm, 120nm et 200nm.</i>	<i>83</i>
<i>Figure 51 : Coupe représentative d'un réticule de type OMOG et EaPSM illustrant les couches de matériau qui composent les deux réticules. ....</i>	<i>86</i>
<i>Figure 52 : Configuration des couches et des profils du réticule dans le HyperLith® .....</i>	<i>87</i>
<i>Figure 54 : Configuration de l'empilement plaquette en configuration "infinite stack" prise pour notre étude.....</i>	<i>88</i>
<i>Figure 55 : Source configurée dans le simulateur. A droite la cartographie en intensité de la source annulaire utilisée, à gauche la représentation dans l'espace de Fourier .....</i>	<i>88</i>
<i>Figure 56 : Paramétrages des angles d'incidence pour les coefficients de diffraction non constants utilisés dans HyperLith® pour la source annulaire utilisée pour nos simulations. ....</i>	<i>89</i>
<i>Figure 57 : Paramétrage du pas de maille selon l'axe z dans le simulateur HyperLith® et des couches de matériau qui composent le réticule.....</i>	<i>90</i>
<i>Figure 58 : Paramétrage du plan image Zimg et du plan de mesure Zmeasure dans le simulateur HyperLith® .....</i>	<i>90</i>

Figure 59 : Courbe de variation de contraste, de NILS et de MEEF pour une structure 1D de type L&S en fonction du défocus, pour des pas de réseau de 90nm, 120nm et 200nm. ....	92
Figure 60 : Fenêtres de procédés communes aux structures 1D (pas de réseau 90nm, 120nm, et 200nm) obtenues pour chacun des deux réticules étudiés. ....	93
Figure 61 : A gauche : Courbe de variation de contraste et de NILS pour la structure de type Golden Hotspot ; A droite : Tracé de la fenêtre de procédé comparative entre les réticules de type EaPSM et OMOG (UBM).....	94
Figure 62 : A gauche : Courbe de variation de contraste et de NILS pour la structure de type Neck ; A droite : Tracé de la fenêtre de procédé comparative entre les réticules de type EaPSM et OMOG (UBM).....	95
Figure 63 : Courbes de Bossungs obtenues pour un pas de réseau de 90nm sur le site 15. A droite les résultats pour le réticule de type eaPSM, le best focus est de -102nm. A gauche les résultats pour le réticule de type OMOG, le best focus est de -104nm.....	97
Figure 64 : Courbes de Bossungs obtenues pour un pas de réseau de 90nm sur le site 24. A droite les résultats pour le réticule de type eaPSM, le best focus est de -103nm. A gauche les résultats pour le réticule de type OMOG, le best focus est de -90nm.....	97
Figure 65 : Tracé de la fenêtre de procédé pour le pas de réseau de 90nm sur le site 15. A droite les résultats pour le réticule de type eaPSM, avec une DOF de 210nm et une EL de 3mJ. A gauche les résultats pour le réticule de type OMOG, avec une DOF de 135nm et une EL de 2.5mJ. ....	98
Figure 66 : Tracé de la fenêtre de procédé pour le pas de réseau de 90nm sur le site 24. A droite les résultats pour le réticule de type eaPSM, avec une DOF de 190nm et une EL de 2.5mJ. A gauche les résultats pour le réticule de type OMOG, avec une DOF de 160nm et une EL de 2.5mJ. ....	98
Figure 67 : Courbes de Bossungs obtenues pour le pas de réseau de 120nm sur le site 15. A droite les résultats pour le réticule de type eaPSM, le best focus est de -103nm. A gauche les résultats pour le réticule de type OMOG, le best focus est de -90nm.....	99
Figure 68 : Courbes de Bossungs obtenues pour le pas de réseau de 120nm sur le site 24. A droite les résultats pour le réticule de type eaPSM, le best focus est de -100nm. A gauche les résultats pour le réticule de type OMOG, le best focus est de -86nm.....	100
Figure 69 : Tracé de la fenêtre de procédé pour le pas de réseau de 120nm sur le site 15. A droite les résultats pour le réticule de type eaPSM, avec une DOF de 120nm et une EL de 3.5mJ. A gauche les résultats pour le réticule de type OMOG, avec une DOF de 110nm et une EL de 2.5mJ. ....	100
Figure 70 : Tracé de la fenêtre de procédé pour le pas de réseau de 120nm sur le site 24. A droite les résultats pour le réticule de type eaPSM, avec une DOF de 130nm et une EL de 3.3mJ. A gauche les résultats pour le réticule de type OMOG, avec une DOF de 90nm et une EL de 3mJ. ....	101
Figure 71 : Courbes de Bossungs obtenues pour le pas de réseau de 200nm sur le site 15. A droite les résultats pour le réticule de type eaPSM, le best focus est de -104nm. A gauche les résultats pour le réticule de type OMOG, le best focus est de -94nm.....	101
Figure 72 : Courbes de Bossungs obtenues pour le pas de réseau de 200nm sur le site 24. A droite les résultats pour le réticule de type eaPSM, le best focus est de -107nm. A gauche les résultats pour le réticule de type OMOG, le best focus est de -90nm.....	102
Figure 73 : Tracé de la fenêtre de procédé pour le pas de réseau de 200nm sur le site 15. A droite les résultats pour le réticule de type eaPSM, avec une DOF de 130nm et une EL de 6mJ.	

A gauche les résultats pour le réticule de type OMOG, avec une DOF de 120nm et une EL de 4mJ. ....	102
Figure 74 : Tracé de la fenêtre de procédé pour le pas de réseau de 200nm sur le site 24. A droite les résultats pour le réticule de type eaPSM, avec une DOF de 130nm et une EL de 5mJ. A gauche les résultats pour le réticule de type OMOG, avec une DOF de 110nm et une EL de 4mJ. ....	103
Figure 75 : Comparaison graphique des fenêtres de procédé globales des structures 1D entre le réticule de type EaPSM et le réticule de type OMOG .....	104
Figure 76 : Exemple de courbe de Bossungs présentant une variation de point d'inflexion en fonction de la dose d'exposition.....	105
Figure 77 : Courbe de variation de CD en fonction de la dose pour une structure 1D de pas de réseau 200nm pour un réticule de type OMOG .....	108
Figure 78 : Variation de la sensibilité à la dose en fonction de la dose d'exposition pour trois procédés de recuit de résine.....	108
Figure 79 : Variation de CD en fonction de la dose pour une ligne isolée en rouge, une ligne dense ou une tranchée isolée. ....	109
Figure 80 : Variation de CD plaquette en fonction du biais introduit sur réticule pour la résine utilisée pour le niveau METAL28nm. ....	109
Figure 81 : Illustration d'un point atypique sur la courbe de variation du CD en fonction de la dose d'exposition pour une structure 1D de type L&S de pas de réseau 200nm avec un réticule de type OMOG.....	109
Figure 82 : Exemple de configuration pour laquelle la valeur de sensibilité à la dose ne sera pas prise en compte. ....	110
Figure 83 : Exemple de configuration où le point de sensibilité à la dose n'est pas pris en compte dû à un intervalle de confiance inadéquat. ....	111
Figure 84 : Superposition de courbe de régression polynomiale pour la détermination du Best Focus. Exemple donné pour une structure 1D de type L&S de pas de réseau 200nm pour le réticule de type OMOG.....	112
Figure 85 : Histogramme représentant l'écart de Best Focus (i.e. Best Focus Shift) par rapport à la structure 1D de type L&S de pas de réseau de 90nm.....	114
Figure 86 : Représentation de la mise en perspective des fenêtres de procédé obtenues via l'étude 1D avec la cartographie des images 2D obtenues avec le MEB.....	115
Figure 87 : Comparaison de la criticité de la structure "Golden Hotspot" sur la fenêtre de procédé 1D défini pour le réticule EaPSM à gauche et pour le réticule OMOG à droite. Les images en rouge correspondent à des conditions de procédé (Dose & Focus) non résolues pour les structures 1D et 2D. En Jaune les images correspondant aux conditions de procédé pour lesquelles seules les structures 1D sont résolues. En vert les conditions pour lesquelles les structures 1D ET 2D sont résolues. ....	116
Figure 88 : Comparaison de la criticité de la structure "Neck" sur la fenêtre de procédé 1D défini pour le réticule EaPSM à gauche et pour le réticule OMOG à droite. Les images en rouge correspondent à des conditions de procédé (Dose & Focus) non résolues pour les structures 1D et 2D. En Jaune les images correspondant aux conditions de procédé pour lesquelles seules les structures 1D sont résolues. En vert les conditions pour lesquelles les structures 1D ET 2D sont résolues.....	117
Figure 89 : Comparaison de la criticité de la structure "Bridge" sur la fenêtre de procédé 1D défini pour le réticule EaPSM à gauche et pour le réticule OMOG à droite. Les images en rouge correspondent à des conditions de procédé (Dose & Focus) non résolues pour les structures 1D	

et 2D. En Jaune les images correspondant aux conditions de procédé pour lesquelles seules les structures 1D sont résolues. En vert les conditions pour lesquelles les structures 1D ET 2D sont résolues.....	117
Figure 90 : Paramètres et configurations du simulateur HyperLith® utilisé pour l'étude de l'impact de la variabilité des paramètres du réticule d'un point de vue résolution lithographique .....	122
Figure 91 : Etude des profils résine obtenus en fonction du défocus pour les six cas d'étude identifiés, et pour une structure 1D de type Line&Space en configuration dense, semi-dense et isolée pour une ligne de 45nm sur plaquette. ....	123
Figure 92 : Structure 2D de type Contact en configuration en quinconce. Les dimensions sont précisées en dimension plaquette .....	124
Figure 93 : Etude des profils résine obtenus en fonction du défocus pour les six cas d'étude identifiés, pour une structure 2D de type Contact de 45nm (dimension plaquette 1X).....	124
Figure 94 : Exemple de structure présentant des arrondissements de coins et des raccourcissements de fin de ligne .....	129
Figure 95 : Vue globale du flux de correction utilisé à STMicroelectronics.....	130
Figure 96 : Description du cycle de fabrication des réticules en fonction des intervenants. .	131
Figure 97 : Exemple de configuration d'une chambre de dépôt utilisée en pulvérisation cathodique réactive.....	132
Figure 98 : Variation de la microstructure en fonction de la température relative du substrat par rapport à la température de fusion du matériau déposé et de la pression partielle d'argon dans la chambre de dépôt.....	132
Figure 99 : Contrôle de la stœchiométrie du dépôt en fonction de la pression partielle d'azote dans la chambre de dépôt.....	133
Figure 100 : Schéma représentatif d'une machine d'écriture à faisceau d'électrons utilisée pour les réticules avancés. ....	135
Figure 101 : a) Principe de fonctionnement du module VSB ; b) Exemple de forme préformée avec le VSB.....	136
Figure 102 : influence de la tension d'accélération par rapport au phénomène d'électrons transmis. Influence de la tension d'accélération sur la distribution d'énergie dans la hauteur de résine. ....	138
Figure 103 : influence de la tension d'accélération par rapport au phénomène d'électrons rétrodiffusés, obtenu via simulation basée sur la méthode de Monte-Carlo. Influence de la tension d'accélération sur la distribution d'énergie dans la hauteur de résine. ....	138
Figure 104 : Représentation des différents type d'interactions électrons / matière .....	139
Figure 105 : Exemple de définition standard d'un polygone sur une grille via un set de coordonnées centrales et de largeurs de motifs LM .....	140
Figure 106 : Illustration de la trajectoire des électrons lors de l'exposition utilisant une tension d'accélération de 50kV via l'utilisation d'une simulation de Monte-Carlo .....	141
Figure 107 : Effets sur la dimension des motifs provoqués par les effets de proximité .....	142
Figure 108 : Exemple de PSF comportant 3 Gaussiennes, permettant de prendre en compte le comportement des électrons à courte, moyenne et longue distance du point d'impact du faisceau d'électrons.....	143
Figure 109 : Cartographie de densité de motif 2D(a) et 3D(b).....	144
Figure 110 : Résultats de convolution entre une PSF et la cartographie de densité de motifs, permettant de visualiser la modulation de dose. Entre la figure a et b on a simplement réalisé un échantillonnage pour la cartographie de la densité des motifs moins agressifs. ....	144

Figure 111 : Illustration du Fogging Effect ou nuage électronique lors de l'étape d'écriture du réticule.....	145
Figure 112 : Principe du dispositif anti-rélectif placé sous la dernière lentille de l'objectif de la machine d'écriture.....	145
Figure 113 : Bloc de calibration contenant quatre structures de mesures réparties dans chaque coin de la zone utile sur réticule. ....	146
Figure 114 : Gaussienne représentative de la dispersion des électrons impliqués dans l'effet beam blur. On définit ainsi à 10nm l'influence du beam blur autour du point d'impact.....	147
Figure 115 : A Gauche : exemple de polygones permettant d'obtenir une forme complexe. A droite, variation de focus aux extrémités d'un polygone. Source : Mentor Graphics.....	147
Figure 116 : Schéma représentatif de tous les effets impliqués lors des phases d'écriture et de gravure du réticule .....	149
Figure 117 : Comparaison des différentes méthodes de corrections à partir d'images obtenues pour quatre structures de type Line-End to Line-End. A gauche les structures ayant subi une simple modulation de dose (DM), au centre les structures ayant subi correction géométrique seulement et à droite les structures ayant subi une modulation de dose et correction géométrique (DMG). ....	150
Figure 118 : Vue d'ensemble des trois blocs de motifs embarqués sur le réticule de calibration .....	151
Figure 119 : Configuration des structures de calibrations contenues dans le bloc "Mask Model Calibration Test Pattern" .....	152
Figure 120 : Caractéristiques du bloc de structures permettant de vérifier l'uniformité CD à la surface du réticule. ....	152
Figure 121 : Image du réticule final envoyé à la Mask Shop pour les phases d'écriture, de gravure et de mesure. ....	153
Figure 122 : Extrait du tableau contenant les points de mesure réalisés par la MaskShop ..	154
Figure 123 : Description des noyaux Gaussiens (à gauche) et Visible (à droite).....	155
Figure 124 : Processus de calibration du modèle de réticule .....	155
Figure 125 : Cartographie représentant l'uniformité CD du réticule MSKMODELS001 .....	156
Figure 126 : Densité de motifs sur la zone utile du réticule de calibration MSKMODELS001	157
Figure 127 : extrait du fichier modèle ebeam contenant les paramètres du modèle. On retrouve un modèle contenant 2 gaussiennes. ....	157
Figure 128 : extrait du fichier modèle VEB contenant les paramètres du modèle. On retrouve un modèle contenant 2 noyaux gaussiens et 2 noyaux visibles. ....	157
Figure 129 : Résumé du modèle de réticule obtenu. En haut à gauche: on retrouve un comportement linéaire du CD Simulé en fonction du CD mesuré ; En haut à droite : Dispersion de l'erreur CD en fonction du nombre de structures utilisées pour la calibration. On retrouve un centrage proche de 0 et une erreur absolue de 5,3nm maximum; En bas : Histogramme représentant la distribution de l'erreur CD par classe. On retrouve une erreur moyenne de 0.034 nm.....	158
Figure 130 : Erreur CD (mesurée-simulée) pour une structure de type "Line & Space", où la ligne a un CD constant de 80nm, en fonction d'une variation de la dimension du Space" ...	158
Figure 131 : Erreur CD (mesurée-simulée) pour une structure de type "Line & Space", où la ligne a un CD constant de 320nm, en fonction d'une variation de la dimension du Space" .	159
Figure 132 : Contours obtenus avec le modèle de réticule superposé à l'image SEM permettant d'apprécier la prédictibilité des arrondissements de coins et des raccourcissements de fin de ligne pour des structures issues d'un niveau "GATE" de la technologie FDSOI 14nm.....	160



Figure 133 : Ecart entre le design supposé, le contour réel et le contour obtenu avec le modèle de réticule .....	161
Figure 134 : Flux de correction simplifié permettant de réaliser les corrections OPC du design à l'écriture. Le Modèle de réticule est inséré lors de la revue ORC. ....	162
Figure 135 : A gauche : Description du modèle ORC standard contenant 2 sous modèles (modèle optique et modèle résine). A droite : Description du nouveau modèle ORC contenant 2 modèles incluant 2 sous modèles chacun (modèle de réticule composé du modèle ebeam et du modèle etch, modèle ORC "pure" contenant un modèle optique et un modèle résine) ..	162
Figure 136 : Diagramme de résumé des 4 étapes de validation de l'apport de l'utilisation du modèle de réticule dans l'étape de revue ORC : 1°Calibration du modèle de réticule ; 2° Calibration du modèle ORC standard ; 3°Fabrication du réticule B ; 4° Calibration du nouveau modèle ORC .....	163
Figure 137 : Vue d'ensemble des trois blocs de motifs embarqués sur le réticule B. L'OPC Field n'a subi que l'étape de correction utilisant le modèle de réticule. Le bloc Mask Shop Monitoring n'a subi aucune correction. Le reste du réticule a subi la fragmentation et l'étape de correction utilisant le modèle de réticule .....	164
Figure 138 : Cartographie représentant l'uniformité CD du réticule MSKMODELS002 .....	165
Figure 139 : Paramètres (AI, BF) ajustés dans le modèle optique.....	166
Figure 140 : Résultats de la calibration du modèle ORC standard (Regular) obtenu à partir de mesure après exposition du Mask A sur plaquette. ....	167
Figure 141 : Résultats de la calibration du nouveau modèle ORC appelé modèle "optique et résine pure" obtenu à partir de mesure après exposition du Mask B sur plaquette .....	168
Figure 142 : Comparaison de l'erreur absolue en fonction de la variation de CD obtenus pour 4 pas de réseau fixés à 88nm, 90nm, 100nm et 300nm, entre les deux modèles.....	169
Figure 143 : Comparaison de l'erreur absolue en fonction de la variation du pas de réseau pour un CD fixe de 44nm et 58nm, entre les deux modèles .....	169
Figure 144 : Diagramme descriptif de la méthodologie permettant l'obtention des contours .....	172
Figure 145 : Superposition des contours simulés avec chacun des deux modèles ORC et l'image SEM sur plaquette correspondante pour une structure en croix. ....	173
Figure 146 : Superposition des contours simulés avec chacun des deux modèles ORC et l'image SEM correspondante sur plaquette pour une structure de type double peigne .....	173
Figure 147 : Superposition des contours simulés avec chacun des deux modèles ORC et l'image SEM sur plaquette pour la vérification de la non résolution des SRAFs. ....	174
Figure 148 : Superposition des contours simulés avec chacun des deux modèles ORC et l'image SEM sur plaquette pour la vérification de la non résolution des SRAFs. A droite, l'image SEM permettant de voir que la prédiction du CD est meilleure avec le nouveau modèle ORC comparé au modèle ORC standard.....	175
Figure 149 : Mise en évidence de prédictibilité du phénomène de raccourcissement de fin de ligne pour chacun des deux modèles vis-à-vis de l'image SEM obtenue sur plaquette. En rouge le contour obtenu avec le nouveau modèle ORC. En jaune le contour obtenu avec le modèle ORC standard.....	175

## TABLE DES TABLES

<i>Table 1 : Sources utilisées en photolithographie optique .....</i>	<i>34</i>
<i>Table 2 : Evolution du facteur <math>k_1</math> et de l'ouverture numérique .....</i>	<i>55</i>
<i>Table 3 : Résumé des résultats plaquette obtenus pour les structures 1D pour chacun des deux réticules en termes de Best Focus et de fenêtre de procédé. ....</i>	<i>104</i>
<i>Table 4 : Description de la méthodologie de filtrage et de détermination du Best Focus basée sur la variation de la sensibilité à la dose en fonction du Focus. ....</i>	<i>113</i>
<i>Table 5 : Best Focus obtenus pour les structures 1D et 2D pour chacun des deux réticules à partir de la nouvelle méthodologie mise en place basée sur la variation de la sensibilité de la dose en fonction du Focus. ....</i>	<i>113</i>
<i>Table 6 : Comparaison du Best Focus Shift obtenu avec la méthodologie classique et la nouvelle méthodologie pour les structures 1D. ....</i>	<i>114</i>
<i>Table 7 : Extrait des paramètres mesurés en MaskShop pour les deux réticules de type EaPSM. A droite l'EaPSM standard utilisé à ST. A gauche le réticule optimisé utilisé pour l'étude....</i>	<i>119</i>
<i>Table 8 : Table de variation et d'interdépendance des paramètres de phase, transmission, épaisseur et des indices optiques <math>n</math> et <math>k</math> pour le réticule EaPSM standard utilisé à STMicroelectronics .....</i>	<i>120</i>
<i>Table 9 : Description des paramètres du réticule EaPSM des six cas identifiés pour l'étude de la variabilité d'un point de vue lithographique. ....</i>	<i>121</i>
<i>Table 10 : Résumé des effets impliqués lors des phases d'écriture et de gravure, et leurs distances d'interaction respectives .....</i>	<i>149</i>
<i>Table 11 : Erreur absolue (en nm) pour chacun des deux modèles ORC obtenus pour la structure de référence, à travers des variations de dose et de focus afin de tester la prédictibilité des modèles à travers une fenêtre de procédé donné.....</i>	<i>170</i>
<i>Table 12 : Erreur absolue (en nm) pour chacun des deux modèles ORC obtenus utilisant un code couleur différent pour la mise en évidence de l'erreur CD. ....</i>	<i>170</i>

# **Introduction Générale**

L'ère de la "révolution numérique" ou "l'ère 4.0". C'est ainsi que l'on voit qualifier aujourd'hui les progrès technologiques issues de l'émergence d'objets connectés de plus en plus nombreux, autonomes et capables d'interagir entre eux. On voit apparaître des usines nouvelles et plus intelligentes, des maisons capables d'optimiser leur dépenses énergétiques ou encore des transports autonomes. On retrouve aujourd'hui des réfrigérateurs intelligents et des cafetières intelligentes, des voitures ou des robots d'assistances, des puces qui s'implantent dans le corps humains pour réguler la glycémie ou analyser ses performances physiques. Des puces et des circuits électroniques qui nous permettent de réaliser les tâches quotidiennes de plus en plus simplement, de créer des logiciels de plus en plus rapides et précis (même Microsoft Word qui dès que l'on veut insérer une référence et une légende choisit ce qu'il a envie de faire...ou pas). Des puces aux capacités de calculs telles que seule l'imagination semble être notre seule limite à trouver une utilisation aux puces d'aujourd'hui et de demain...

Rien dans l'histoire n'a eu autant d'impact que la loi empirique énoncée par Gordon Moore<sup>1</sup>. Depuis près de 60 ans, la microélectronique n'a eu de cesse d'évoluer pour représenter un secteur d'activité économiquement et stratégiquement attrayant et éminent. La révolution numérique à laquelle on assiste avec l'arrivée d'objets de plus en plus connectés et pervasifs ouvre d'autant plus de domaines d'applications potentielles qu'il n'en existe déjà. Cette révolution n'a pas seulement remodelé notre industrie et nos cœurs de métiers, mais affecté l'ensemble des aspects fondamentaux de la civilisation moderne aussi bien d'un point de vue culturel, sociétal que politique. Et le changement est profond, si bien qu'il est difficile de savoir si les individus adhèrent volontiers à l'utilisation de produits de plus en plus autonomes et intelligents, ou si au contraire ils sont contraints et forcés de s'adapter. Avec un chiffre d'affaire mondiale de plus de 340 milliards de dollars en 2014 [source : Gartner Mars 2015], les domaines d'applications de la microélectronique sont de plus en plus variés. Bien que la tendance actuelle s'oriente vers une dissémination et une différenciation de l'utilisation de puces électroniques, l'innovation en microélectronique réside encore dans la capacité à réduire la taille du composant de base à travers les années : le transistor. Le développement de technologies de plus en plus petites entraîne une augmentation des exigences concernant les procédés de fabrication. L'amélioration de la résolution optique pour les nœuds technologiques avancés (20nm et au-delà) est un des moyens d'y parvenir.

Ainsi la photolithographie, technique d'impression la plus utilisée aujourd'hui en microélectronique en raison de sa capacité de production accrue, a de plus en plus d'influence dans cette étape d'amélioration. Le principe repose sur l'exposition d'une couche de résine photosensible, au travers d'un réticule (appelé aussi masque) comportant le dessin d'un des niveaux du circuit. Une fois ces motifs transférés dans l'empilement de la résine, on obtiendra une couche sélective permettant d'appliquer un traitement spécifique tel qu'une gravure ou une implantation ionique, etc... .

Un réticule est un gabarit avec des zones transparentes ou évidées et des zones opaques laissant passer la lumière selon un motif précis. Mes travaux de thèse s'inscrivent dans l'étape d'amélioration de la résolution optique où il est question d'évaluer l'influence du réticule, de

---

<sup>1</sup> La loi de Moore n'est pas une loi au sens physique du terme mais une prédiction émise en 1975 par Gordon E. Moore et établit de manière empirique. Elle mentionne que le nombre de [transistors](#) des [microprocesseurs](#) sur une puce de silicium double tous les deux ans. C'est avec une précision étonnante que cette affirmation s'est avéré être vrai de 1975 à aujourd'hui.

cibler les différentes voies d'améliorations et de mettre en place, en tenant compte des critères de production industrielle, les points retenus. Le progrès technologique s'accompagne souvent de verrous technologiques à lever, et la réduction de la taille des puces a nécessité de réduire également la taille des motifs présents sur réticule. Cette évolution des contraintes a conduit les industriels de la microélectronique à adopter de nouveaux réticules permettant de répondre à leur cahier des charges vis-à-vis des dimensions à atteindre sur plaquette. Pour certains niveaux où la densité de motifs est importante, et plus spécifiquement en photolithographie, il est impératif de garder une gamme de fonctionnement du procédé de fabrication – appelé la fenêtre de procédé - la plus large possible en termes de capacité de résolution. Hors il apparait que pour des niveaux denses de type "Métal", l'ensemble des structures embarquées sur le réticule ne sont pas (ou peu) résolues dans des fenêtres de procédé communes. L'objectif sera de trouver un moyen permettant de pallier à cette faiblesse du procédé de fabrication en agissant exclusivement sur le réticule.

A l'instar de l'OPC, qui permet de corriger les effets de proximité optique inhérents au procédé permettant le transfert des motifs du réticule à la plaquette, nous évaluerons la possibilité d'introduire un modèle de réticule qui permette de prendre en compte et corriger les effets de l'étape de fabrication de ces derniers, ainsi que l'évaluation du gain associé.

La partie A de cette thèse permet de présenter le contexte de l'étude et de rappeler à la fois les principes de bases de la lithographie optique et les principaux paramètres qui régissent cette technique. Il s'agira essentiellement de décrire la théorie de la formation de l'image aérienne via notre système optique. Nous aborderons ensuite les techniques d'améliorations de la résolution avant d'introduire explicitement nos deux problématiques. L'ensemble des notions abordées en partie A nous permettra de comprendre les enjeux de cette thèse développée dans les parties B et C, dans lesquels nous aborderons séparément chacune des deux problématiques.

La partie B s'attache à la compréhension des phénomènes qui contribuent à la réduction des effets de focalisation en fonction du pas de réseau visé. L'objectif de cette partie est de proposer un réticule qui permettra d'obtenir une fenêtre de procédé viable pour le procédé lithographique, via un logiciel de simulation d'abord, puis avec des résultats sur plaquette ensuite. Nous verrons également que la méthode classique permettant de définir le focus optimum pour des structures à deux dimensions sera remplacée par une nouvelle approche combinant à la fois des observations d'images et la détermination de la sensibilité à la dose.

La partie C traite de la prise en compte du procédé de fabrication des réticules dans la correction des effets de proximité optique. Aujourd'hui ce procédé est pris en compte de manière indirecte et non quantitative dans les modèles résines. On ne sait donc pas de manière précise quelles parties des effets inhérents au procédé de fabrication sont corrigées ou pas. Nous commencerons par décrire le procédé de fabrication des réticules avancés avant d'aborder les effets physiques qui ont un impact sur la qualité des réticules. Nous analyserons ensuite la manière dont ces effets sont pris en compte au niveau de la Mask Shop, si ils le sont tous et nous déterminerons à l'issue de cette analyse les effets qui doivent être embarqués dans notre modèle de réticule. Ces effets seront ensuite calibrés via la fabrication d'un réticule dédié puis introduits dans un modèle OPC pour estimer le gain associé.

Pour achever cette entrée en matière, on peut dire que les sujets couverts sont très diversifiés de par les domaines qui y sont abordés tels que l'aspect physico-chimique des matériaux, la physique des ondes électromagnétiques, les théories de résolutions des équations de Maxwell

associées et l'aspect modélisation. Le caractère collaboratif de cette thèse est également des plus importants et intéressants au vu du nombre de personnes et d'entreprises avec lesquels je serai amené à interagir, dans le cadre de programme de recherche commun.

# **Partie A**

## Etat de l'art de la photolithographie optique

# Introduction

Dans ce premier chapitre nous préciserons le contexte de l'étude en commençant par présenter le principe de fonctionnement d'un transistor, puis les différentes étapes de base de la fabrication d'un circuit intégré. Parmi ces étapes nous aborderons la photolithographie optique, technique qui a permis et permet encore aujourd'hui de miniaturiser les composants et dans laquelle s'inscrit mon travail de thèse. Ainsi, nous passerons en revue les principes de base de cette technique ainsi que les paramètres de contrôle et de performances associés. Nous définirons la notion de résolution, les paramètres qui la limitent ainsi que les techniques qui permettent de l'améliorer. Nous terminerons cette description en nous focalisant sur l'élément concerné par ce travail de thèse, à savoir les réticules. Enfin nous aborderons l'objectif et les enjeux de cette thèse. Cette première partie sera également l'occasion d'introduire un ensemble de généralités et de notions utiles à la compréhension des deux prochaines parties.



## I. Présentation du contexte de l'étude

### 1. La microélectronique et les transistors

Un circuit intégré permet de réaliser des fonctions électroniques simples ou complexes. Il repose sur l'intégration de divers composants tels que des résistances, des diodes, des condensateurs et essentiellement des transistors. Il existe deux types de transistors (les transistors bipolaires et les transistors MOS de l'anglais « Metal Oxyde Semiconductor »). Les transistors bipolaires servent à réaliser des fonctions analogiques et sont également utilisés en électronique de puissance. Les transistors MOS permettent de réaliser des fonctions numériques (opérations logiques essentiellement) et sont toujours constitués de trois éléments, une grille (oxyde + poly), une source et un drain (zones de semi-conducteur dopé). Ils peuvent également être utilisés en analogique dans des circuits numériques. Il y a deux types de transistors MOS les NMOS et les PMOS. Les sources et drains du NMOS sont dopés N et ceux du PMOS sont dopés P. Le substrat sous le transistor est toujours dopé à l'inverse des sources et drains. La Figure 1 décrit de manière simplifiée l'architecture d'un transistor NMOS ET PMOS.

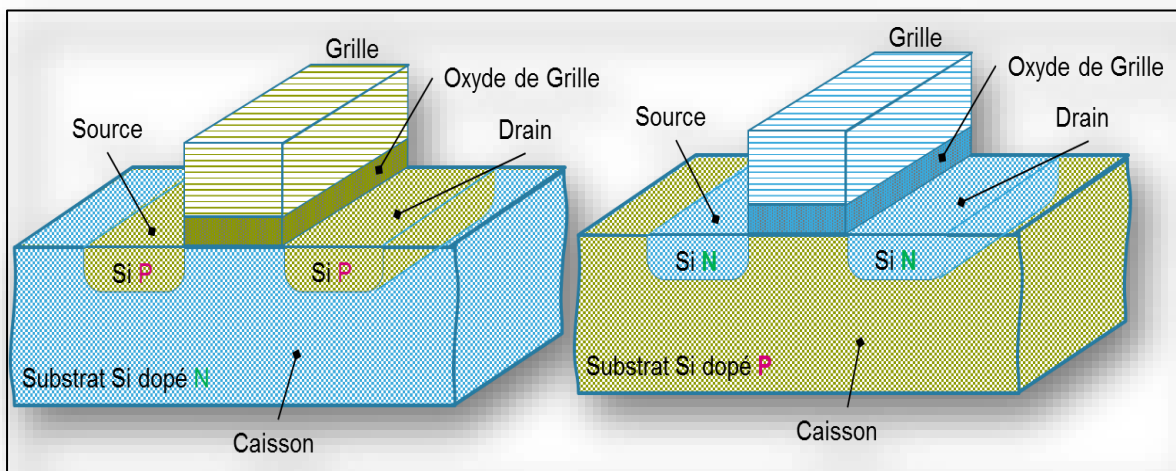
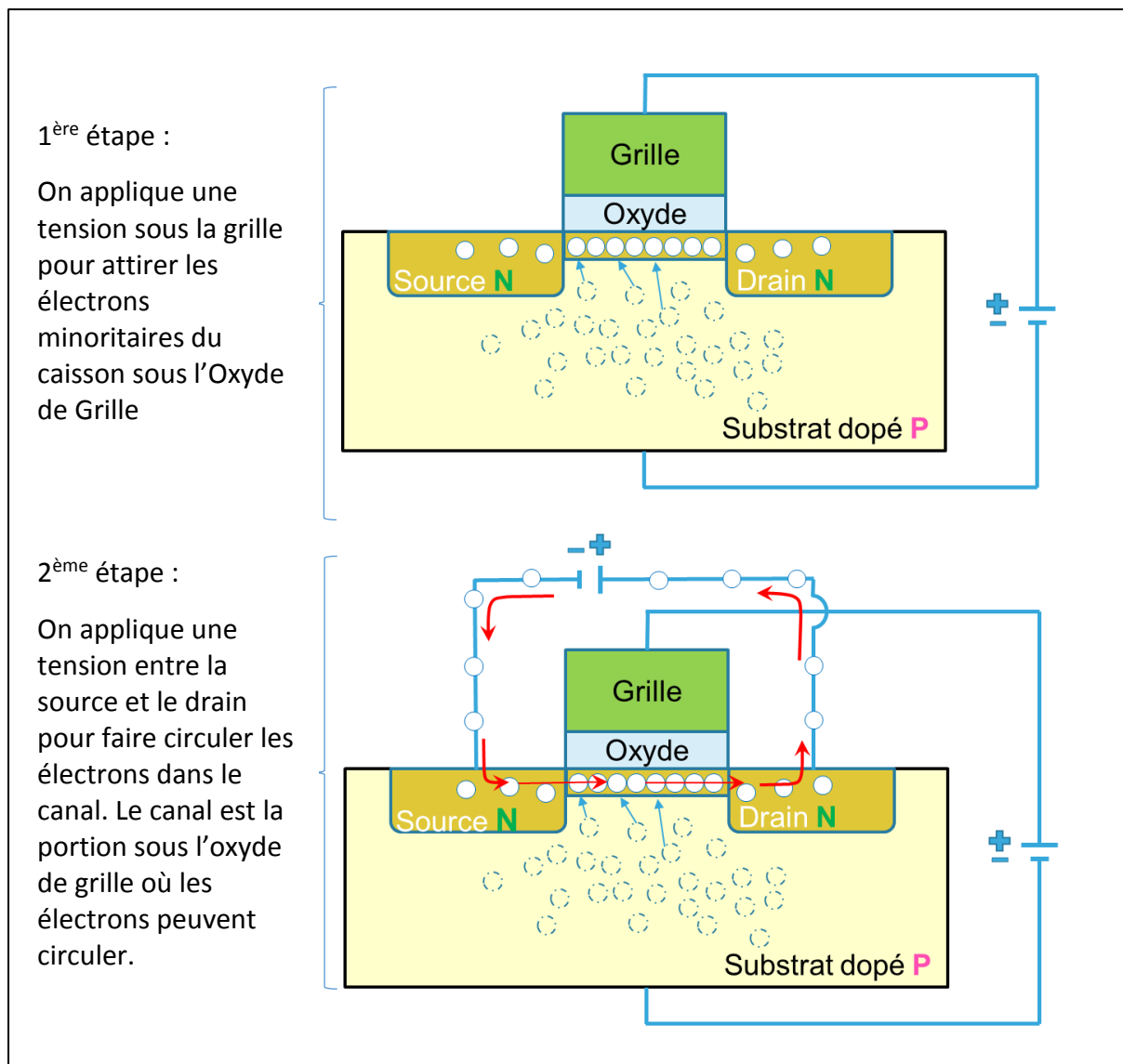


Figure 1 : Architecture d'un transistor MOS. A gauche un transistor **PMOS** et à droite un **NMOS**

Les NMOS et PMOS fonctionnent tous deux comme un interrupteur commandé de façon électrique par la Grille. Le fonctionnement d'un NMOS est décrit Figure 2. En appliquant une différence de potentiel entre la Grille et le Substrat, les électrons minoritaires du substrat se retrouvent attirés sous la Grille pour former un canal d'électrons sous l'oxyde de grille. Ce canal permettra la circulation d'un courant entre le Drain et la Source. Afin de créer le canal, une tension minimale doit être appliquée sur la Grille, appelée tension de seuil et notée généralement  $V_t$  (t pour threshold qui signifie seuil en anglais). Dans ce premier chapitre nous aborderons les transistors CMOS, de l'anglais « Complementary Metal Oxyde Semiconductor », dont le principe consiste à intégrer des transistors NMOS et PMOS sur un même substrat pour créer des fonctions logiques.



*Figure 2 : Représentation du fonctionnement électrique d'un transistor NMOS. Si on applique une tension sous la grille on attire les électrons minoritaires du caisson sous l'Oxyde de Grille. La circulation d'électrons a lieu lorsque l'on applique ensuite une tension entre la source et le drain.*

La fabrication d'un circuit CMOS se font en quatre grandes parties successives :

1. Fabrication des zones actives : ce sont les zones de silicium dans lesquelles on fabrique les composants. Elles sont délimitées par des tranchées de matériaux isolants.
2. Création des caissons : ce sont des zones de silicium dopées négativement (N) ou positivement (P). On retrouvera également dans ces zones les différents composants.
3. Création des transistors : avec l'empilement Grille/Oxyde de Grille, les sources et les drains. On fabrique dans un premier temps l'empilement Grille/Oxyde de Grille, ce qui permettra aux sources et drains d'être auto-alignés sur la grille.
4. Fabrication des interconnexions : elles permettront de réaliser les différentes fonctions électroniques désirées et de relier la puce à l'extérieur.

## 2. Les étapes de fabrication d'un circuit CMOS

Un circuit intégré est composé de plusieurs niveaux. L'exemple donné Figure 3 est un exemple de filière CMOS. Toute architecture peut être divisée en 2 parties : la partie « Front End Of Line » (FEOL) et la partie « Back End Of Line » (BEOL). La partie FEOL est dite active car elle contient les transistors et les contacts permettant de relier sources, drains et grilles au premier niveau métal. La partie BEOL, dite passive, contient les niveaux d'interconnexions appelés « Via » et les niveaux métalliques appelés « Métal ». Le BEOL permet donc de commander et d'alimenter les transistors. Elle sert également à relier la puce à l'extérieur.

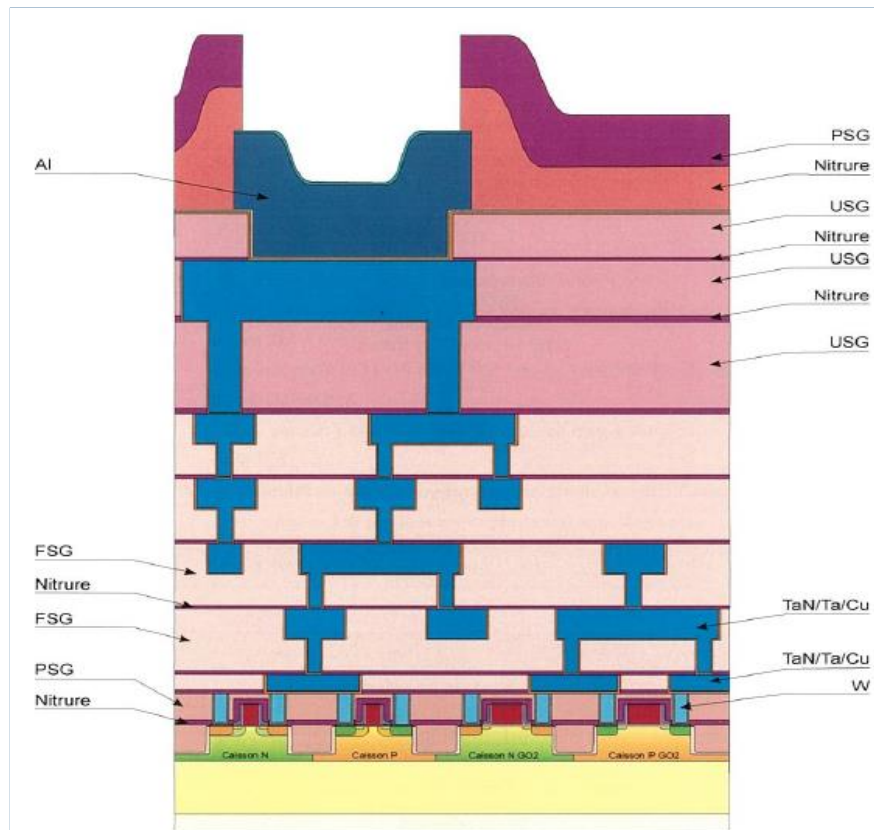


Figure 3 : Exemple de filière CMOS

Les circuits intégrés sont fabriqués sur des substrats de matériaux semi-conducteurs. La plupart sont des plaquettes de silicium monocristallin pur, dont l'orientation monocristalline est judicieusement choisie en vue des différentes étapes de fabrication qu'elles vont suivre (implantation ionique, découpe des puces, etc.). Indifféremment on appelle ces disques de matériaux semi-conducteurs « plaques », « plaquettes », « gaufrettes » ou encore par leur appellation anglaise « wafer ». La taille de ces disques de silicium a continuellement augmenté depuis les années 1970, où celles-ci mesuraient alors 50mm de diamètre, pour arriver aujourd'hui à des disques de 300mm de diamètre. Certains industriels envisagent aujourd'hui de produire leurs puces sur des plaquettes de 450mm. Ce passage du 300mm au 450mm a été continuellement retardé au regard de l'investissement majeur qu'il représente à la fois pour les fabricants de circuits intégrés, mais surtout pour les fabricants d'équipements spécifiques utilisés par les fabricants de circuits intégrés. L'utilisation de plaquettes de plus en plus grandes permet d'augmenter le nombre de puces par plaque, donc la productivité, et de diminuer le coût par puce. L'obtention d'une puce fonctionnelle passe par plus de 400 étapes technologiques, que l'on peut regrouper en 10 familles :

1. Les Traitements Thermiques qui permettent de fabriquer des couches d'isolants ou de semi-conducteurs. On y réalise également des recuits. La fabrication de couches de matériaux se fait par oxydation sèche ou humide, et aussi par dépôt chimique en phase vapeur à haute température. Les recuits servent à activer les dopants et à guérir les défauts introduits dans le silicium lors de l'implantation ionique. Après dépôt, les recuits sont utilisés pour densifier, faire réagir et transformer (recuits de siliciuration par exemple), stabiliser la microstructure ou passiver les défauts des couches déposées.
2. Les Nettoyages par voie sèche et humide, qui permettent d'effectuer la décontamination particulaire, métallique ou organique.
3. La Gravure qui permet de transférer les motifs de la résine dans une couche de la plaquette.
4. L'implantation ionique qui permet de doper le silicium afin d'apporter les porteurs de charges. Le principe consiste à bombarder entièrement la plaquette avec un faisceau d'ions. Au préalable les zones à ne pas implanter sont cachées par la résine.
5. Les dépôts qui permettent de déposer des couches d'isolants électriques ou de couches conductrices. Les dépôts d'isolants électriques sont réalisés à basse température pour limiter l'influence que celle-ci pourrait avoir sur les dopants et éviter qu'ils diffusent dans les composants. Les dépôts de couches conductrices sont réalisés par pulvérisation cathodique, par dépôt chimique en phase vapeur ou par voie électrochimique.
6. Le polissage mécano-chimique qui permet de planariser les couches d'oxyde déposées sur la plaquette afin de minimiser la perte en profondeur de champ
7. La photolithographie qui permet de définir des zones sur la plaquette en vue des opérations suivantes, en transférant les motifs d'un réticule dans la résine photosensible préalablement étalée sur la plaquette.
8. La métrologie qui permet de faire des mesures après chaque étape clef ou critique pour certifier que le procédé de fabrication se déroule correctement. Elle intervient tout au long du processus de fabrication.
9. La défektivité dont la principale mission est de détecter, analyser et réduire les défauts sur les plaques pour éviter toute dérive et améliorer les rendements.
10. Les tests paramétriques qui permettent de faire des mesures électriques dans les chemins de découpe (zones entre les puces). Ces tests interviennent tout au long du processus de fabrication à partir du premier niveau Métal. Ils permettent de mesurer les paramètres électriques clefs et de contrôler la conformité des puces par rapport aux propriétés désirées.

Les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse s'inscrivent dans les étapes de photolithographies. Dans la suite de cette thèse on nommera indifféremment photolithographie ou lithographie. Dans le prochain chapitre nous aborderons en détail le principe de la photolithographie et les éléments qui composent un équipement de lithographie, en commençant par un historique des différentes techniques de lithographie qui ont vu le jour depuis les années 1970.

## II. Principes de base de la lithographie optique

Le développement de technologies de plus en plus petites entraîne une augmentation des exigences concernant les procédés de fabrication. L'amélioration de la résolution optique pour les nœuds technologiques avancés (20nm et au-delà) est un des moyens d'y parvenir.

Ainsi la photolithographie, technique d'impression la plus utilisée aujourd'hui en microélectronique en raison de sa capacité de production accrue, a de plus en plus d'influence dans cette étape d'amélioration. Le principe repose sur l'exposition d'une couche de résine photosensible, au travers d'un réticule (appelé aussi masque) comportant le dessin d'un des niveaux du circuit. La Figure 4 regroupe les différentes étapes maitresses de ce procédé. Une fois ces motifs transférés dans l'empilement de la résine, on obtiendra une couche sélective permettant d'appliquer un traitement spécifique tel qu'une gravure, un dépôt, une implantation ionique, etc... .

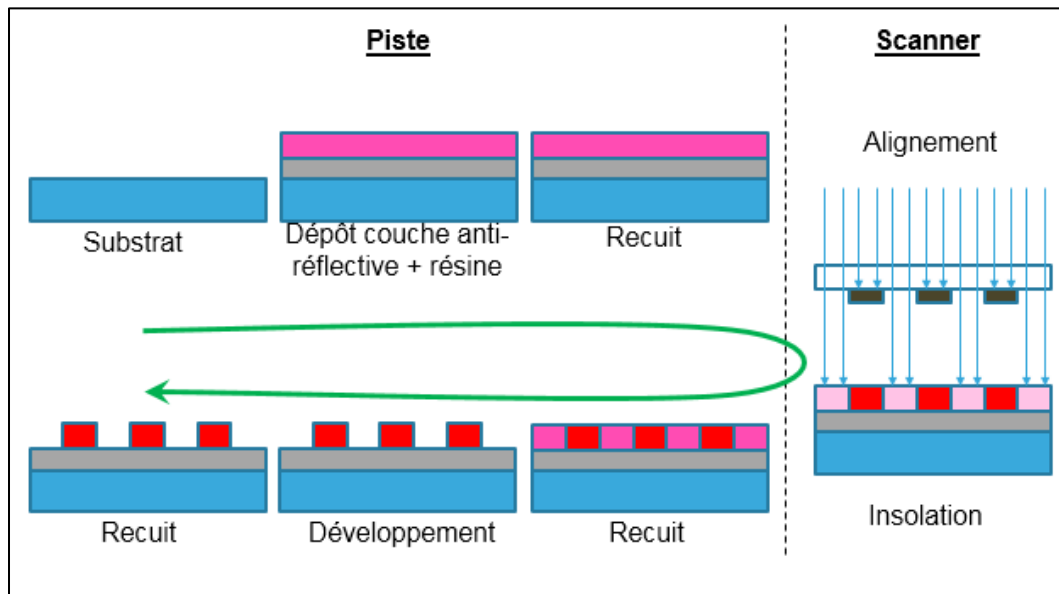


Figure 4 : Etape clé du procédé de photolithographie optique

Un réticule est un gabarit avec des zones transparentes ou évidées et des zones opaques (i.e. absorbant à la longueur d'onde de travail), laissant passer la lumière selon un motif précis. Dans le chapitre A.II.3 nous aborderons ce dispositif en détail qui est l'objet de ce travail de thèse.

Avant 1975, les techniques de lithographie utilisées étaient celles de contact et de proximité [1] comme on peut le voir Figure 5 : Lithographie optique par contact (1) et par proximité (2). La lithographie par contact consistait à mettre en contact le masque et la résine avant insolation d'où son nom.

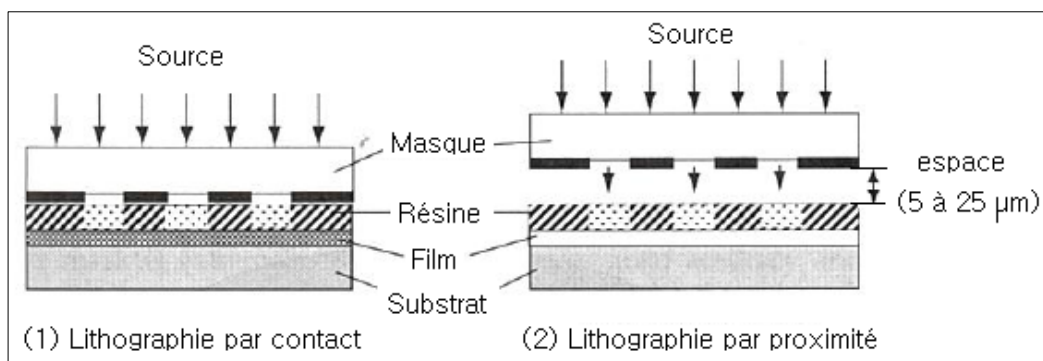
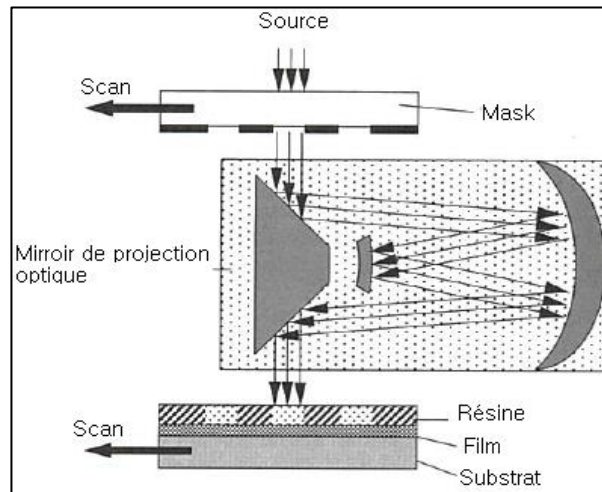


Figure 5 : Lithographie optique par contact (1) et par proximité (2)

Cette technique provoquait des dommages aux masques qui se transféraient ensuite dans la résine, et nécessitait donc beaucoup de masques. Une nouvelle technique a donc été développée où on laissait un espace de quelques microns entre la couche de résine et le masque. Cette technique portera le nom de lithographie par proximité. Elle sera elle aussi abandonnée vu le peu de résolution qu'elle offre dû à la diffraction de la lumière aux bords des motifs. Vient alors la lithographie par projection permettant d'assurer une durée de vie plus longue aux masques et une bonne résolution. Le principe est visible Figure 6.



*Figure 6 : Lithographie optique par projection sans réduction.*

Pour l'ensemble de techniques citées ci-dessus, les motifs sur le masque ont les mêmes dimensions que ceux désirés sur la plaquette. Les spécificités des motifs de la plaquette dépendent donc de celles que l'on a sur le masque. Il a donc été introduit un système de lithographie optique par projection et réduction permettant de pallier à ce problème d'une part et de continuer la course à la miniaturisation au-delà du nœud d'  $1\mu\text{m}$  d'autre part.

### 1. Les bases de la lithographie optique par projection-réduction

La lithographie optique est l'étape clé dans le procédé de fabrication des circuits intégrés. Comme cité précédemment, c'est l'étape qui consiste à transférer les motifs présents sur un réticule dans l'empilement de la couche de résine photosensible (déposée au préalable sur une plaquette de silicium par exemple), à l'aide d'un système de projection adapté. Le dispositif peut être décomposé en quatre éléments distincts, comme décrit dans la Figure 7: Un système d'illumination, un masque, un système de projection optique et une couche de résine photosensible déposée sur un substrat (silicium le plus souvent). On décrit dans les sous chapitres suivants chacun de ces éléments.

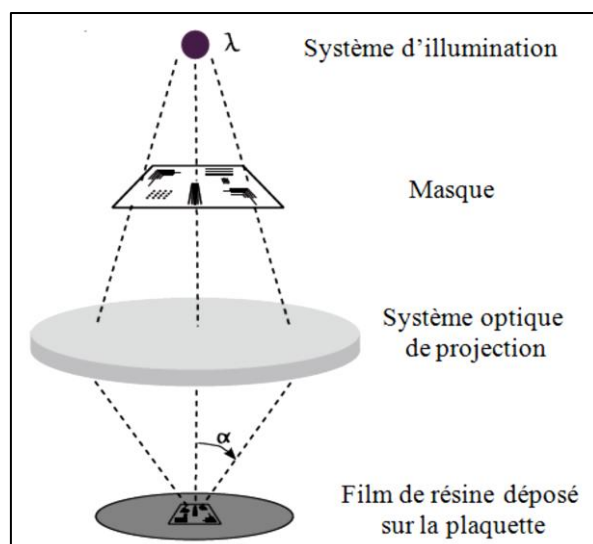


Figure 7 : Système de projection utilisé en lithographie optique

Chacun de ces éléments, dont le fonctionnement est décrit dans la suite de ce chapitre, peut être un bon candidat dans l'étape d'amélioration de la résolution optique.

## 2. Le système d'illumination

Le système d'illumination est constitué d'une source monochromatique actinique (UV profond) et d'un condenseur. La Table 1 présente les sources utilisées en photolithographie optique [2].

Classe de la source	Type	Longueur d'onde	Localisation dans le spectre électromagnétique
Lampe Mercure	raie g	436 nm	visible
	raie h	405 nm	visible
	raie i	365 nm	Ultraviolet
	DUV	240-255 nm	Ultraviolet profond
Lasers excimères	KrF	248 nm	Ultraviolet profond
	ArF	193 nm	Ultraviolet profond
	F2	157 nm	Vide Ultraviolet

Table 1 : Sources utilisées en photolithographie optique

Les sources utilisées pour les nœuds avancés sont des lasers excimères ArF permettant de fournir une longueur d'onde d'exposition de 193 nm. Outre la diminution de la longueur d'onde, qui permet de jouer sur les ordres de diffraction que la pupille peut collecter (voir



chapitre A.II.2), la source doit fournir une puissance suffisamment élevée et stable pour atteindre les contraintes liées au rendement industriel. Dans la réalité celle-ci est constituée d'un ensemble de points présentant une variation d'intensité [3]. Ce qui conduirait à avoir une fluctuation d'intensité au niveau de la plaquette et donc dans la résine. De plus si chacun de ces points sources générerait une onde plane, les ordres de diffraction élevés pour les motifs éloignés de l'axe optique ne seraient pas captés par la pupille. Un même motif présent sur l'axe optique et éloigné de ce dernier ne serait alors pas résolu de la même manière. La technique d'illumination introduite par August Köhler [4], et qui porte d'ailleurs le même nom est présentée Figure 8. Son système consiste à placer une lentille auxiliaire proche du premier diaphragme, afin de former une image de la source au niveau du plan focal du condenseur. Ce premier diaphragme est un diaphragme de champ permettant de limiter la portion de la source qui sera imagée. Le diaphragme du condenseur, qui permet de limiter l'angle des rayons traversant le système, est également placé au niveau du plan focal du condenseur. Il en résulte que les rayons provenant de chaque point source émergent du condenseur comme un faisceau de rayons parallèles, illuminant le réticule de manière uniforme. Les défauts d'uniformité provenant de la distribution d'intensité de la source sont ainsi moyennés sur toute la surface du réticule.

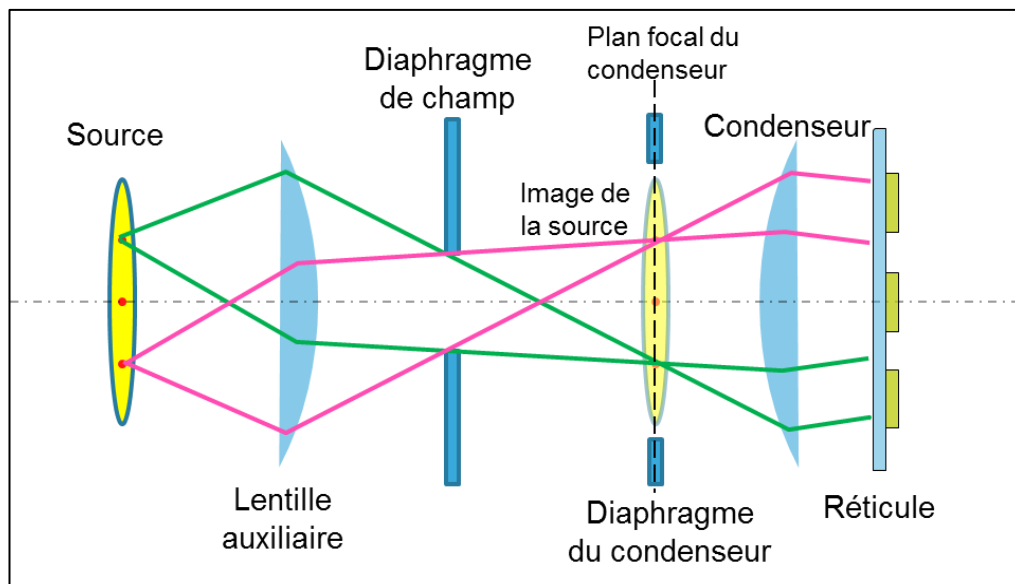


Figure 8 : Système d'illumination de type Köhler

Lorsque la source est ponctuelle, on parle d'une illumination spatialement cohérente. En général, lorsque l'on parle de source lumineuse en lithographie, on parle de source étendue soit une illumination partiellement cohérente. En effet le réticule est soumis à une multitude de faisceaux n'ayant pas de relations de phases entre eux. Chaque source étendue sera donc caractérisée par le facteur de cohérence partielle  $\sigma$  défini par le rapport entre le diamètre de la source dans le plan de la pupille d'entrée  $\varphi_p$  et le diamètre de la pupille d'entrée  $\varphi_s$  comme décrit Figure 9[3, p56-59]:

$$\sigma = \frac{\varphi_p}{\varphi_s} \quad \text{Equation 1}$$

Si  $\sigma = 0$ , l'illumination est cohérente



Si  $0 < \sigma < 1$ , l'illumination est partiellement cohérente

Si  $\sigma = 1$ , l'illumination est incohérente

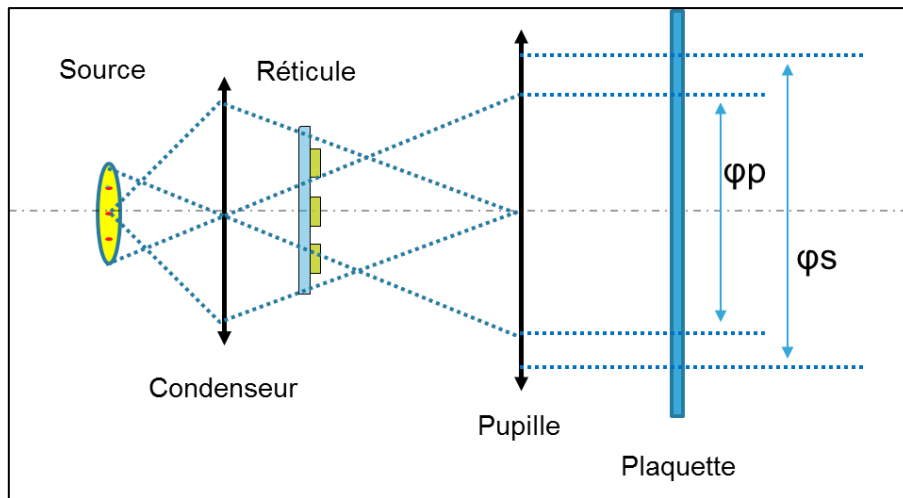


Figure 9 : Description du facteur de cohérence spatiale partielle

Si l'illumination est de type annulaire elle sera définie par un facteur de cohérence partielle intérieure  $\sigma_{in}$  et un facteur de cohérence partielle extérieure  $\sigma_{ext}$  comme décrit Figure 10.

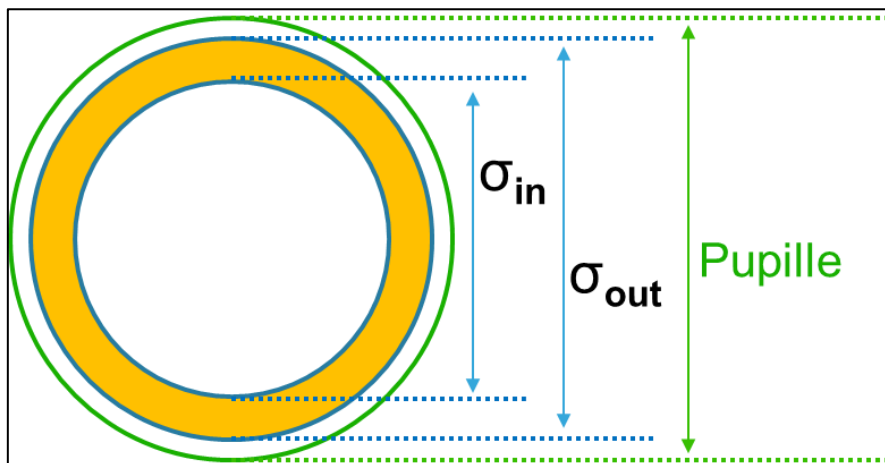


Figure 10 : Définition des deux facteurs de cohérence partielle pour une source annulaire

### 3. Le réticule ou masque

On parlera dans ce chapitre des masques optiques utilisés dans les appareils de lithographie par projection-réduction utilisée depuis le nœud  $1 \mu\text{m}$ , dont les principales zones et dimensions caractéristiques sont définies sur la Figure 11.

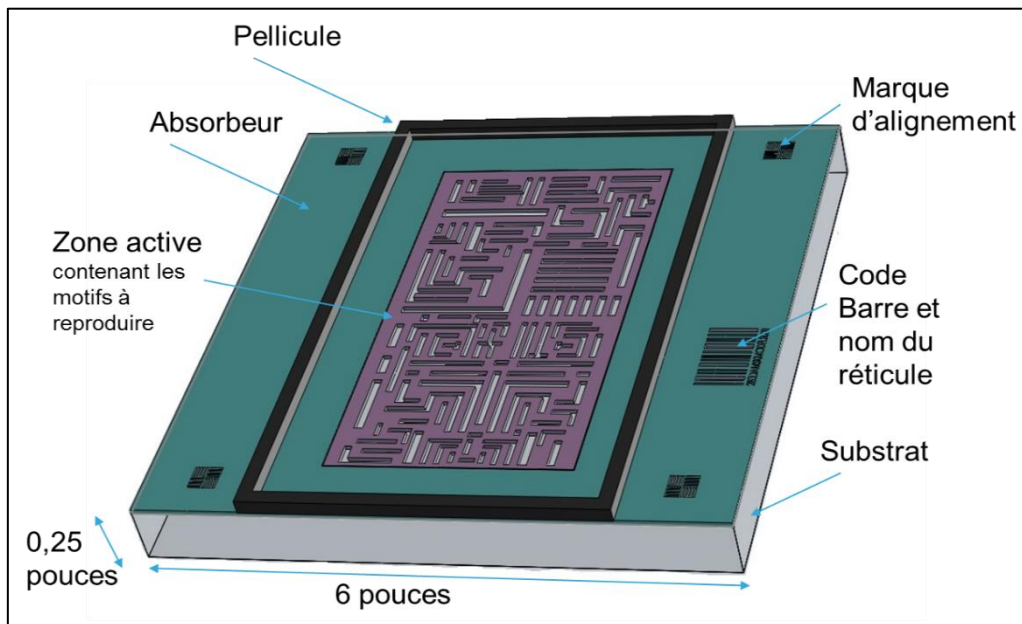


Figure 11 : Structure schématique d'un masque optique de 6 pouces x 6 pouces

Les masques sont des éléments clés dans l'étape lithographique. La qualité des motifs obtenus sur plaquette dépend de la qualité des masques. On détermine ainsi les paramètres qu'il faut impérativement maîtriser tels que la planéité et la pureté du substrat, l'uniformité de l'épaisseur de l'absorbeur et l'uniformité CD à travers la zone active du réticule.

On parlera également de polarité d'un masque, suivant que les motifs désirés sur plaquette sont ajourés ou définis dans la couche absorbante. On parlera respectivement de masque en champ obscur (ou PTD de l'anglais Positive Tone Development) ou de masque en champ clair (ou NTD de l'anglais Negative Tone Development), comme on peut le voir Figure 12.

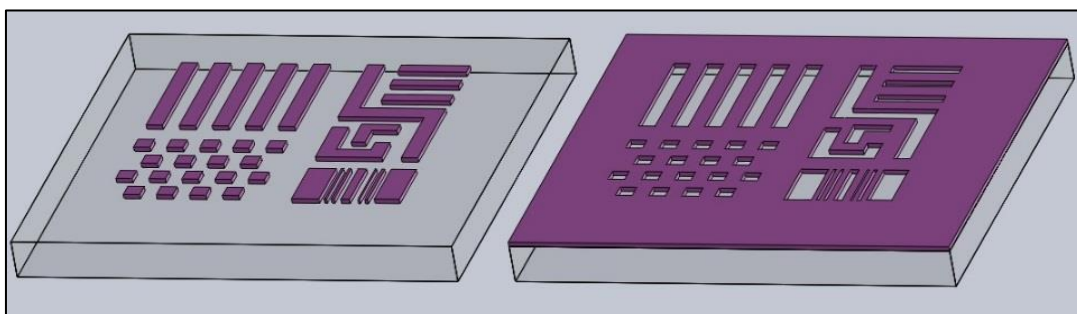


Figure 12 : Illustration de la polarité d'un masque : à gauche un masque en champ clair, à droite un masque en champ obscur

La tendance actuelle pour le développement des nœuds avancés est à l'utilisation de masques en champ clair car ils permettent d'obtenir des motifs dans la résine de meilleure qualité. En effet le contraste est plus net entre les zones développées et les zones non développées, pour une plaquette issue d'une exposition avec un masque en champ clair (LF de l'anglais Light Field) par rapport à un masque en champ obscur (DF de l'anglais Dark Field), comme on peut le voir Figure 13.

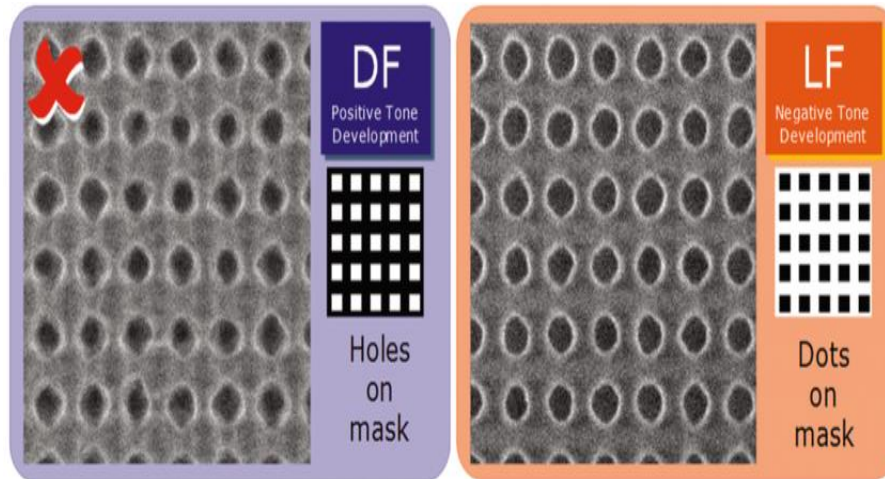


Figure 13 : Influence de la polarité d'un masque sur un niveau contact 22nm. Les contacts sont mieux définis et plus réguliers sur le réticule de type Light Field.

Une technologie compte entre 20 et 40 niveaux, avec parfois plusieurs étapes par niveau (implantation ionique, double voir triple impression pour les nœuds avancés) dont chacune dispose d'un masque dédié. On détermine ainsi également un niveau de criticité pour chaque masque en fonction de la précision et de la qualité souhaitée à l'étape pour laquelle il est dédié. Le coût d'un jeu de masque complet variera donc en fonction de son niveau de criticité et donc du nœud auquel il est dédié.

#### 4. Le système optique de projection

Il permet de collecter la lumière diffractée par le masque et de la transférer dans la couche de résine sur plaquette. L'image du masque est donc reconstituée grâce aux interférences des ondes collectées en sortie du système optique de projection. On le caractérise principalement par son facteur de réduction et son ouverture numérique [5] ou NA (de l'anglais Numerical Aperture). Le facteur de réduction est le rapport entre la dimension d'un motif sur plaquette et la dimension de ce même motif sur le masque. L'ouverture numérique représente la capacité du système optique de projection à collecter les ordres de diffraction issus du masque et qui participe à la formation de l'image au niveau de la plaquette. On définit l'ouverture numérique à l'aide de l'équation :

$$NA = n \times \sin(\alpha_{max}) \quad \text{Equation 2}$$

Avec  $n$  l'indice du milieu dans lequel l'image est formée et  $\alpha_{max}$  le demi-angle maximum comme schématisé sur la Figure 14. Le système de projection optique doit aussi sa qualité à celle des lentilles qui le composent. En effet, les aberrations optiques et la qualité du polissage de la surface des lentilles sont aussi à prendre en compte bien que mieux maîtrisées sur les scanneurs derniers cris.

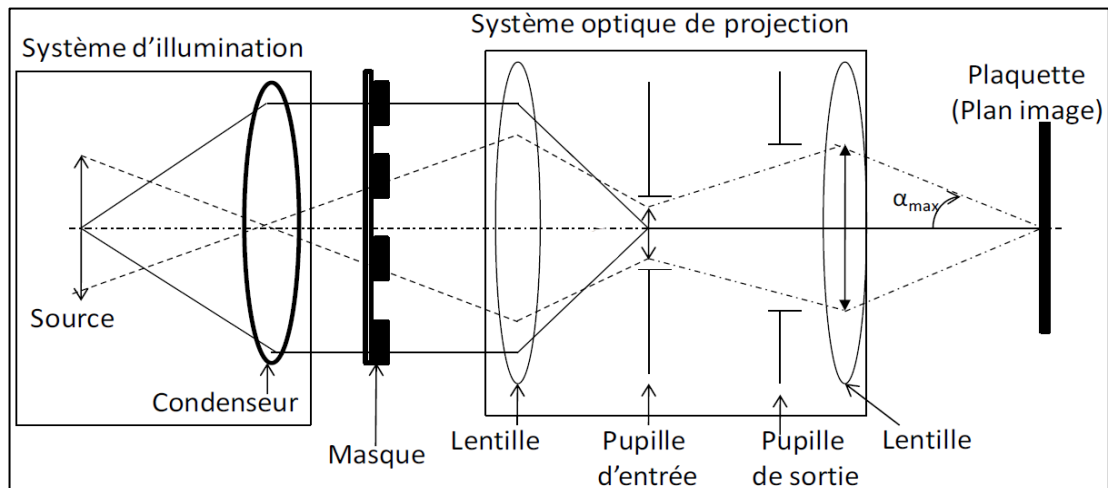


Figure 14 : Illustration de l'ouverture numérique dans un système d'illumination de type Köhler

### 5. La couche de résine photosensible

La résine [6] utilisée en lithographie est un composé organique photosensible à la lumière d'une source émettant dans le domaine spectral des ultraviolets. On peut classer les résines en deux familles, comme illustré Figure 15:

- Les résines positives, où les motifs exposés seront rendus solubles par rapport aux zones non exposées,
- Les résines négatives, où ce sont les zones non exposées qui deviendront solubles, les autres zones restant insolubles.

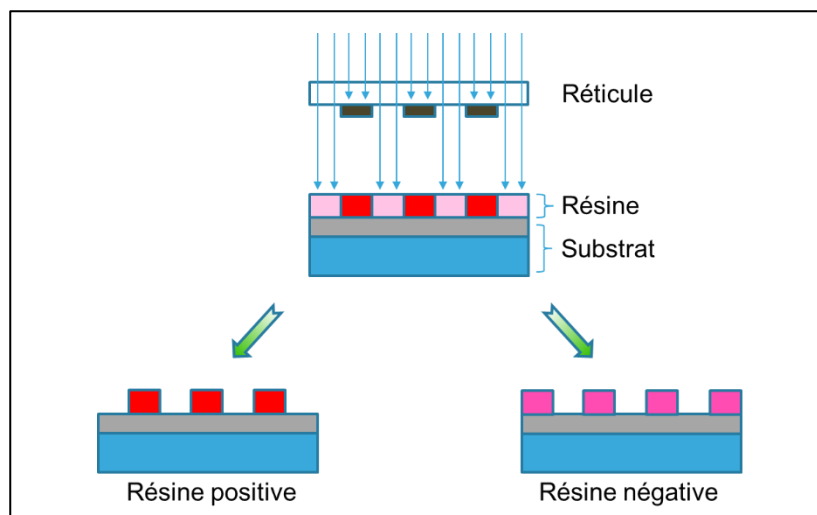


Figure 15 : Motifs après développement dans le cas d'une résine positive et négative

Les résines les plus utilisées à l'heure actuelle sont les résines positives qui montrent de meilleure performance en termes de résolution optique.

De plus, elles doivent avoir des propriétés de viscosité permettant d'avoir des films de résine d'épaisseur homogène et contrôlable. Enfin elles doivent également avoir des propriétés d'adhérence et de stabilité chimique qui leur permettront de résister aux divers traitements

du procédé de fabrication, tels que la gravure, l'implantation ionique ou encore les traitements thermiques.

Les résines actuellement utilisées sont dites résines positives chimiquement amplifiées car elles larguent des acides qui diffusent pendant l'exposition, permettant d'augmenter la sensibilité de la résine. Elles sont composées :

- D'un polymère insoluble dans le développeur,
- D'un composé photo-générateur d'acide ou PAG (de l'anglais "Photo Acid Generator") qui se transforme en acide sous l'effet d'un rayonnement actinique,
- D'une base qui permet de limiter la diffusion de l'acide dans le polymère.

## 6. La formation de l'image aérienne

Ce que l'on appelle l'image aérienne est l'image du réticule formée en sortie du système optique de projection. Cette image est donc ensuite transférée dans la résine et correspond donc à une distribution spatiale de l'intensité au niveau de la plaquette. On décrit en utilisant la théorie de la diffraction la formation de l'image aérienne. Nous utiliserons pour notre exemple un cas simple composé d'une source semi cohérente sous incidence normale de longueur d'onde  $\lambda$ , un réticule composé de lignes parallèles formant un réseau de pas  $P$  et une pupille caractérisée par l'ouverture numérique  $NA$ . La description est donnée Figure 16.

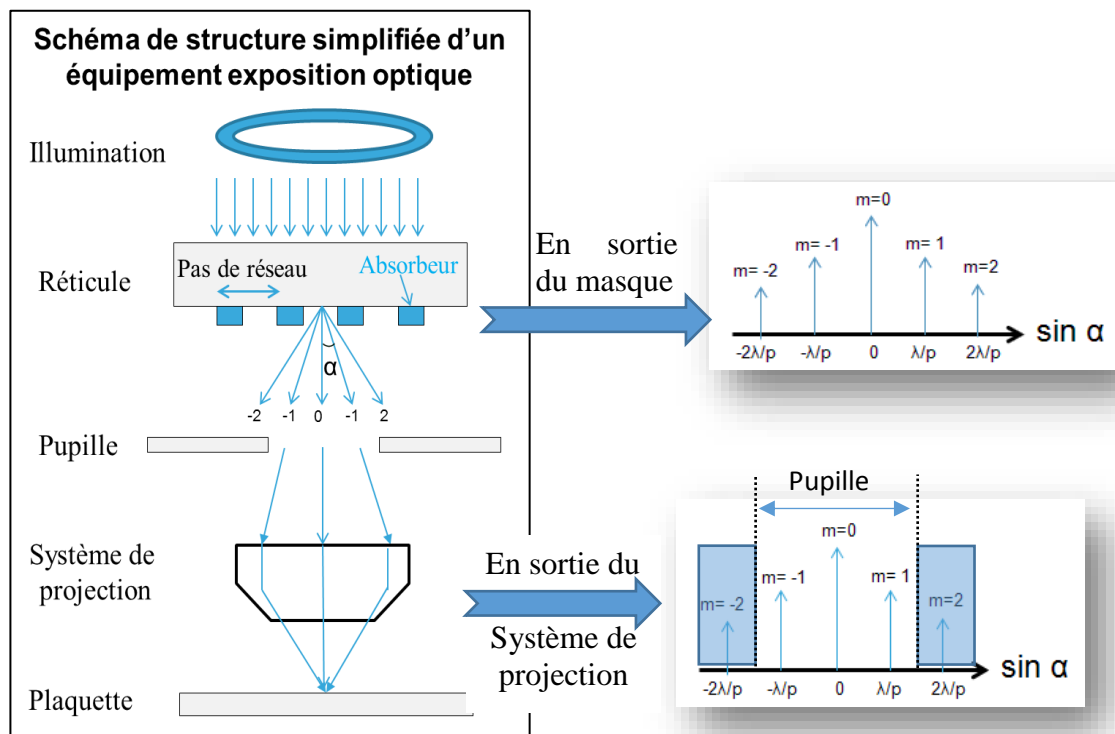


Figure 16 : Représentation schématique du système de projection optique et du filtrage des ordres de diffraction par la pupille.

Lorsque l'onde plane provenant de la source rencontre le masque, la lumière est diffractée en  $m$  ordres en se propageant selon les directions définies par les angles  $\alpha_m$  conformément à la loi de Bragg définie comme suit :

$$\sin(\alpha_m) = m \cdot \frac{\lambda}{p}, \text{ avec } m \in \mathbb{Z} \text{ (entiers relatifs)} \quad \text{Equation 3}$$

Chaque ordre de diffraction correspondra à un pic de Dirac dans le plan fréquentiel de Fourier. Ainsi la position des ordres de diffraction sera fonction du pas de réseau  $P$ . Afin de former l'image du masque au niveau de la plaquette au moins 2 ordres devront être captés par la pupille. Seules les fréquences spatiales supérieures à l'ouverture numérique  $NA$  seront captées par la pupille. Cette dernière agira comme un filtre passe-bas captant seulement les premiers ordres de diffractions. L'image formée sur la plaquette sera donc différente de l'objet sur le masque. Plus le nombre d'ordres captés par la pupille est important et plus l'image formée sur la plaquette sera fidèle à l'objet. Il existe donc un pas minimal en dessous duquel notre système ne peut résoudre l'image. Ce critère de résolution est appelé le Critère de Rayleigh, et est défini comme suit :

$$R = k_1 \cdot \frac{\lambda}{NA} \quad \text{Equation 4}$$

Avec :

$R$  : résolution maximale du système,  
 $k_1$  : facteur expérimental fonction des conditions du procédé,  
 $NA$  : ouverture numérique,  
 $\lambda$  : Longueur d'onde.

Si au moins deux faisceaux provenant du même point source sont captés par la pupille, une image aérienne de l'objet se formera au niveau de la plaquette. La Figure 17 représente les premiers ordres de diffraction (interférence à 2 ordres :  $-1/0$  et  $0/+1$ ) captés par la pupille pour un réseau de pas  $P$  avec une source partiellement cohérente de type annulaire, caractérisée par les facteurs de cohérence partielle  $\sigma_{in}$  et  $\sigma_{ext}$ .

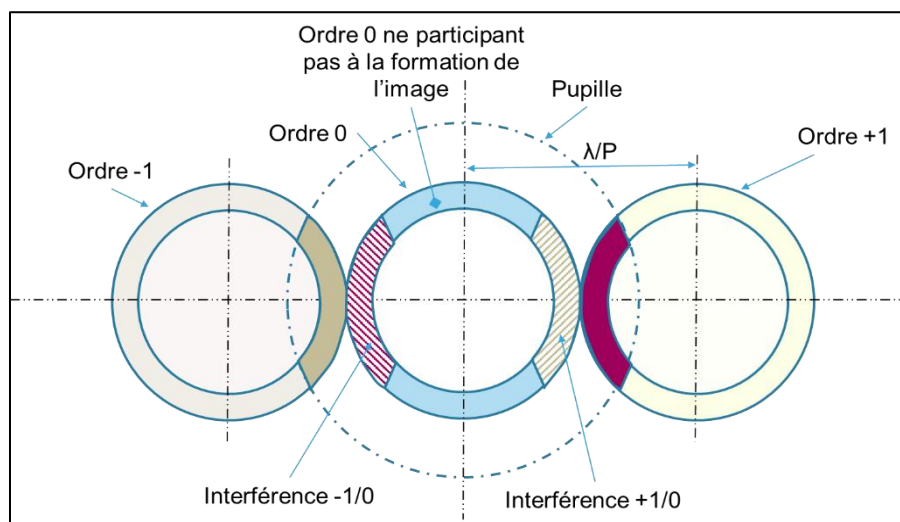


Figure 17: Représentation des deux premiers ordres de diffractions dans le plan de la pupille pour une source annulaire de longueur d'onde  $\lambda$ , d'ouverture numérique  $NA$  et de pas de réseau  $P$ .

## 7. Le contraste de l'image aérienne et son adaptation à la lithographie

Historiquement la qualité d'une image, comme en photographie par exemple, est évaluée et caractérisée par son contraste, qui se calcule comme suit :

$$\text{Contraste} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

Equation 5

Où  $I_{\min}$  et  $I_{\max}$  sont respectivement l'intensité lumineuse minimale et maximale de l'image. Pour une application de cette métrique en lithographie le contraste sera donc déterminé en mesurant ou calculant l'intensité lumineuse maximale (correspondant au centre de l'ouverture sur réticule) et minimale (correspondant au centre de la ligne sur réticule). La Figure 18 illustre de manière simplifiée le contraste.

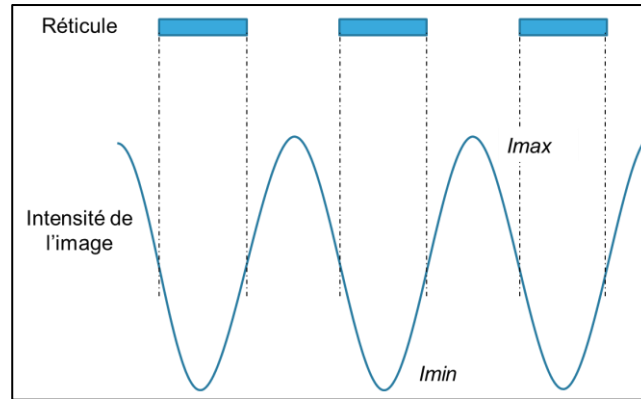


Figure 18 : Illustration du calcul du contraste en fonction de l'intensité de l'image

L'objectif étant d'obtenir le meilleur contraste pour l'image aérienne,  $I_{\min}$  doit être la plus faible possible pour avoisiner un contraste proche de 1. Même si elle très intuitive et claire, cette métrique n'est pas la plus adaptée pour les lithographes car elle ne reflètera pas la qualité du motif obtenu en lithographie. En effet, lorsque les motifs à imprimer sont larges devant la longueur d'onde, le contraste sera très proche de 1. De plus la comparaison du contraste pour une structure 1D (par exemple une structure Ligne & Espace) et une structure 2D de type contact ne reflètera pas la qualité réelle de l'image de l'une par rapport à l'autre. Enfin cette métrique ne tient pas compte également du profil du motif dans la résine, et deux structures différentes peuvent avoir un bon contraste sans pour autant que le profil résine des deux structures soit acceptable. *In fine* le lithographe s'intéresse non pas à ce qui se passe au centre de l'ouverture et/ou de la ligne, mais à la transition entre ces deux points. En effet plus cette transition est brutale, et meilleur sera le profil en bord de motif dans la résine. On s'intéresse donc à la pente de l'image aérienne en fonction de la position,  $\frac{dI}{dx}$  qui caractérise cette transition du point le plus lumineux au point le plus sombre. Afin de toujours refléter la qualité de l'image, on normalise la pente par l'intensité. En effet, si on double l'intensité lumineuse, la pente doublera mais pas la qualité de l'image. Il en résulte une nouvelle métrique :

$$\frac{1}{I} \frac{dI}{dx} = \frac{d \ln(I)}{dx} = \text{Logarithme de la pente} \quad \text{Equation 6}$$

Cette métrique est appelée logarithme de la pente ou ILS (de l'anglais Image Log Slope). De même si on normalise cette quantité par la largeur de l'ouverture sur masque  $w$  (de l'anglais width qui signifie largeur), on sera également en capacité de comparer la qualité de l'image entre différentes tailles de motifs. Il vient :



$$w. \frac{d \ln(I)}{dx} = \text{Logarithme de la pente normalisée} \quad \text{Equation 7}$$

Le logarithme de la pente normalisée ou NILS (de l'anglais Normalized Image Log Slope) reflètera donc la qualité de l'image et permet ainsi d'évaluer la manière dont les paramètres optiques affectent les profils résine, aussi pour des structures 1D que 2D. Nous verrons par exemple au chapitre B.II.3.B.iii comment le NILS permet d'évaluer l'effet du défocus sur la qualité de l'image. Plus le NILS sera élevé, meilleure sera la qualité de l'image, et par la suite le profil du motif étudié dans la résine.

### III. Les principaux paramètres de la lithographie

Ce dernier chapitre a permis d'aborder la constitution et le principe de fonctionnement d'un équipement de lithographie, l'obtention de l'image aérienne et la manière pour le lithographe d'en évaluer la qualité, nous allons à présent introduire les paramètres et les notions utilisés en lithographie et dans ce travail de thèse. La caractérisation d'un procédé de lithographie repose sur la définition de la fenêtre de procédé, PW (de l'anglais Process Window). La fenêtre de procédé résume pour un niveau donné (Grille, contact, métal, etc.) la plage de variation tolérée pour la position du plan focal (appelé aussi focus) et de la dose pour lesquelles les motifs présents sur le masque s'impriment dans les limites de spécificités. On fixe généralement ces limites à +/- 10% du CD ciblé, l'idéal étant d'avoir la fenêtre de procédé la plus grande possible afin de palier à certaines imperfections liées à l'intensité de la source, aux aberrations optiques des lentilles, à la planéité de la plaquette, aux variations locales d'épaisseur des différentes couches de matériaux qui composent le substrat ou encore à la topographie des motifs présents sur le réticule. On appelle la plage de variation maximale de la position du plan focal image la profondeur de champs, DOF [7] (de l'anglais Depth of focus) et la plage de variation maximale en dose la latitude en énergie EL (de l'anglais Exposure Latitude). Par simplicité on nommera indifféremment "position du plan focal" et défocus.

#### 1. La Matrice DOSE/FOCUS, ou le paramétrage de la dose nominale et du focus nominal

Une fenêtre de procédé est donc caractérisée par la latitude en énergie et par la profondeur de champ. L'objectif étant d'obtenir des motifs à une dimension donnée dans la limite de spécification, on cherche à obtenir la dose pour laquelle le motif est exactement celui désiré, soit la dose nominale. De même les lithographes cherchent également à obtenir la position du plan focal pour que le motif soit exactement imprimé à la dimension désirée. Cette position du plan focal sera appelée position nominale du plan focal. Dans la pratique, il est difficile de se concentrer seulement sur un des deux paramètres à déterminer. *En effet le focus et la dose sont corrélés.* Cependant certaines structures sont plus sensibles à une variation de dose, alors que d'autres seront plus sensibles à une variation de focus. Afin de trouver le point de fonctionnement nominal on passe par une étape d'exposition sur la plaquette en faisant varier pour chaque champs la dose et/ou la position du plan focal, comme illustré Figure 19. C'est ce que l'on appelle la matrice dose/focus, FEM (de l'anglais Focus Exposure Matrix).



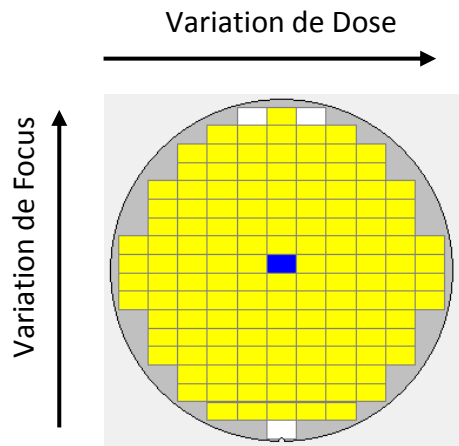


Figure 19 : illustration d'une matrice Dose /Focus réalisée sur plaquette. Le Champ en bleu correspond au point de fonctionnement paramétré par l'opérateur.

Des mesures dimensionnelles sont ensuite réalisées sur un Microscope électronique à balayage. Pour trouver la dose nominale on choisit une structure dense, par exemple un réseau de lignes. Pour trouver la position du plan focal nominal la mesure est faite sur une ligne isolée. La Figure 20 illustre un exemple de matrice réalisé pour un niveau Métal 28nm.

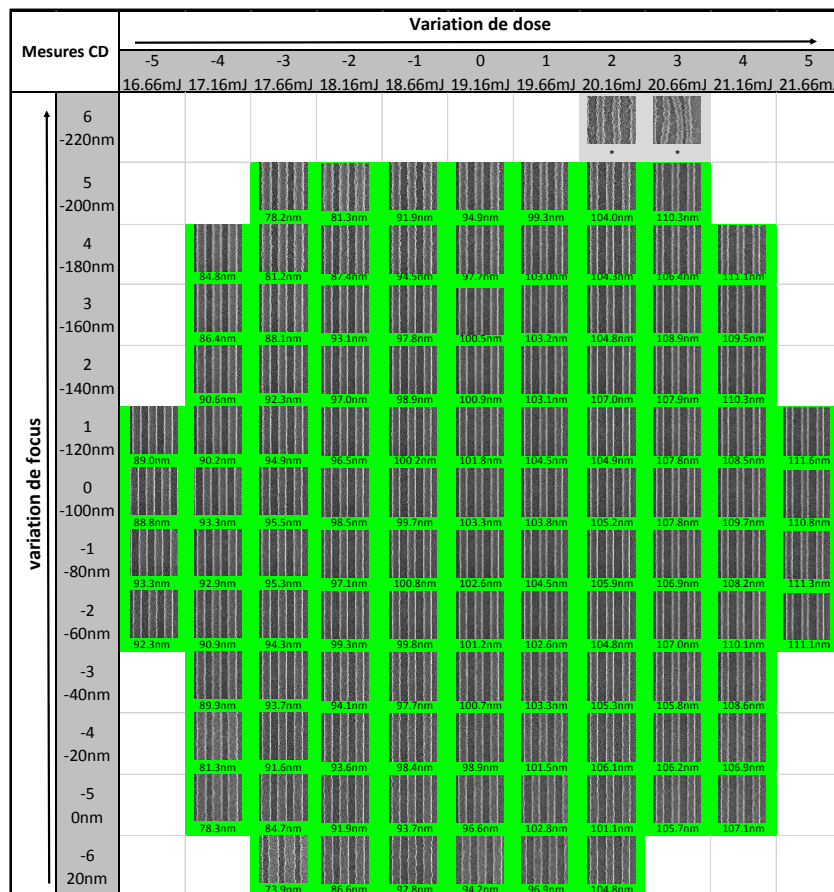


Figure 20 : Exemple de matrice Dose /Focus réalisée pour une structure.

Pour chaque niveau de dose utilisé on trace la courbe  $f(CD)=\text{défocus}$ . Ces courbes sont appelées Courbes de Bossung. La lecture de ces courbes permettent ensuite au lithographe de trouver la position focale optimale, BF (de l'anglais Best Focus) pour une structure donnée. La Figure 21 montre un exemple de courbe de Bossung pour une ligne isolée obtenue par simulation. Le BF correspond au point d'inflexion de chacune des courbes. En effet, la valeur

du best focus reste la même quel que soit le niveau de dose utilisé. Cela revient donc à dire que la position du plan focal optimal est celle pour laquelle quel que soit le niveau de dose utilisée, la dimension de la structure visée varie le moins. Sur plaquette cela correspond au profil résine le plus droit. Une fois le BF trouvé, on reporte cette valeur sur la courbe de Bossung de la structure dense, et pour une dimension visée on sera capable de déterminer la dose adéquate, comme montré en exemple Figure 21.

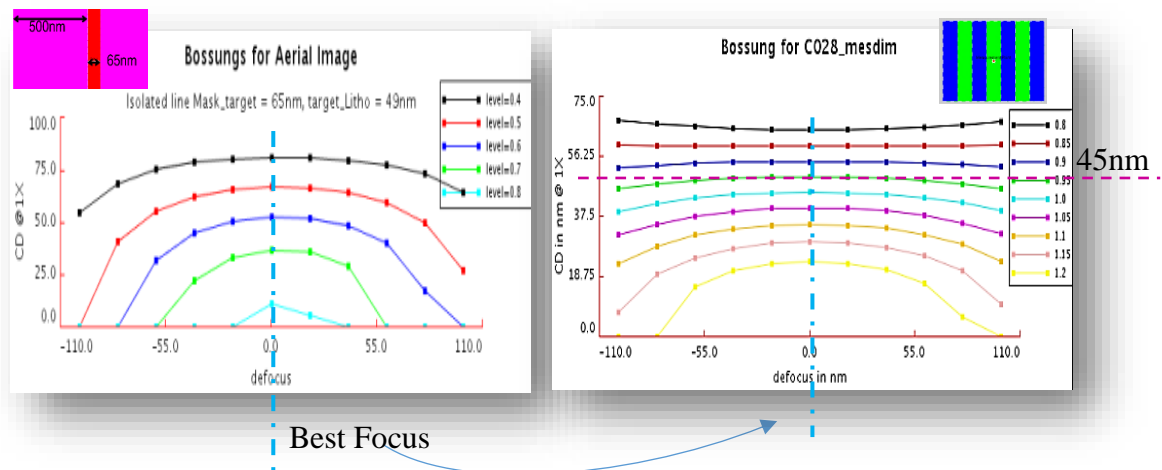


Figure 21 : Illustration de la détermination du Best Focus et de la dose nominale.

Dans le cas présenté ci-dessus, des structures en 1D sont utilisées. Les courbes de Bossung sont tracées en réalisant une régression quadratique à 2 paramètres,  $CD=f(Dose, Focus)$ .

## 2. La Latitude en énergie

Comme énoncé précédemment, la latitude en énergie correspond à la variation de dose tolérée permettant d'obtenir un motif spécifique avec une tolérance sur sa taille variant entre +/-10%. Dans la pratique, les lithographes choisissent une structure isolée car elle sera plus sensible aux variations de dose. A focus fixe, on fait donc varier la dose d'exposition pour notre structure de référence, et on choisit ensuite la dose. Enfin pour le CD nominal visé le lithographe trace la courbe de variation de la latitude en énergie en fonction de la profondeur de champ, comme le montre l'exemple de la Figure 22.

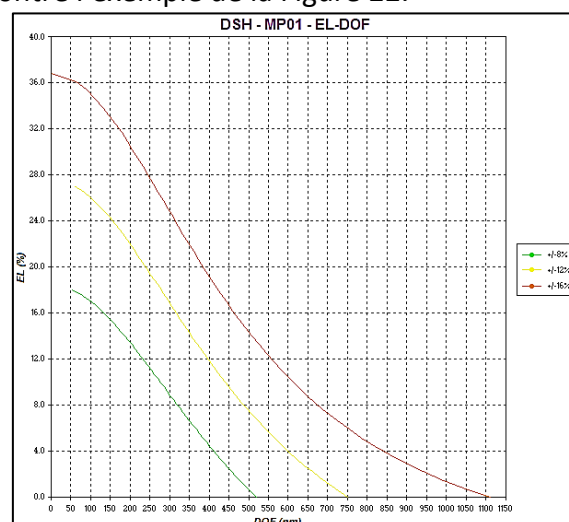


Figure 22 : Exemple de courbe  $EL_{CD}=f(DOF)$ , pour une structure Line & Space de pas 100nm et de  $CD_{ligne}=50nm$

Cette courbe permet de voir également que pour une taille de motif fixe, l'amélioration de la latitude d'exposition se fera forcément au détriment d'une perte au niveau de la profondeur de champs, et vice versa. Le compromis se fera donc en fonction d'autres éléments en fonction du niveau choisi.

### 3. La profondeur de champs

La profondeur de champs correspond à la distance maximale en focus autour du plan focal image, pour laquelle la dimension visée ne dépasse pas le seuil de tolérance. La DOF est donnée par la relation suivante [4, p413] :

$$DOF = k_2 \cdot \frac{\lambda}{NA^2} \quad \text{Equation 8}$$

Où  $k_2$  est une constante dépendant de la résine et du facteur de cohérence partielle de la source.

La Figure 23 illustre la profondeur de champ associée à une mesure dans la résine.

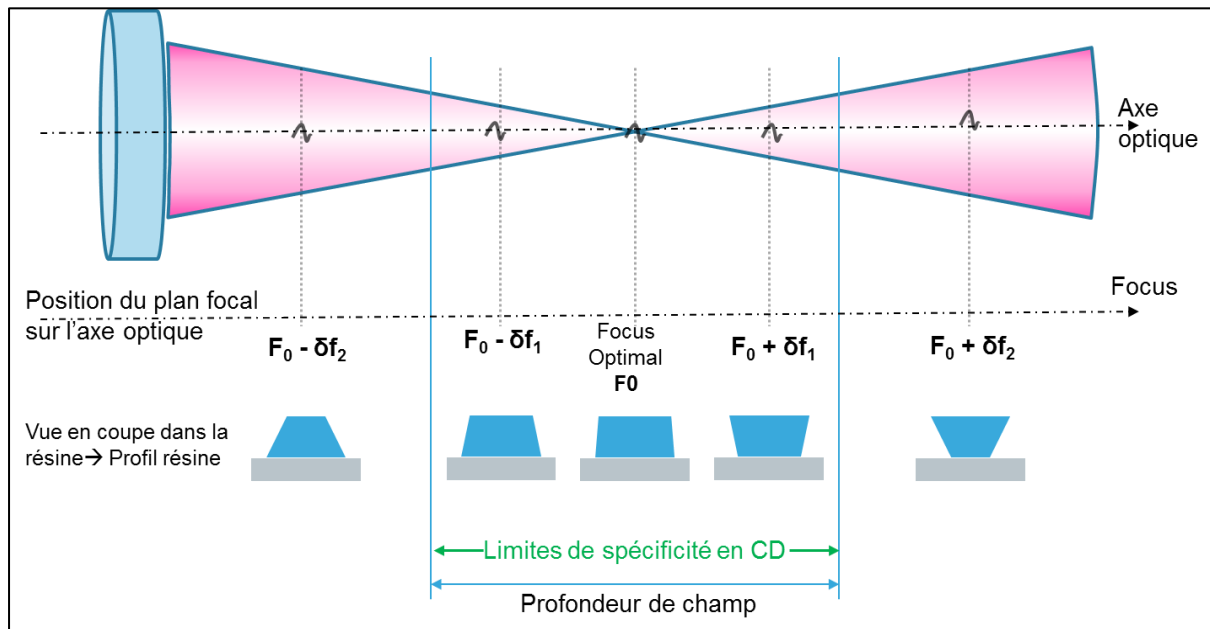


Figure 23 : Description de la profondeur de champs par rapport au profil résine

### 4. Le facteur d'erreur du réticule

Le facteur d'erreur du réticule permet d'évaluer la linéarité et la stabilité du système de projection optique au complet lors du transfert des motifs du réticule sur la plaquette [8]. On définit ainsi le MEEF (de l'anglais Mask Error Enhancement Factor) par la formulation suivante :

$$MEEF = M \cdot \frac{\delta CD_{plaquette}}{\delta CD_{masque}} \quad \text{Equation 10}$$

Avec

M : facteur de réduction du système optique, M=4 pour les scanneurs 193nm à immersion.

$\delta CD_{\text{masque}}$  : variation de la dimension du motif étudié sur réticule,

$\delta CD_{\text{plaquette}}$  : variation de la dimension du même motif sur plaquette.

Le MEEF permet donc d'évaluer l'impact d'une modification de la dimension d'un motif du masque ( $CD_{\text{masque}}$ ) par rapport au même motif reproduit sur plaquette ( $CD_{\text{plaquette}}$ ). Si le MEEF est égal à 1, cela signifie que le transfert est idéal et donc que les motifs présents sur le masque sont reproduits avec la même exactitude sur plaquette. En pratique le MEEF n'est jamais égal à 1 à cause des aberrations optiques, du comportement de la résine, de la gravure mais aussi des effets de proximité optique que l'on abordera chapitre A.IV.4. Sur plaquette on peut être amené à retrouver des MEEF allant jusqu'à 7. Par ailleurs la qualité de l'image étant différente pour un motif selon l'environnement dans lequel il est placé, le MEEF pour ce même motif sera également différent.

#### IV. Les techniques d'améliorations de la performance lithographique

Jusqu'ici nous avons introduit les notions nécessaires à la compréhension de la problématique dans sa globalité. Nous nous attarderons dans cette partie à resituer ce travail de thèse dans son contexte. L'innovation en microélectronique est essentiellement guidée par l'augmentation de la densité d'intégration sur silicium. La lithographie est une étape clé dans ce processus d'évolution et la résolution de motifs de plus en plus petits et complexes a forcé les industriels à trouver des moyens de poursuivre cette course à la miniaturisation, sans pour autant que les équipements le permettent en théorie. En effet, les scanners extrêmes UV utilisant une source de 13,5nm de longueur d'onde font languir d'impatience les industriels, de nombreux verrous technologiques liés à la puissance des sources nécessitent encore des efforts [9]. Les autres nouvelles technique d'impression regroupées sous l'appellation NGL (de l'anglais Next Generation Lithography) peinent à augmenter leur capacité de production liée au volume imposé par l'utilisation dans un contexte industrielle [9]. L'amélioration de la résolution nécessite donc la mise en œuvre d'autres moyens pour satisfaire la feuille de route énoncée par l'ITRS (Consortium rassemblant des industriels qui permet de fixer une feuille de route concernant l'évolution des technologies). L'ensemble de ces nouvelles techniques est regroupé sous l'appellation RET (de l'anglais Résolution Enhancement Technics). Nous repartirons de la définition de la résolution R et du schéma de principe de fonctionnement pour introduire et expliciter l'ensemble de ces techniques.

$$R = k1 \cdot \frac{\lambda}{NA} \quad \text{Equation 11}$$

Avec

R : résolution limite du système,

k1 : facteur expérimental fonction des conditions du procédé,

NA : ouverture numérique,

$\lambda$  : Longueur d'onde.

Cette équation nous permet de voir que les moyens permettant d'augmenter la résolution (c'est-à-dire minimiser R) sont d'augmenter l'ouverture numérique et/ou de diminuer la longueur d'onde et/ou de diminuer le facteur k1. Le facteur k1 est un facteur qui dépend du procédé, il est difficile de le calculer de manière purement théorique. La Figure 24 résume

pour chaque partie du système d'exposition les leviers de contrôle avec lesquels il est possible d'améliorer la résolution.

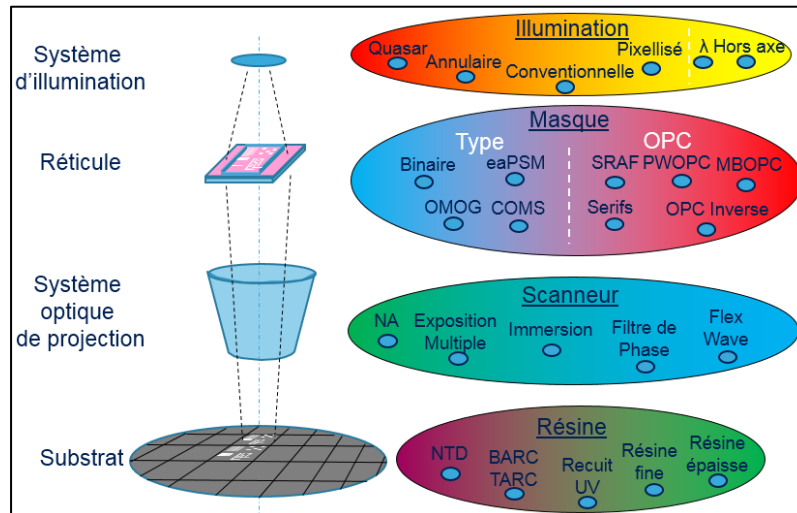


Figure 24 : Descriptif des techniques d'amélioration de la résolution en fonction du parcours optique de la source au substrat

On peut diviser les leviers d'améliorations de la résolution en quatre parties, chacune étant une étape sur le chemin optique de la source à la plaquette. On commencera par détailler les améliorations de la résolution faites au niveau du système d'illumination, le masque, le système optique de projection et enfin au niveau de la plaquette.

### 1. Amélioration de la résolution : le système d'illumination

Les améliorations apportées au niveau du système d'illumination permettent de réduire le facteur de procédé  $k_1$ . Le premier levier consiste à utiliser une illumination hors axe et le second à jouer sur le facteur de cohérence en modifiant la forme de la source.

Le principe de l'illumination hors axe repose sur l'éclairage du masque non plus sous incidence normale mais sous incidence oblique. On définit ainsi l'angle  $\beta$  comme montré Figure 25. Les ordres de diffraction dans le plan fréquentiel de Fourier sont décalés et permettent ainsi de collecter des fréquences spatiales plus hautes en fonction de l'angle d'incidence  $\beta$ . Il vient :

$$\sin(\alpha_m) = \sin(\beta) + m \cdot \frac{\lambda}{p}, \text{ avec } m \in \mathbb{Z} \text{ (entiers relatifs)} \quad \text{Equation 12}$$

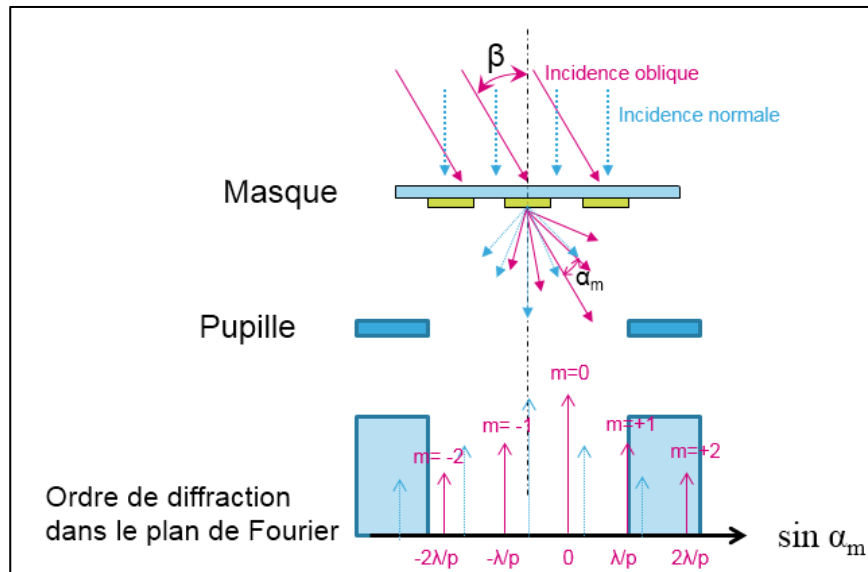


Figure 25 : Principe de l'illumination hors axe

Comme nous l'avons exposé au chapitre A.II.6. , la qualité de l'image aérienne dépend des fréquences spatiales captées par la pupille et des interférences résultantes. En introduisant un angle d'incidence, nous serons capables d'obtenir des interférences faisant intervenir plus d'ordre de diffraction par rapport à une illumination sous incidence normale. Dans le cas d'une source étendue partiellement cohérente, on peut considérer les rayons lumineux comme issus d'angles incidents différents. La figure de diffraction sera donc assimilée à une somme de peignes de Dirac distribués de chaque côté des pics obtenus sous incidence normale. L'intensité de l'image aérienne résultante sur plaquette sera donc fonction des surfaces de recouvrement entre les ordres de diffractions effectivement captés par la pupille. La Figure 26 schématise le cas d'une source conventionnelle de facteur de cohérence  $\sigma$ , pour un réseau de lignes de pas  $P$  où seuls les ordres 0, -1 et +1 sont captés et filtrés par la pupille.

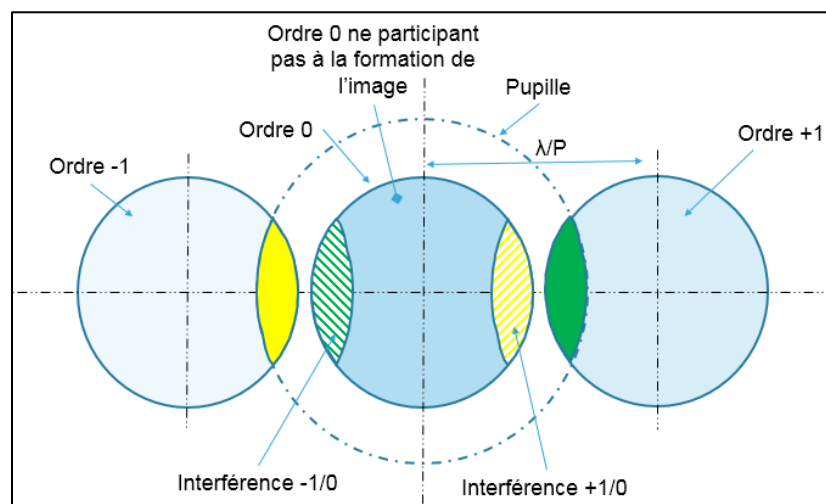


Figure 26 : Surface de recouvrement entre les ordres de diffractions captés par la pupille. Cas d'une source conventionnelle de longueur d'onde  $L$ , pour un pas  $P$ , avec les ordres -1, 0 et +1.

D'après la théorie d'Hopkins [4], l'intensité résultante sur plaquette est fonction des surfaces de recouvrement entre les ordres effectivement captés par la pupille. Dans l'exemple de la Figure 26, l'intensité peut être exprimée comme suit [4] :

$$I(x) = S_0 \cdot C_0^2 + S_1 \{ C_0^2 + C_1^2 + 2C_0C_1 \cos \frac{2\pi x}{P} \} \quad \text{Equation 13}$$

X : la position dans le plan de la plaquette

P : le pas de réseau

S<sub>0</sub> : la surface de l'ordre 0

S<sub>1</sub> : la surface de recouvrement entre les ordres -1/0 ET 0/+1

C<sub>0</sub> et C<sub>1</sub> : constantes prenant en compte la longueur d'onde λ, le pas de réseau P, l'ouverture sur masque β et le facteur de transmission complexe du masque T tels que :

$$C_0 = \beta + (1 - \beta) \cdot T \quad \text{Equation 14}$$

$$C_1 = \frac{[(1 + T) \cdot \sin(\beta \cdot \pi)]}{\pi}$$

$$\beta = \frac{CD_{quartz}}{P}$$

Pour un masque à décalage de phase, la transmission T<sub>PSM</sub> est donnée par :

$$T_{PSM} = \left[ 1 - \frac{(n_{MoSi} - 1)^2 + k_{MoSi}^2}{(n_{MoSi} + 1)^2 + k_{MoSi}^2} \right] \cdot e^{\frac{-4\pi \cdot t_{MoSi} \cdot k_{MoSi}}{\lambda}} \quad \text{Equation 15}$$

Où  $t_{MoSi}$  : épaisseur de la couche de MoSi sur le masque pour un masque à décalage de phase.

La surface de l'ordre 0 ne participant pas aux interférences aura pour contribution au niveau de l'intensité lumineuse une composante continue. Pour notre exemple, seules les surfaces de recouvrements correspondant aux interférences entre les ordres -1/0 et 0/+1 vont participer à la modulation de l'intensité, qui permettra d'avoir une image aérienne contrastée et donc un profil résine. L'ordre 0 ne participant pas à la formation de l'image, de nouvelles illuminations permettant de réduire cette composante continue sont aujourd'hui utilisées. Les sources les plus classiques sont présentées Figure 27.

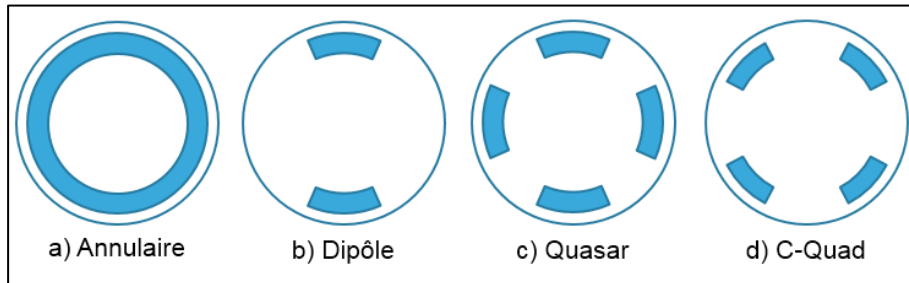


Figure 27 : Exemple de sources classiques utilisées en photolithographie

Bien que l'impact de la composante continue ait été diminué par l'introduction de ces sources, il est possible d'associer différentes sources pour favoriser une meilleure résolution de

certaines structures, une meilleure profondeur de champs ou plus simplement une meilleure fenêtre de procédé. Ces sources sont appelées sources paramétriques, un exemple est donné Figure 28.

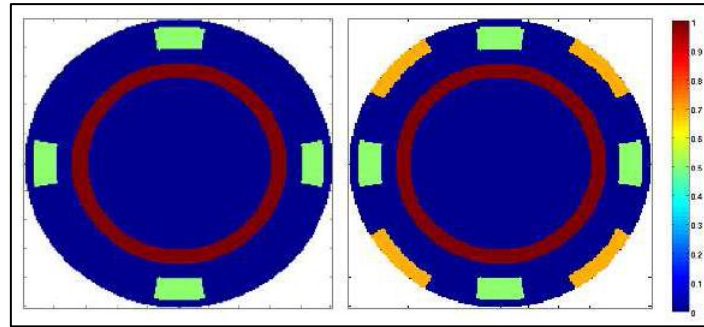


Figure 28 : Exemple de sources paramétrées. A gauche deux contributions : Annulaire,  $l = 1$ ,  $\sigma_{in} = 0.6$ ,  $\sigma_{out} = 0.7$  ; Cquad,  $l = 0.5$ ,  $\sigma_{in} = 0.8$ ,  $\sigma_{out} = 0.95$ , angle d'ouverture =  $20^\circ$ . A droite quatre contributions : Annulaire,  $l = 1$ ,  $\sigma_{in} = 0.6$ ,  $\sigma_{out} = 0.7$  ; Cquad,  $l = 0.5$ ,  $\sigma_{in} = 0.8$ ,  $\sigma_{out} = 0.95$ , angle d'ouverture =  $20^\circ$  ; Cquad,  $l = 0.8$ ,  $\sigma_{in} = 0.4$ ,  $\sigma_{out} = 0.6$ , angle d'ouverture =  $30^\circ$  ; Quasar  $l = 7$ ,  $\sigma_{in} = 0.9$ ,  $\sigma_{out} = 1$ , angle d'ouverture =  $30^\circ$ .

Enfin d'autres techniques ont permis l'amélioration des géométries de la source [10]. Ces sources, dites pixelisées, sont obtenues grâce aux méthodes de co-optimisation source-réticule et source-réticule-cible. Pour la co-optimisation source-réticule, le principe consiste à prendre en compte les motifs présents sur réticule comme objet diffractant et ceux que l'on souhaite obtenir sur plaque comme motifs cibles. On définit alors la source comme étant une carte d'intensité lumineuse, lui permettant d'avoir des degrés de liberté que la simple association de contributions de source classique ne permet pas. Grâce à ce type de source, il est possible d'améliorer la résolution de motifs plus complexes, et d'améliorer ainsi la fenêtre de procédé. Concernant la co-optimisation source-réticule-cible, une étape supplémentaire est requise. Elle consiste à effectuer un redimensionnement des motifs présents sur réticule après avoir optimisé la source, ce qui améliore la fidélité des motifs résolus sur plaque par rapport aux motifs présents sur réticule. Un exemple de source pixelisée est donné Figure 29.

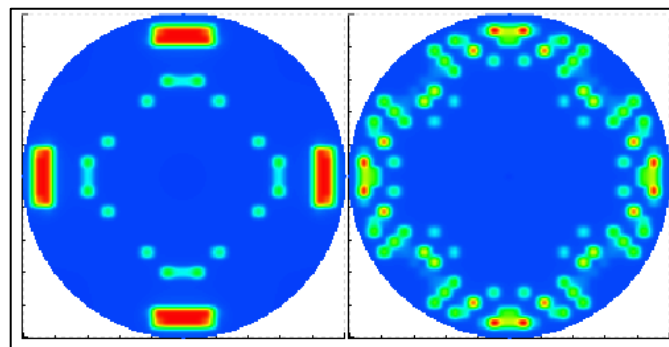


Figure 29 : Exemple de sources dites pixelisées.



## 2. RET : partie Masque

Toujours dans l'étape d'amélioration de la résolution, de nombreux réticules ont été introduits. Etant l'objet de cette thèse, les réticules seront introduits dans ce chapitre dans l'ordre d'apparition chronologique.

Les premiers masques utilisés en lithographie par projection optique étaient les masques binaires ou BIM [1] (de l'anglais "Binary Intensity Mask"). Ces masques sont composés d'une couche mince d'absorbeur (matériau totalement opaque à la longueur d'onde de travail) déposé sur un substrat transparent. Des motifs sont présents dans la zone active du réticule. Ainsi les masques binaires transmettent la lumière dans les zones évidées et absorbent totalement la lumière dans les zones opaques. La nature des matériaux utilisés pour fabriquer les couches absorbantes et les substrats a évolué au cours du temps. Concernant les substrats, les premiers matériaux utilisés pour leur fabrication étaient des verres sodocalciques, composés de silice  $\text{SiO}_2$ , de calcium et de sodium. Ensuite les verres Crown ont fait leur apparition car ils présentaient une plus grande homogénéité, une faible porosité et une facilité d'usinage accrue par rapport aux verres sodocalciques. Les technologies évoluant vers la miniaturisation, il a été alors nécessaires de prendre en compte le phénomène de dilatation thermique des substrats lors des phases d'écriture et de gravure. De ce fait le choix s'est porté sur les verres de quartz, qui présentait à la fois de bonnes propriétés optiques et un faible coefficient d'expansion thermique. Aujourd'hui les substrats utilisés sont toujours en verre de quartz. Les premiers BIM, que l'on appelle aussi masques conventionnels, sont les COG [1] (de l'anglais Chromium-On-Glass). Le matériau absorbant utilisé est une couche mince en alliage de chrome composée essentiellement de Chrome Cr, d'azote  $\text{N}_2$  et d'oxygène  $\text{O}_2$  déposés sur un substrat en quartz. L'épaisseur de cette couche absorbante sur les premiers masques COG était d'environ 100nm.

La couche d'absorbeur de chrome est souvent considérée comme étant homogène et donc monocouche. Hors c'est en réalité une couche dont la composition varie suivant l'épaisseur. En effet la première couche du film doit être suffisamment adhérente sur le substrat en quartz, et la couche supérieure doit posséder certaines propriétés anti réfléchives, afin d'éviter certains effets parasites lors de l'écriture des motifs sur réticule, que nous aborderons au chapitre C.III.1.a. Afin d'augmenter les performances des masques et de réduire les effets du Champs Electromagnétique, l'épaisseur de la couche de chrome a été réduite. L'adhérence du chrome sur le quartz ayant été détériorée par cette réduction d'épaisseur, et les propriétés absorbantes ayant également été affectées, une nouvelle couche de matériau a été introduite entre le quartz et le chrome pour pallier à ce manque d'adhérence. Ce matériau communément appelé MoSi, est un alliage de molybdène Mo, de silicium Si, d'oxygène O et d'azote N, que l'on retrouve dans la littérature sous la forme  $\text{MoSiO}_x\text{N}_y$ . En effet les rapports stœchiométriques de l'oxygène et de l'azote peuvent être modulés lors de la fabrication de ces couches pour adapter les indices optiques aux besoins [11] [12]. Toujours avec l'évolution des technologies, d'autres réticules ont vu le jour. En effet pour des pas de réseau de plus en plus petits, la modulation en intensité avec des masques binaires n'étant plus suffisante pour transférer les motifs dans la résine au niveau de la plaque, il a été introduit des masques à décalage de phase, communément appelés PSM (de l'anglais Phase Shift Mask). Le principe d'un masque à décalage de phase est d'introduire un déphasage de  $180^\circ$  entre l'onde traversant un motif et l'onde voisine ne traversant pas le motif. Cette technique permet donc de moduler l'intensité résultante au niveau de la plaque pour obtenir le motif désiré dans la

résine. La Figure 30 illustre un exemple de masque à décalage de phase, ou le déphasage est réalisé grâce à l'ajout d'une couche de matériau partiellement transmissif.

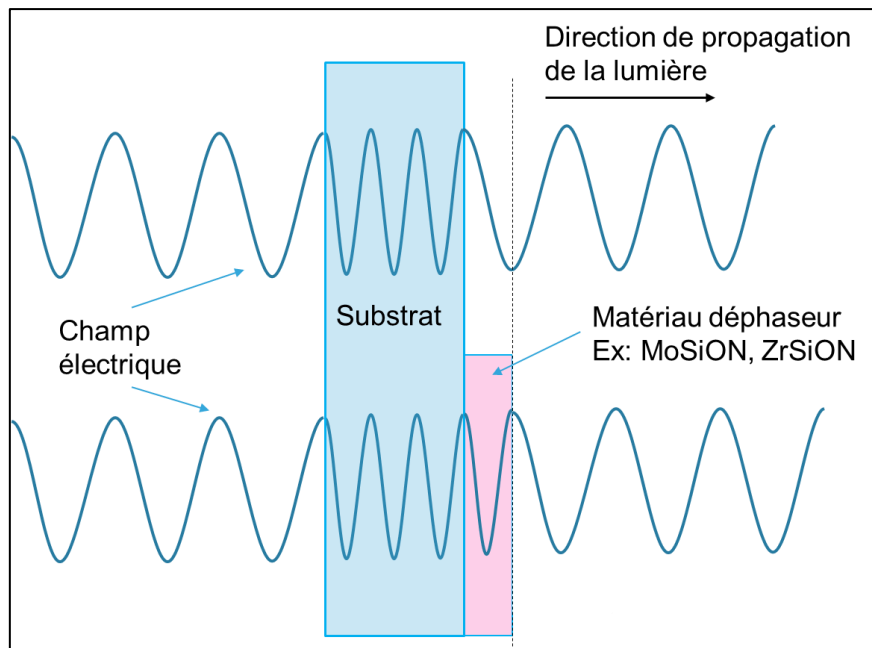


Figure 30 : Principe du décalage de phase dans un PSM atténué (détails dans la suite du document). Ici la différence de phase est de  $\lambda/2$ .

La Figure 31 montre les deux différents types de masques à décalage de phase existants : alterné et atténué. Le principe repose sur la modification du chemin optique soit :

- en jouant sur la gravure du quartz pour obtenir un masque alterné,
- en jouant sur l'indice d'absorption du matériau absorbant pour obtenir un masque atténué.

Certains masques alternés utilisent le chrome [13] en tant que matériau absorbant, et le décalage de phase de  $180^\circ$  requis est introduit en venant graver le substrat lui-même. Il existe également des masques alternés appelés Chromeless PSM [14]. Ces derniers n'ont pas de couche mince d'absorbants et le déphasage est introduit par la gravure du quartz aux endroits où les motifs sont désirés. L'inconvénient majeur des masques alternés est la phase de nettoyage (requis après gravure et lors de réparation suite à un défaut pouvant apparaître lors de l'usage en production), auquel vient s'ajouter l'imprécision de la profondeur de gravure. Ce type de masque est donc très peu utilisé en milieu industriel et pas du tout utilisé chez STMICROELECTRONICS Crolles.

Il existe différents matériaux utilisés en tant qu'absorbant [13] [14] [15]. Les masques à décalage de phase utilisés à Crolles sont des masques à décalage de phase atténués. Ces masques autorisent une transmission partielle de l'onde incidente dans les zones contenant l'absorbant, de l'ordre de 6%, et un décalage de phase de  $180^\circ$  permettant ainsi de la modulation en intensité au niveau de la plaquette. La Figure 31 récapitule les différents masques à décalage de phases existants ainsi que leur principale influence sur l'intensité reçue par la résine à la surface de la plaquette.

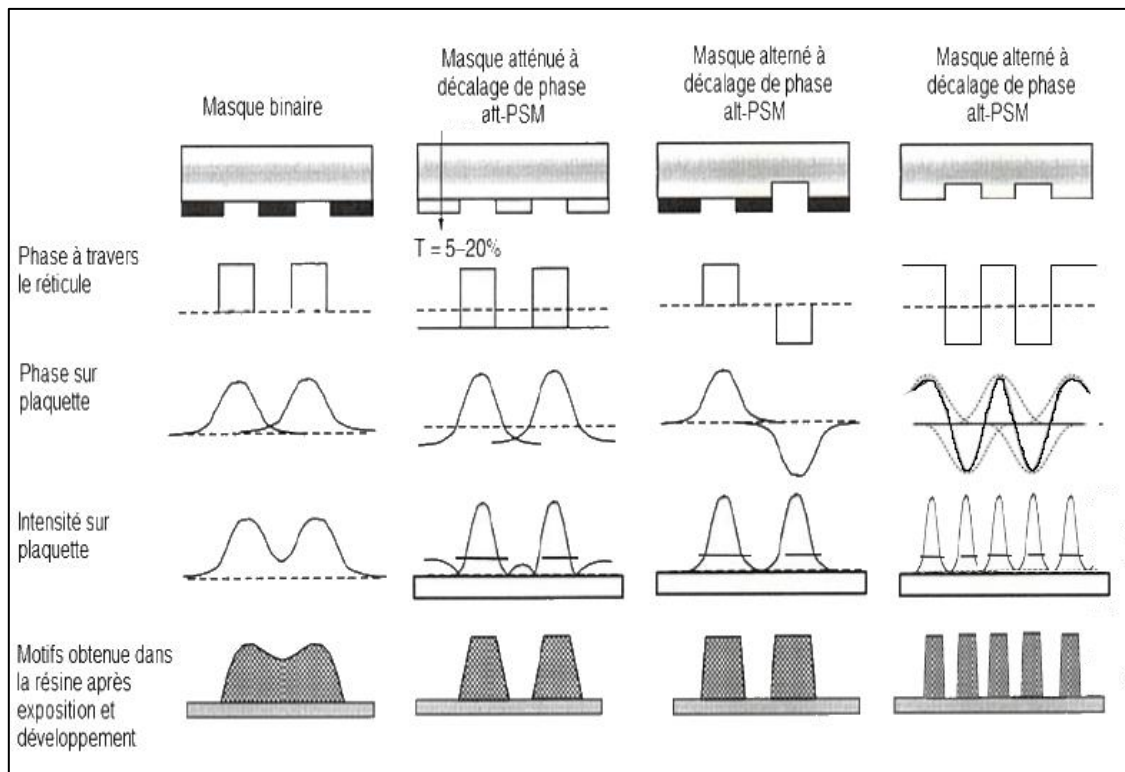


Figure 31 : Schéma illustrant une comparaison entre les intensités lumineuses obtenues avec un masque binaire et divers masques à décalage de phase

Toujours dans l'étape d'amélioration de la résolution de nouveaux masques que l'on appelle OMOG (de l'anglais "Opaque MoSi On Glass") ont été introduit par Shin-Etsu<sup>2</sup> pour les nœuds 32nm et 28nm. Ces masques permettaient d'avoir de meilleures performances lors de l'écriture et de la gravure des motifs, notamment en termes de fidélité et de distorsion des motifs et d'uniformité CD. La couche de matériaux absorbants déposée est, comme pour les masques à décalage de phase, un alliage de Molybdène. En revanche le matériau est plus dense et ne permet plus d'avoir une transmission de l'onde incidente. Les masques OMOG sont donc des masques binaires, que l'on retrouve dans la littérature sous l'appellation anglaise UBM pour Ultimate Binary Masks. L'épaisseur de la couche absorbante est de l'ordre de 60nm. Par rapport aux masques binaires classiques utilisant une couche mince de chrome, les effets de champs électromagnétiques sont réduits. On retrouve un produit homologue chez HOYA<sup>2</sup> que l'on appelle COMS pour "Cr-hardmask On MoSi". Toujours dans l'optique de réduire les effets de champ électromagnétique, les fabricants de réticules continuent de travailler sur la réduction des épaisseurs des couches minces des OMOG. La dernière génération de réticules présente une couche mince de l'ordre de 50nm. On développera davantage la structure de l'empilement des réticules dans la partie B.

<sup>2</sup> Shin-Etsu et Hoya sont des fabricants de substrats pour les réticules avant gravure.

### 3. RET : partie Scanner et résine

L'amélioration de la résolution passe aussi par des améliorations faites sur l'équipement d'exposition. Comme présenté au chapitre précédent, elles ont été faites au niveau des sources lumineuses et des longueurs d'ondes associées et également en ce qui concerne l'ouverture numérique (voir définition chapitre A.II.4). La Table 2 permet de corréler l'apparition et l'utilisation des sources au facteur d'ouverture numérique, et à la diminution du facteur  $k1$  liée à l'amélioration de la résolution.

Modèle	900	1100	1200	1400	1700i	1950i
Longueur d'onde de la source	248	248	248	193	193	193
Nœud technologique	130	100	80	65	50	28
NA	0.63	0.75	0.85	0.93	1.20	1.35
$k1$	0.42	0.39	0.35	0.31	0.31	0.31

Table 2 : Evolution du facteur  $k1$  et de l'ouverture numérique

L'augmentation de l'ouverture numérique s'est faite avec l'arrivée des scanners à immersion, qui a permis de passer à des ouvertures numériques supérieures à 1. En effet l'ouverture numérique dépend de l'indice optique du milieu dans lequel l'image se forme, après la lentille de sortie du système optique, l'air a ainsi laissé sa place à l'eau avec un indice optique passant de 1 à 1,33. Les verrous technologiques permettant le transfert de l'image du réticule dans la résine en immersion ont été levés.

Parmi les autres techniques d'amélioration de la résolution mises en œuvre pour la partie scanner, la technique d'impression par double exposition permet de repousser encore la limite de résolution maximale que peut atteindre l'équipement optique. Cette technique consiste à diviser en 2 réticules les informations présentes sur un même niveau de circuit [16]. En revanche cette technique impose un contrôle précis de l'alignement des impressions successives. La Figure 32 illustre le principe de cette technique.

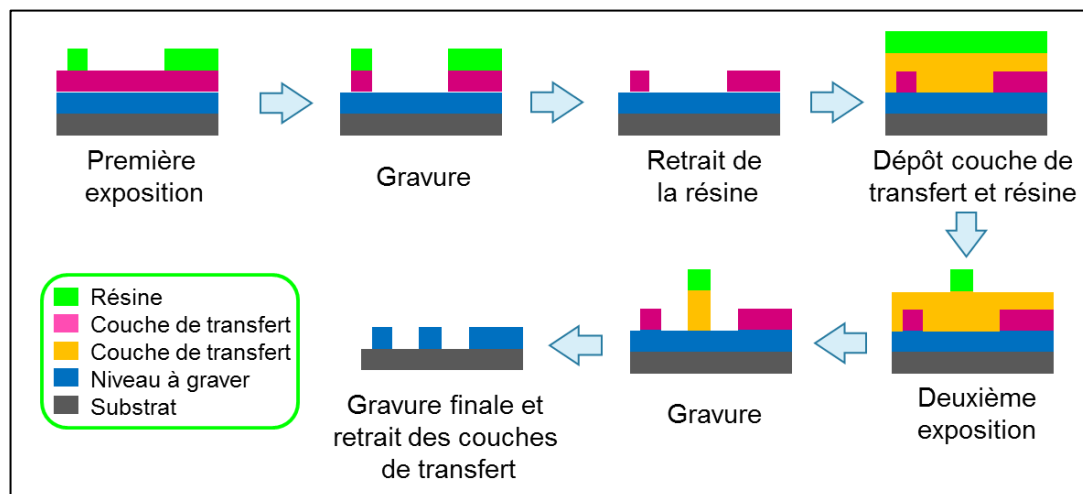


Figure 32: Illustration du principe de double exposition

Aujourd'hui certains auteurs envisagent également des technologies basées sur des techniques de triple voir quadruple impression pour les nœuds avancés tels que pour le 14nm [17] ou le 7nm [18], étant donné le manque de maturité des nouvelles générations d'équipement de lithographie. Au départ l'arrivée industrielle d'un équipement fonctionnant avec une source Ultra-Violet Extrême, EUV, ayant pour longueur d'onde 13,5nm, devait permettre le développement des nœuds technologique sub-32nm. Les premières feuilles de route faisant apparaître l'EUV datent des années 2004, prédisant une arrivée de l'équipement à l'horizon 2010. En 2016 cet équipement est encore sous phase expérimentale et bien que de nombreux verrous technologiques aient été résolus, il en reste encore aussi bien au niveau des réticules (contrôle des défauts par exemple) que de l'équipement (puissance des sources par exemple).

Enfin d'autres modifications faites au niveau des résines permettent d'améliorer la résolution, avec notamment l'ajustement de la sensibilité à la dose, le contrôle de la rugosité des motifs [19] et l'inclinaison des profils. Parmi les derniers travaux en date à STMicroelectronics Crolles concernant l'étude des motifs et qui s'inscrivent dans l'étape d'amélioration de la résolution, on retrouve les travaux de caractérisation et de modélisation des effets d'empilement des couches minces sous la résine pendant l'étape de lithographie [20].

Le chapitre suivant vise à décrire les techniques d'améliorations associées aux modifications dimensionnelles des motifs présents sur le réticule, pour pallier au manque d'information résultant du processus de diffraction associé à l'utilisation d'un scanneur.

#### 4. Les effets de proximité optique et la correction de ces effets.

Au chapitre A.II.6 nous avons vu que la qualité de l'image aérienne obtenue en sortie du système optique est fonction du nombre d'ordre de diffraction capté par la pupille. Bien que l'utilisation de source étendue présente les avantages d'une illumination hors axes (collecte des ordres de diffractions supérieurs, cf. chapitre A.IV.1), deux structures identiques sur réticule mais dont l'environnement est différent ne seront pas résolues avec les mêmes dimensions sur plaquette. C'est ce que l'on appelle les effets de proximité optique.

Les principaux effets de proximité optique observables sur plaquette sont :

- Les raccourcissements des fins de lignes,
- L'arrondissement des coins,
- La modification des largeurs de lignes en fonction de la densité de motifs de l'environnement dans lequel ces lignes se trouvent.

La correction des effets de proximité optique, que l'on nomme OPC (de l'anglais Optical Proximity Correction effect) consiste à modifier la géométrie des motifs présents sur réticule afin d'obtenir une meilleure fidélité des motifs imprimés sur plaque par rapport aux motifs désirés. Les techniques mises en œuvre dans le cadre de l'OPC permettent d'adresser l'ensemble des phénomènes que nous avons introduits jusqu'ici, en prenant le problème à l'inverse. Cela consiste à déterminer quels doivent être les motifs sur réticule permettant d'obtenir les motifs désirés sur plaque. Ainsi les divers phénomènes sont compensés par des modifications géométriques et/ou des ajouts de motifs diffractants non résolus d'aide à la résolution. Avec l'évolution des technologies et la miniaturisation des composants, de nombreuses techniques permettant à la fois une modification des géométries de plus en plus

complexes et la prise en compte des phénomènes parasites ont été introduites. Un exemple illustrant les différentes techniques de modifications de géométries est donné Figure 33.

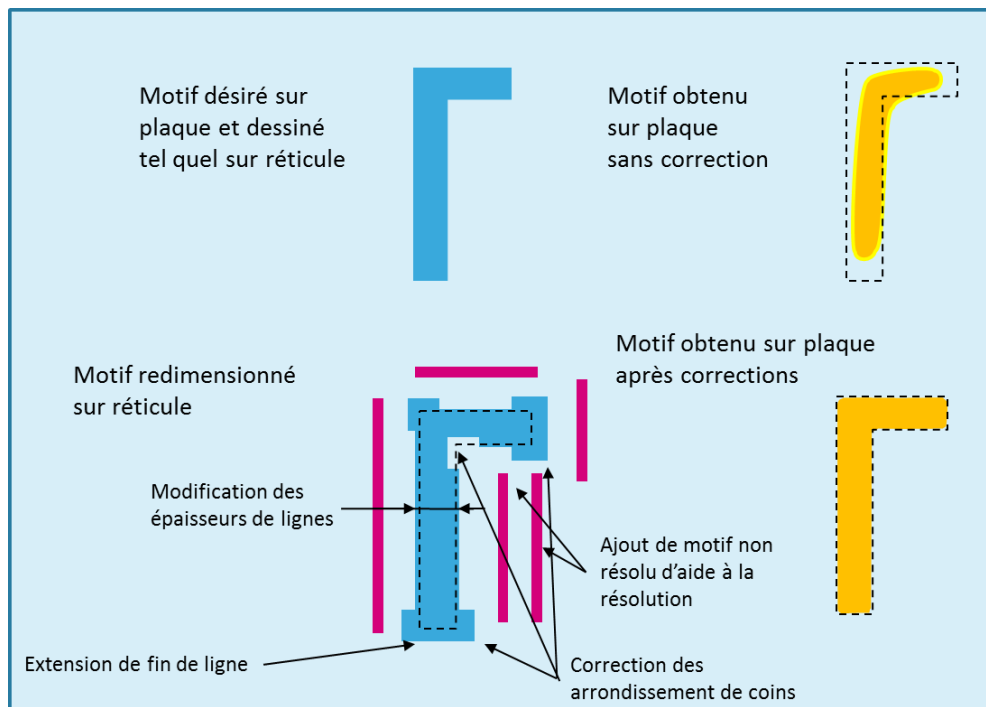


Figure 33 : Représentation des principales corrections apportées par l'OPC.

Aux prémices de l'OPC, les corrections étaient basées uniquement sur l'utilisation de tables, préalablement étalonnées à partir de motifs simples. Cet étalonnage consiste à embarquer des structures sur réticule, à les mesurer ensuite sur plaquette en utilisant un microscope électronique à balayage, et enfin établir les tables de correction correspondant à chaque type de motif selon ses caractéristiques propres (taille) et en fonction de son environnement (Isolé, semi-dense et dense). Avec l'évolution des technologies les motifs sont par la suite devenus de plus en plus complexes et les niveaux contenaient de plus en plus d'informations. Les corrections basées sur ces tables ne permettaient plus d'atteindre la fidélité des motifs désirés sur plaque. A partir du nœud technologique de 90nm, une nouvelle méthode basée sur la simulation de l'étape lithographique a vu le jour. Néanmoins l'utilisation des tables n'a pas disparu et est encore utilisée aujourd'hui pour appliquer des corrections spécifiques comme par exemple pour le biais lithographie-gravure.

La correction des effets de proximité optique basée sur l'utilisation de modèle mathématique est un processus itératif composé de trois principaux éléments :

1. Un modèle mathématique permettant de simuler l'étape de photolithographie. Il permet d'obtenir un contour simulé dans la résine.
2. Un algorithme de fragmentation qui permet le découpage des bords de motifs en segments. Les segments pourront ensuite être déplacés séparément les uns par rapport aux autres.
3. Un algorithme de convergence qui permet de déplacer les segments et de calculer l'écart entre le contour simulé et le contour ciblé. L'objectif étant de minimiser au maximum ces écarts.

La Figure 34 illustre la manière dont chacun de ces éléments est utilisé lors de la correction.

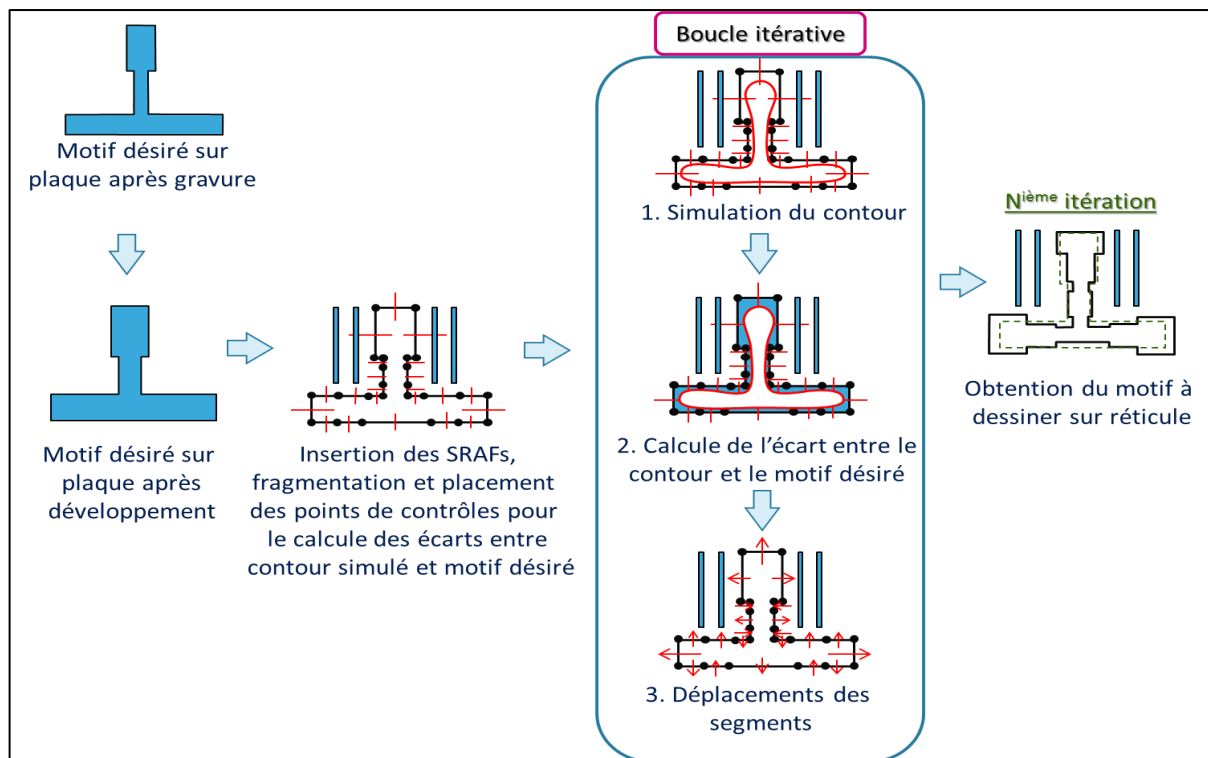


Figure 34 : Illustration du processus itératif de correction des effets de proximité optique basée sur l'utilisation de modèles mathématiques.

Ces modèles mathématiques de l'étape de lithographie, que nous nommerons indifféremment dans la suite de ces travaux "modèles OPC" peuvent prendre en compte plus ou moins de phénomènes. En effet un modèle OPC intègre une description du système d'exposition, décomposée en plusieurs parties. La description et l'intégration des paramètres liés à chacune de ces parties permettront d'augmenter la précision du modèle dans sa globalité, au détriment d'une vitesse de correction plus importante. Un compromis entre rapidité et précision est donc toujours nécessaire en production. Nous aborderons de manière plus détaillée dans la partie suivante la construction d'un modèle OPC, les composantes mathématiques et leur application dans un algorithme approprié.

## 5. Construction d'un modèle OPC

### a. Principes de bases

Le modèle OPC a pour objectif de simuler l'étape de lithographie, c'est-à-dire à obtenir un contour dans la résine photosensible à partir du motif présent sur réticule. Il est calibré à partir d'images obtenues avec un Microscope Electronique à Balayage (MEB) sur de nombreuses structures. Le choix de ces structures de calibration est fait de manière judicieuse et représente un panel complet des configurations caractéristiques du niveau considéré (exemples : Grille, Métal, Vias,...). On y retrouve des structures telles que des motifs denses et isolés en une dimension (exemple : lignes de réseaux), des motifs en deux dimensions (exemple : contacts), et dans les deux polarités (cf. partie B.II.3.). Le modèle doit intégrer la source, le réticule, le système de projection optique, la résine et le substrat sur lequel la résine est déposée. Le modèle sera composé de deux parties :



1. La première partie permet de modéliser l'intensité obtenue dans l'épaisseur de la résine à l'aide de la description complète du scanneur. On désigne cette première partie comme étant le modèle optique.
2. La seconde partie permet de modéliser les interactions physico-chimiques qui se produisent dans la résine lors des étapes d'expositions et de développement. On désigne cette partie comme étant le modèle résine.

La création du modèle optique permet de calibrer les paramètres optiques que sont la dose, la position du plan focal sur l'axe optique et la position de l'image aérienne dans la hauteur de la résine. Une fois ces paramètres fixés, la création du modèle résine permet de calibrer les paramètres de diffusion des acides et des bases générés pendant les phases d'exposition, de recuit et de développement de la résine. Il existe de nombreuses approches permettant de modéliser les effets résines. Toutefois nos travaux concernent les réticules et leurs prises en compte dans le modèle optique, on se limitera ici exclusivement à l'étude de ces modèles optiques. On retrouve dans d'autres travaux de thèses [21] [16] la description complète des modèles résines et les subtilités déployées à travers l'utilisation de chacun d'entre eux. On retiendra les modèles à seuil constant et les modèles à diffusion gaussienne [21], utilisés dans la partie C de ce manuscrit. Le chapitre suivant vise à décrire de manière plus détaillée la construction d'un modèle optique.

#### b. Le modèle optique

Le calcul de l'intensité de l'étape d'exposition lithographique utilise la théorie de l'optique de Fourier et la théorie de la diffraction scalaire.

La modélisation d'un système de microscopie a été introduite par Ernst Abbe en 1873 [22]. L'approche qui en résulte est de calculer l'image obtenue dans la résine via la diffraction du réticule pour chaque point source, puis de sommer l'ensemble des images obtenues pour reconstituer l'image dans la résine.

Le réticule est représenté par deux fonctions scalaires discrètes définies selon le point considéré sur le réticule telles que :

$$t(x, y) = \begin{cases} t_1 & \text{si } (x, y) \text{ est placé dans le matériau absorbeur} \\ 1 & \text{si } (x, y) \text{ est placé sur le quartz} \end{cases}$$

$$\varphi(x, y) = \begin{cases} \varphi_1 & \text{si } (x, y) \text{ est placé dans le matériau absorbeur} \\ 0 & \text{si } (x, y) \text{ est placé sur le quartz} \end{cases}$$

Où  $t(x, y)$  représente la fonction scalaire discrète de transmission,  $\varphi(x, y)$  la fonction scalaire discrète de phase et  $(x, y)$  les coordonnées cartésiennes d'un point sur le réticule. Le champ électrique s'écrit alors :

$$e_r(x, y) = \sqrt{t(x, y)} e^{j\varphi(x, y)} \quad \text{Equation 16}$$

Avec l'utilisation d'une illumination de type Köhler, le champ électrique diffracté  $E_r(f_x, f_y)$  est la Transformée de Fourier du champ électrique  $e_r(x, y)$ , où  $f_x$  et  $f_y$  sont les fréquences spatiales suivant les deux dimensions du plan du réticule tel que :



$$\begin{aligned}
E_r(f_x, f_y) &= TF \{e_r(x, y)\} \\
&= \iint_{x,y} e_r(x, y) e^{-j2\pi(xf_x + yf_y)} dx dy \quad \text{Equation 17}
\end{aligned}$$

La figure de diffraction est ensuite filtrée par le système de projection optique que l'on peut modéliser mathématiquement par  $P(f_x, f_y)$  défini comme suit :

$$P(f_x, f_y) = \begin{cases} 1 & \text{si } \sqrt{f_x^2 + f_y^2} < \frac{NA}{\lambda} \\ 0 & \text{si } \sqrt{f_x^2 + f_y^2} > \frac{NA}{\lambda} \end{cases}$$

Où NA désigne l'ouverture numérique et  $\lambda$  la longueur d'onde de la source.

L'expression de la transformée de Fourier du champ électrique après le système de projection optique  $E_p(f_x, f_y)$  s'écrit alors :

$$E_p(f_x, f_y) = E_r(f_x, f_y) \cdot P(f_x, f_y) \quad \text{Equation 18}$$

Pour obtenir le champ électrique sur la plaque il suffit alors d'appliquer la transformée de Fourier inverse à l'expression précédente. Il vient :

$$\begin{aligned}
e_{plaque}(x, y) &= TF^{-1}\{E_p(f_x, f_y)\} \\
e_{plaque}(x, y) &= TF^{-1}\{E_r(f_x, f_y) \cdot P(f_x, f_y)\} \quad \text{Equation 19}
\end{aligned}$$

On obtient l'intensité sur plaque pour un point source :

$$I(x, y) = |e_{plaque}(x, y)|^2 \quad \text{Equation 20}$$

On obtient l'expression de l'intensité totale pour chaque point issu de la source partiellement cohérente en intégrant sur la totalité de la source :

$$I_{tot}(x, y) = \iint_{f_x f_y} |e_{plaque}(x, y)|^2 df_x df_y \quad \text{Equation 21}$$

Le calcul de l'intensité à partir de la formulation d'Abbe impose de refaire tout le calcul dès lors qu'un élément est modifié (source, réticule ou système de projection). Les nombreuses itérations réalisées durant l'OPC agissent directement sur le réticule et la modification géométriques des motifs qui le composent. La source d'illumination et le système de projection optique ne changent pas durant l'OPC. L'approche d'Hopkins [23] permet de calculer l'intensité comme étant un produit d'une fonction permettant de décrire le réticule, par une fonction dépendant uniquement de la source d'illumination et du système optique de projection. En effet, on sait qu'un décalage d'un point source hors de l'axe optique va générer un décalage de la figure de diffraction au niveau de la pupille. Ce qui se traduit au niveau de l'expression du champ électrique sur plaque par :

$$e_{\text{plaque}}(x, y, f'_x, f'_y) = TF^{-1}\{E_r(f_x + f'_x, f_y + f'_y) \cdot P(f_x, f_y)\}$$

Le décalage de la figure de diffraction est transféré sur la pupille :

$$e_{\text{plaque}}(x, y, f'_x, f'_y) = TF^{-1}\{E_r(f_x, f_y) \cdot P(f_x + f'_x, f_y + f'_y)\} \quad \text{Equation 22}$$

Le champ électrique diffracté en sortie du réticule  $E_r(f_x, f_y)$  ne dépend donc plus du point source considéré. On appelle TCC (de l'anglais Trans Cross Coefficient) les tables contenant les variables dépendant uniquement de la source et du système de projection. Les logiciels de traitement OPC reposent aujourd'hui sur l'utilisation de ces tables pour améliorer le temps de calcul des corrections OPC.

### c. Les hypothèses et limites du modèle optique

La modélisation de la partie optique de notre outil de lithographie impose un certain nombre d'hypothèses simplificatrices lors de la description de notre problème. L'utilisation de la théorie de Fourier nécessite trois hypothèses :

1. Les champs électrique et magnétique ne sont pas couplés et il n'existe aucune interaction entre les deux. L'intensité résultante sur plaque peut être décrite à partir du champ électrique seul.
2. Les effets vectoriels qui proviennent du réticule peuvent être négligés car on ne tient pas compte de la polarisation de l'onde à travers le réticule.
3. Le réticule est suffisamment fin pour que sa topographie n'ait aucune influence sur le calcul de la figure de diffraction. Ce qui permet de décrire le réticule avec une simple fonction scalaire.

Cependant ces approximations ne sont valides que sous 2 conditions :

- Si les motifs du réticule, désignés le plus souvent par la valeur de la dimension critique (CD) est grande devant la longueur d'onde. [4] estime que cette condition est vérifiée si les motifs sont deux fois supérieurs à la longueur d'onde.
- Si l'épaisseur du réticule est faible devant la longueur d'onde. [4] estime que cette condition est vérifiée si l'épaisseur de l'absorbeur sur réticule est inférieure à la longueur d'onde divisée par deux.

La première condition est clairement dépassée pour les niveaux les plus avancés. Les motifs présents sur réticule aujourd'hui pour les niveaux Métaux en 28 nm ont des dimensions avoisinant les 180nm sur réticule, inférieures aux 386nm (deux fois 193) estimées par [4]. Pour les réticules avancés utilisés en 28nm, l'épaisseur est de 72nm, à comparer avec les 96,5nm (193/2). Notre deuxième condition est donc encore vérifiée dans la pratique. L'utilisation de réticule à décalage de phase invalide également l'hypothèse de non couplage des champs électrique et magnétique. Enfin l'utilisation de système à grande ouverture numérique (i.e. supérieure à 1) modifie l'état de polarisation de l'onde après qu'elle ait traversé le réticule, ce qui invalide également l'hypothèse selon laquelle les effets vectoriels provenant du réticule sont négligeables. Bien que le logiciel OPC utilisé aujourd'hui soit basé sur l'utilisation des TCC, il existe d'autres méthodes basées sur un calcul rigoureux du champ électromagnétique qui seront utilisées et développées dans la partie C de ce manuscrit.

## V. La problématique

Dans les parties III et IV nous avons défini les notions nécessaires à la compréhension de la problématique. Avant d'énoncer la problématique, nous attirons de nouveau l'attention du lecteur sur le cadre et le contexte dans lesquels les travaux de cette thèse se sont déroulés. De manière générale, des travaux de recherche sont entrepris dans un cadre industriel lorsque des résultats liés à la production sont faibles ou manquants, ou encore lorsque des éléments perturbants ont été identifiés. Il devient alors nécessaire de comprendre et prendre en compte les phénomènes associés. Enfin il y a également besoin d'un projet de recherche lorsque la technologie ou le procédé a atteint ses limites et qu'il est essentiel de changer le principe de base du fonctionnement d'une technologie ou d'un procédé pour répondre à un besoin, nous parlerons plus ici de recherche liée à l'innovation. Dans l'industrie liée à l'activité de fabrication de circuits intégrés, les coûts associés à cette recherche sont si colossaux que très peu d'industriels (par exemple INTEL, Samsung ou TSMC) sont capables de les assumer seuls. Des partenariats de recherche entre industriels incluant parfois des laboratoires sont créés et permettent de répartir les coûts et les efforts. Le travail réalisé dans le cadre de cette thèse s'inscrit dans plusieurs collaborations avec des industriels de la microélectronique. Les travaux de recherche développés ici viennent du besoin de comprendre et prendre en compte certains effets jusqu'alors peu influents et qui tendent à le devenir pour les technologies futures, tout en permettant de pallier à certains problèmes d'ores et déjà rencontrés sur des niveaux en cours de maturation. L'ensemble de ses travaux porte sur l'utilisation de réticule et le potentiel impact que cet élément peut avoir sur la qualité et le rendement final dans l'étape de production. Dans cette optique une double problématique a été identifiée :

- La première problématique liée à cette thèse est d'éliminer ou minimiser la variation de focus central pour les multiples pas de réseaux autorisés par la règle de dessin<sup>3</sup>. En effet avec des dimensions de plus en plus petites, il arrive parfois qu'il n'y ait pas ou peu de fenêtre de procédé commune à toutes les structures embarquées pour un même niveau.
- La seconde problématique permettra de savoir si une prise en compte plus rigoureuse des effets du processus complet de fabrication des réticules, dans les modèles OPC, est nécessaire. Aujourd'hui les modèles OPC sont construits avec l'hypothèse que les motifs présents sur le réticule sont ceux désirés. On compense ainsi les écarts dimensionnels imputables à la fabrication du réticule au niveau des modèles OPC eux-mêmes.

### 1. Perte de PW liée au réticule

Comme nous l'avons défini au chapitre A.III.1., la fenêtre de procédé est caractérisée par une latitude en énergie, une profondeur de champ et une tolérance relative aux dimensions visées. En fonction des caractéristiques dimensionnelles des motifs, c'est-à-dire à la fois des dimensions propres aux motifs et l'environnement dans lequel ils se trouvent, il y a une fenêtre de procédé centrée autour d'un point de fonctionnement en dose et en focus. Chaque motif étudié possède sa propre fenêtre de procédé, sa dose nominale et son focus central. La latitude en énergie va dépendre essentiellement des propriétés de la résine et de l'empilement présents sur plaque. Aujourd'hui avec l'utilisation des résines à amplification

---

<sup>3</sup> La règle de dessin est le cahier des charges contenant les contraintes de placement géométrique et de dimensionnement, suivis par les designers en charge de créer les motifs.

chimique il est très difficile d'améliorer la latitude en énergie en jouant sur ces paramètres. Bien que la dose et le focus soient liés, la profondeur de champs dépend essentiellement des paramètres du système optique. Pour répondre à cette première problématique on évaluera à la fois la profondeur de champs issue de la fenêtre de procédé globale et la variation des valeurs de focus central. Dans une première partie nous commencerons par identifier les sources de variations de focus central liées aux réticules, en ayant une idée du budget focus acceptable pour une production viable. En seconde partie un approfondissement théorique nous permettra de comprendre en détail l'influence du réticule sur la variation de focus central pour les multiples pas de réseau embarqués pour un même niveau. En troisième partie nous aurons recours à l'utilisation d'un simulateur qui permettra de travailler avec des structures plus complexes ayant été corrigées par un modèle OPC. On proposera à l'issue de la troisième partie un réticule permettant de répondre à notre problématique. Enfin la quatrième partie nous montrera le gain réel obtenu sur plaquette avec l'utilisation de ce réticule proposé.

## 2. Prise en compte rigoureuse des effets liés au réticule

Avant d'aborder les enjeux de cette seconde problématique, il est important de comprendre et d'avoir toujours en tête une vue globale du flux de correction qui permet l'utilisation de modèle OPC, représentée Figure 35.

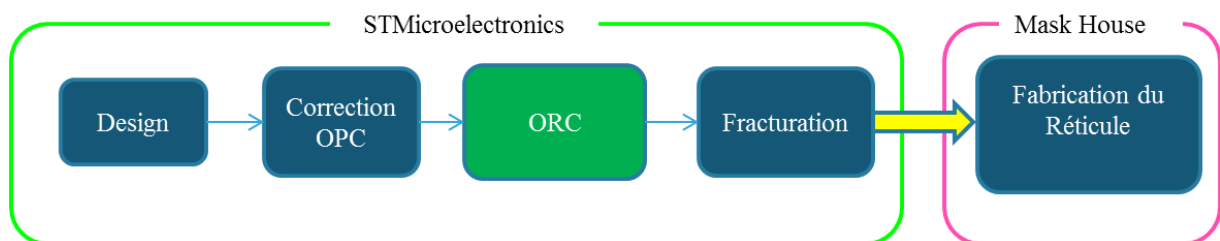


Figure 35 : Vue globale du flux de correction utilisé à STMicroelectronics

Pour rappel le modèle OPC permet de simuler l'étape d'exposition du réticule et le développement sur plaquette. Dans le flux de correction, la première étape consiste à avoir l'ensemble des motifs d'un des niveaux du circuit, que l'on appellera indifféremment dans la suite de ces travaux le design. Les corrections OPC basées sur l'utilisation du modèle OPC consiste à modifier géométriquement les motifs du réticule pour que le contour résine soit le plus proche possible du design. Il y a à cette étape une boucle itérative qui permet de modifier progressivement le design. Le nombre d'itérations peut être établi de manière empirique ou jusqu'à atteindre un critère de succès défini comme étant une distance maximale entre le contour et le design. Ensuite vient l'étape de vérification des corrections qui permet de s'assurer que le modèle OPC a réalisé les corrections adéquates à un transfert correct des motifs sur plaquette, et ce pour une ou plusieurs conditions d'expositions (dose et focus). Cette étape s'appelle l'ORC (de l'anglais Optical proximity correction Rule Check). Le design corrigé est ensuite fracturé en éléments simples puis transmis au fabricant de réticule, que l'on désigne souvent par son nom anglais "Mask House". La partie ORC est importante dans la mesure où la correction faite avec un modèle OPC est basée sur une boucle itérative dont le nombre d'itérations peut être insuffisant, ou dont les corrections ne permettent pas l'obtention d'un contour résine viable sur plaquette. L'hypothèse sous-jacente faite lors des étapes de simulation et de correction est que les motifs envoyés aux fabricants de réticule et ceux réellement présents sur le réticule sont identiques. Ce qui signifie que les fabricants de

réticule ont la capacité d'écrire les motifs sur masques avec une très grande précision. Hors les techniques et les équipements qu'ils utilisent ne permettent pas d'obtenir de tels résultats. Jusqu'alors les écarts inhérents à la fabrication des réticules étaient compensés par le modèle résine. L'objectif lié à notre seconde problématique est d'évaluer si la prise en compte plus rigoureuse des effets liés à la conception des réticules, permettrait d'obtenir une meilleure fidélité entre le design et les contours obtenus sur plaquette. Notre travail consistera donc à créer un modèle de réticule permettant de simuler le contour masque à partir du design. Nous aborderons dans une première partie la construction et la calibration d'un modèle OPC. En deuxième partie nous exposerons le procédé de fabrication des masques avancés ainsi que les corrections de motifs que les fabricants appliquent d'ores et déjà. En troisième partie nous présenterons le flux de correction et vérification complet, c'est-à-dire du réticule à la plaquette. En quatrième et dernière partie nous évaluerons l'apport de notre nouveau flux de corrections en le testant sur un produit existant.

## VI. Conclusion

A travers cette première partie nous avons situé le contexte de notre étude, défini les notions relatives à la microélectronique, à la fabrication de transistor et de circuits CMOS. Nous avons introduit le procédé de photolithographie optique, étape à la fois au cœur de la miniaturisation des composants mais aussi concernée par ce travail de thèse. Les bases de la lithographie ont été passées en revue ainsi que les principaux paramètres permettant de caractériser les performances associées à la lithographie. Nous avons également introduit un ensemble de généralités qui seront utilisées dans les parties B et C de ce manuscrit. Enfin nous avons introduit notre double problématique qui s'inscrit dans l'étape d'améliorations de la résolution. La partie B de ce manuscrit permettra d'aborder la variation de focus central pour les multiples pas de réseaux embarqués sur un même réticule, qui conduit aujourd'hui à une perte au niveau la fenêtre de procédé globale. Afin de répondre à cette première problématique il sera nécessaire de maîtriser, la théorie de formation de l'image en fonction de tous les paramètres du système optique ainsi que les outils de simulation rigoureuse associés. A partir de l'étude d'un niveau critique que l'on choisira par la suite, une solution devra être proposée et vérifiée sur plaquette. Cette vérification impose également une maîtrise des outils de mesure et de traitement des données en salle blanche. La partie C de ce manuscrit nous permettra d'évaluer si la prise en compte plus rigoureuse des effets liés au procédé de fabrication des réticules permettra d'améliorer la fidélité du transfert de motifs du réticule à la plaquette. Ici nous devons avoir une totale connaissance du procédé de fabrication des réticules, une maîtrise du flux de correction basé sur les modèles OPC, ainsi que les notions relatives à l'utilisation des logiciels permettant à la fois de calibrer des modèles précis et de les utiliser sur un produit.

## **Partie B**

**Réduction des effets de focalisation en  
fonction du pas de réseau visé via  
l'optimisation des paramètres du  
masque**

# Introduction

Cette seconde partie est dédiée à la compréhension et la prise en compte des effets de focalisation en fonction du pas de réseau visé via l'optimisation des paramètres du réticule. Nous commencerons par mettre en évidence les phénomènes liés à notre problématique. Nous présenterons les résultats obtenus via un simulateur qui permet de résoudre de manière rigoureuse les équations de Maxwell avant de vérifier sur plaquette l'apport du réticule proposé par rapport au réticule actuellement utilisé. L'étude de structures 2D nous conduira à adopter une nouvelle méthodologie d'exploitation des résultats sur plaquette afin de conclure sur l'apport réel visible sur plaquette.

Ce travail de recherche se fera en étroite collaboration avec les fabricants de réticule et de scanners, l'objectif étant de proposer un meilleur réticule que ceux utilisés.



### 1. Etat des lieux : Perte sur la fenêtre de procédé & best focus shift

A mon arrivée et aux commencements des travaux liés à cette thèse, le niveau Métal-1 du nœud technologique 28nm est résolu avec une fenêtre de procédé réduite de l'ordre de 80nm, et des écarts de focalisation important entre les structures embarquées sur ce même niveau. Ce niveau présente à la fois des contraintes liées à la densité des motifs et des configurations au niveau du design pouvant conduire à des amincissements de lignes et des rapprochements entre les motifs. Les amincissements de lignes peuvent provoquer dans le circuit électrique des échauffements et la perte de signal électrique, alors que les rapprochements de motifs conduisent à des courts-circuits. Ce niveau utilise un réticule de type OMOG, et l'étape d'exposition se fait sur un scanner à immersion utilisant une source ArF à 193nm et une ouverture numérique à 1,35. En agissant EXCLUSIVEMENT sur les paramètres du réticule, l'objectif est donc double :

1. Améliorer la fenêtre de procédé globale sur plaquette.
2. Réduire les écarts de focalisation sur plaquette entre les différentes structures embarqués sur ce même niveau. On appellera ces écarts le Best Focus Shift.

L'amélioration de la fenêtre de procédé (désigné en anglais par PW pour Process Window) se fait par l'augmentation de la "Latitude d'Exposition" (désigné en anglais par EL pour Exposure Latitude) et/ou de la "profondeur de champ" (désigné en anglais par DOF pour Depth of Focus). L'augmentation de l'EL dépend essentiellement des paramètres résine à DOF figé (chapitre B.III.2). On ne peut donc pas travailler sur l'amélioration de l'EL via l'optimisation des paramètres du réticule. Le levier qu'il nous reste pour répondre à ce premier objectif est donc d'améliorer la DOF.

Concernant la réduction des écarts de focalisation en fonction du pas de réseau visé, cela implique une compréhension des phénomènes liés au réticule et qui contribue à déformer le front d'onde comme décrit Figure 36.

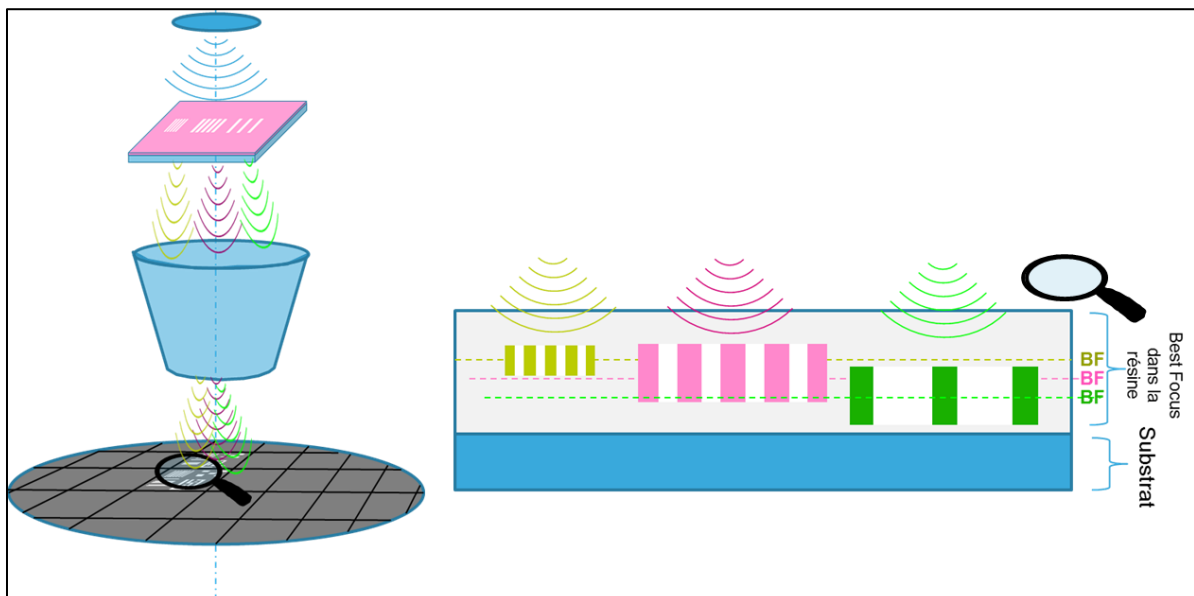


Figure 36 : Différence de Best Focus illustrée dans la hauteur de résine pour trois réseaux 1D différents.

Il existe 2 familles de réticules : les réticules à décalage de phase plus connus sous l'acronyme PSM (de l'anglais Phase Shift Mask) et les réticules binaires avancés, connus sous leur

acronyme anglais UBM (de l'anglais Ultimate Binary Mask). La différence entre ces deux réticules réside dans le substrat qui est utilisé avant la gravure des motifs qui les composent. On appellera ce substrat "blank" dans la suite nos travaux.

Le cycle de fabrication et d'utilisation d'un réticule peut se résumer en trois étapes principales décrites Figure 37.

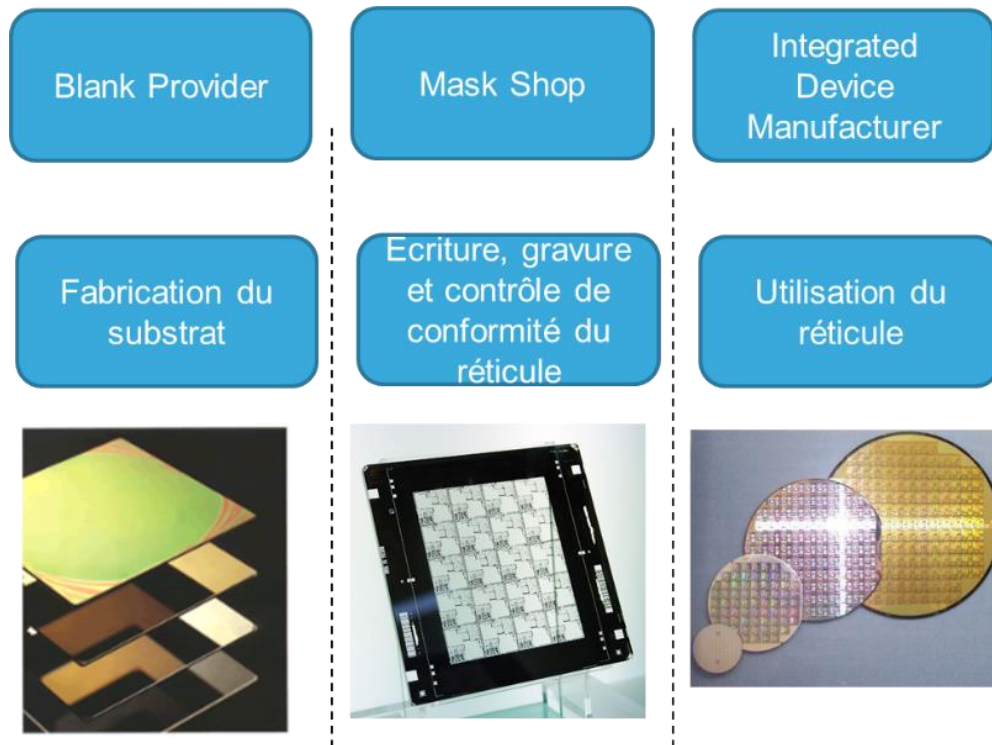


Figure 37 : Cycle de fabrication et d'utilisation des réticules

Ce cycle complexe sera décomposé en détail dans la partie C. La première étape consiste à fabriquer l'empilement multicouche du réticule, qui se déroule chez ce que nous nommerons le blank provider. Le blank provider est la société qui a la charge de déposer sur un substrat de taille définie le(s) couche(s) de matériau absorbeur du réticule de manière uniforme sur la totalité de sa surface. La deuxième étape consiste à transférer les motifs composant le dessin physique du circuit sur le réticule. Cette seconde étape se déroule à la "Mask Shop". Enfin la troisième étape consiste à utiliser le réticule pour la fabrication des puces. Cette troisième étape se déroule chez les "Integrated Device Manufacturer"(IDM), qui n'est autre que STMicroelectronics en ce qui concerne tout le travail réalisé dans ce manuscrit. C'est également au niveau IDM que sont conçus les designs des différents niveaux qui composent une puce électronique.

Globalement trois acteurs sont identifiés dans le cycle de fabrication et d'utilisation des réticules. A travers nos travaux de recherche, nous nous sommes aperçus que le blank provider n'a pas vraiment conscience de l'impact que le blank aura sur la qualité finale de la puce au niveau IDM, et encore moins du potentiel impact que celui-ci peut avoir sur l'obtention d'une fenêtre de procédé viable d'un point de vue IDM. L'étape de transfert des motifs sur le réticule a pour contrainte principale le respect des dimensions du design et

l'obtention d'un profil le plus droit possible. Notre but se précise alors un peu plus et il apparaît que la proposition d'un nouveau réticule via l'optimisation de son blank semble être la solution la plus adaptée pour répondre à notre double problématique. On cherchera donc à travers cette partie à optimiser le blank.

Pour le niveau Métal 28, le réticule qui a été adopté est un OMOG (Opaque MoSi On Glass) de la famille des UBM. Le choix de ce réticule OMOG avait été motivé par le fait que les modèles OPC utilisaient alors l'approximation TMA (de l'anglais Thin Mask Approximation, cf. chapitre A.IV.5) et que l'empilement de la couche absorbante sur le réticule permettait de conserver cette approximation. Le fait que ce réticule provoquerait des déformations du front d'onde telles qu'elles se traduiraient par du Best Focus Shift sur plaquette n'était pas avéré. Ceci est donc notre première piste d'investigation, le basculement d'un réticule de type OMOG à PSM. Voici les nouvelles questions qui se posent alors :

1. Comment sont fabriqués les réticules ? Quels sont les contraintes qui limitent notre champ d'action ? Comment palier à ces contraintes ?
2. Comment sont prises en compte les contraintes de Process Window et Best Focus lors de la fabrication des réticules ?
3. Avant de faire fabriquer un réticule optimisé (c'est-à-dire dédié pour ST), il faut être capable de simuler et mettre en évidence les phénomènes observés sur plaquette. Quels sont les paramètres du réticule à connaître et à implémenter dans notre simulateur pour mettre en évidence cette PW réduite et le Best Focus shift ? Quels sont parmi ces paramètres les plus détractants par rapport à notre double problématique ? Et enfin, quelle est l'adéquation entre les résultats de simulations et ceux obtenus sur plaquettes ?

La suite de nos travaux liés à cette partie s'articulera en plusieurs axes d'exploration :

- Le premier axe consistera à appréhender le cycle de fabrication des réticules et à comprendre comment les matériaux qui le composent ont été choisis.
- Le second axe consistera à acquérir la maîtrise suffisante de notre outil de simulation (HyperLith™) afin d'être en mesure de mettre en évidence le phénomène de Best Focus Shift et de proposer un nouveau réticule en accord avec notre objectif. Le travail lié à ce second axe d'exploration sera réalisé en collaboration avec notre Mask Shop avancée, à savoir la société DNP. Ceci nous permettra de sélectionner les paramètres des réticules à implémenter dans le simulateur.
- Le troisième axe d'exploration consistera à travailler avec la société ASML (Leader dans la fabrication des systèmes de projection) sur le réticule qu'ils ont commencé à développer avec HOYA (à la fois Blank Provider et Mask Shop). Ce travail entrera dans un programme de recherche commun, ECLIPSE, qui avait déjà permis d'identifier ce problème lié au Best Focus Shift. Une amélioration de l'outil de projection avait alors été développée et testée. Nous présenterons succinctement ce nouveau module dans le chapitre C.II.2. qui suit.

Ces trois axes d'explorations ont été menés en parallèle et les informations obtenues au fur et à mesure dans chacun de ces axes, ont également été utiles à l'étude des autres. Ils ne seront donc pas traités indépendamment les uns des autres dans la suite de cette partie. Dans un premier temps nous commencerons par resituer notre double problématique et nous présenterons le module Flexwave ainsi que les méthodes d'analyse rigoureuses dont nous

aurons besoin pour notre travail. Ensuite nous aborderons dans le second chapitre l'étude qui nous a conduits, en partenariat avec ASML, à obtenir et évaluer le PSM optimisé.

## II. Mise en évidence des phénomènes liés à notre problématique

La fenêtre de procédé est utilisée par les lithographes pour caractériser le procédé permettant le transfert de motifs du réticule à la plaquette. Le réglage de la dose nominale se fait pour une structure de référence. Le réglage pour le focus nominal se fait sur une structure de référence aussi, mais différente de celle utilisée pour la dose nominale. Les modèles OPC sont également centrés sur une structure de référence et des conditions de procédé de référence (dose et focus). Le contrôle de la profondeur de champ et de la minimisation des écarts de focalisation entre les structures est donc d'un point de vue "réticule" le meilleur moyen d'améliorer la fenêtre de procédé. Concernant les écarts de focalisation observés entre plusieurs structures embarquées sur un même niveau, on sait qu'ils trouvent leurs sources sur la totalité du chemin optique, de la source à la plaquette. On peut décliner ces sources en deux catégories :

Dans la première catégorie on placera les erreurs induites par des fluctuations du positionnement du plan focal, dont voici quelques exemples :

- Les erreurs de positionnement de la plaquette dans le scanner,
- Les défauts de planéité du substrat, que l'on observe après certaines étapes de fabrication,
- Les inhomogénéités dans l'épaisseur de la résine.

On ne traitera pas dans cette thèse les éléments qui entrent dans cette première catégorie car elle relève plus de manque de capacité et de précision de l'outil de projection.

Dans la seconde catégorie on regroupe les éléments qui peuvent conduire à une modification du front d'onde, dont voici également quelques exemples :

- La forme géométrique de la source,
- La topographie du réticule,
- Le pas de réseau,
- L'empilement des couches de matériaux composant le réticule,
- Les aberrations des lentilles dans le système optique de projection,
- L'empilement des couches du substrat, qui selon leurs indices optiques provoqueront une réflexion parasite dans la résine plus ou moins importante.

De même nous ne travaillerons que sur les éléments qui sont liés au réticule, à savoir les quatre premiers éléments de cette seconde catégorie. Concernant les aberrations des lentilles, un module appelé Flexwave et développé par ASML sera brièvement présenté par la suite. Quant à l'empilement des couches du substrat, des travaux de thèse [20] ont permis de mieux comprendre les phénomènes en jeu. Nous renvoyons donc le lecteur à cet ouvrage pour plus de détails.

Au chapitre A.III.1 nous avons vu que pour chaque structure la dose et le focus sont liés. Dans nos travaux de thèse, on définira le meilleur plan focal comme étant la position sur l'axe optique où le focus est tel que pour un motif donné, la sensibilité à la dose est la plus faible. On désignera indifféremment dans la suite de nos travaux ce meilleur focus par son appellation anglaise Best focus. Cependant il existe plusieurs définitions derrière la notion de Best Focus.

## 1. Définition de la notion de Best Focus

### a. Le Best Focus pour le lithographe

Pour le lithographe, le Best Focus correspond au centre de la profondeur de champ de la structure analysée. Il le détermine à partir d'une Matrice Dose/Focus et après analyse des images MEB obtenues. La Figure 38 illustre un exemple du point de vue du lithographe pour la détermination d'un best focus.

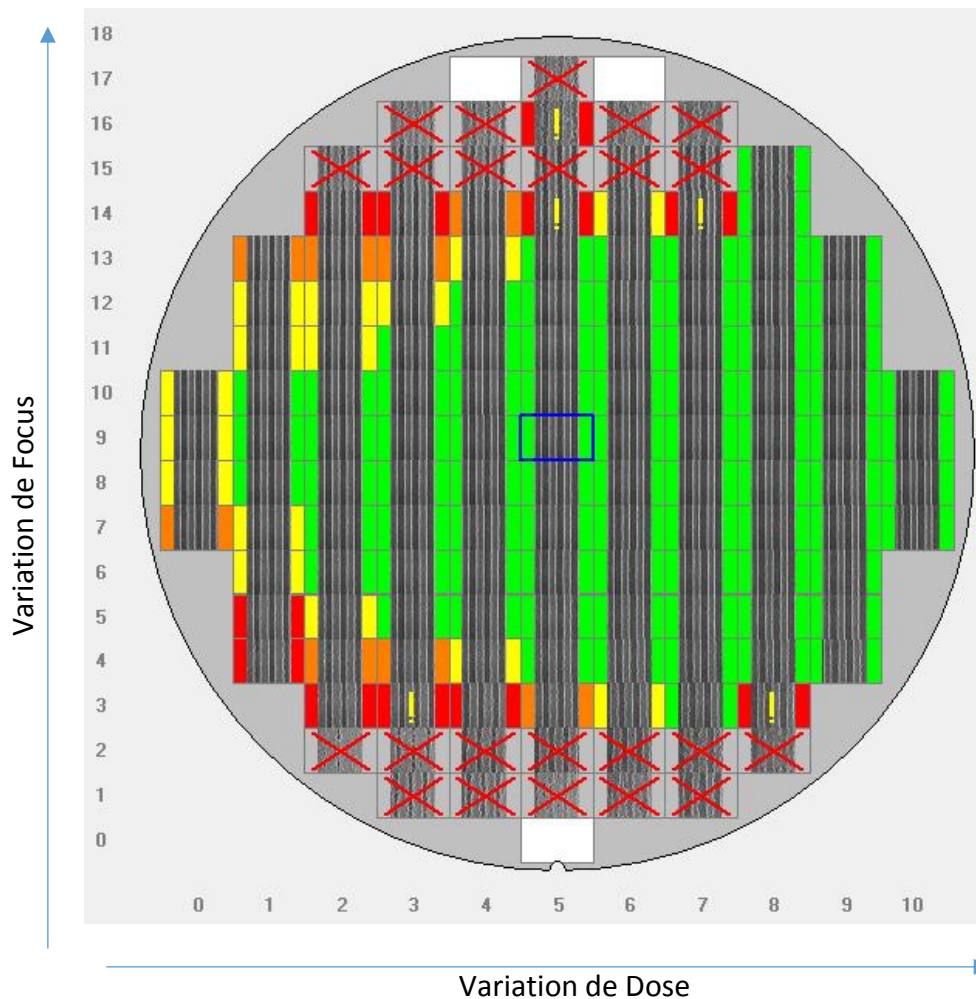


Figure 38 : Matrice Dose/Focus utilisée pour la détermination du Best Focus

Le best focus vu par le lithographe correspond donc au focus pour lequel la variabilité dimensionnelle de la structure étudiée est identique de chaque côté de ce focus (variation positive et négative en focus).

### b. Le Best Focus pour l'OPC

Pour les modèles OPC et l'équipe qui en a la charge ici à STMicroelectronics Crolles, l'approche est quelque peu différente en ce qui concerne le best focus. Il est défini comme étant le plan focal pour lequel la structure étudiée est le moins sensible à une variation de dose. Lorsque l'on trace les courbes de Bossung, pour une structure simple "Ligne & Espace", L&S (de l'anglais Line & Space), ce Best Focus correspond au point d'inflexion mathématique de

chaque courbe  $CD_{dose}=f(\text{Focus})$ . L'exemple donné Figure 39 représente les courbes de Bossung tracées pour une structure L&S de pas de réseau 1:1 de 90nm.

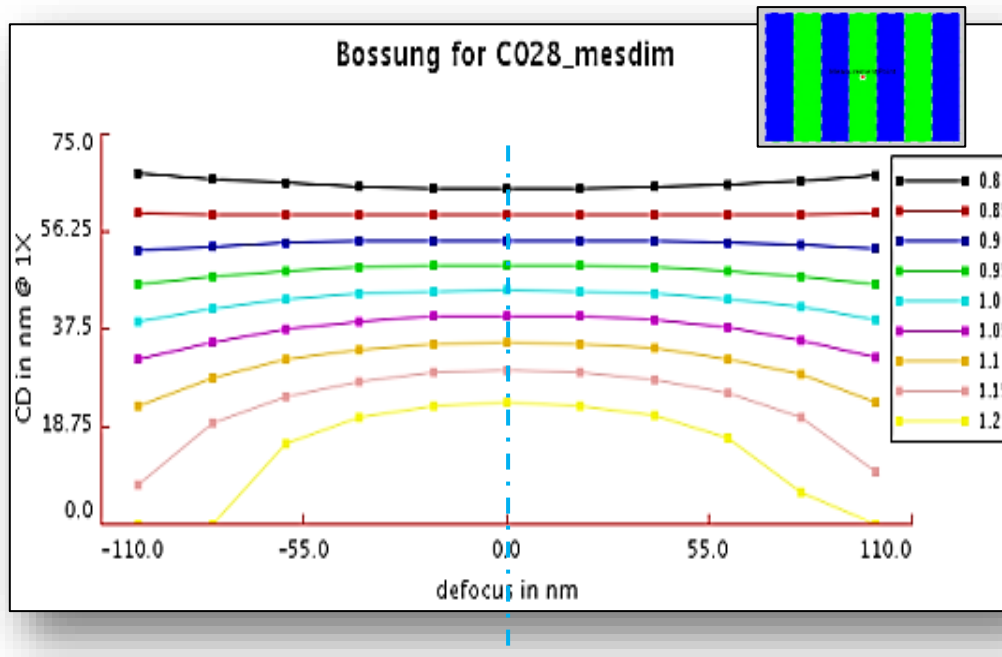


Figure 39 : Détermination du Best Focus à partir des courbes de Bossung

L'approche d'un point de vue OPC correspond donc plus à la définition que l'on utiliserait d'un point de vue optique, c'est-à-dire comme étant le plan focal où les rayons issus du système d'illumination convergent en un point sur l'axe optique.

Pour certaines structures, notamment celles présentant une variation selon une direction (1D type L&S), les best focus du point de vue OPC et Lithographie sont les mêmes. On verra par la suite que pour des structures dont les dimensions varient selon les deux directions du plan (structure 2D type contact), ce n'est plus le cas.

### c. Le Best Focus Shift : un phénomène de plus en plus prépondérant

Ainsi, pour plusieurs structures embarquées sur un même réticule, chaque structure aura sa fenêtre de procédé et son best focus, à différencier de la fenêtre de procédé globale qui correspond, elle, à la zone d'union de toutes les fenêtres de procédé de chaque structure. Lorsque l'ensemble des best focus ne se retrouve pas dans la fenêtre de procédé globale, cela signifie qu'il n'est pas possible d'avoir toutes les structures résolues à leurs valeurs nominales simultanément sur plaque.

Il est clair que les corrections apportées dans le cadre de l'OPC doivent permettre justement de palier à ces inconvénients. Par ailleurs en supposant que l'OPC puisse effectuer exactement les modifications dimensionnelles au niveau du réticule, il existe d'autres contraintes ne permettant pas d'être adressées par l'OPC. En effet les contraintes liées à l'écriture des réticules en Mask Shop imposent des distances minimales entre deux motifs en dessous de laquelle on ne peut pas écrire sur réticule (exemple : distances entre deux contacts, une ligne et une SRAF,...). Nous aborderons par ailleurs ces contraintes d'écriture sur réticule dans la partie C.



Etant donné que l'évolution des technologies implique une augmentation de la densité d'intégration, certains niveaux deviennent si denses que l'OPC n'a pas le degré de liberté suffisant pour permettre toutes les modifications géométriques nécessaires. Il est donc inévitable de se retrouver dans une situation où les best focus de chaque structure présente sur un réticule ne se retrouvent pas dans la fenêtre de procédé globale. L'utilisation de scanners à immersion en 193nm pour les technologies de plus en plus avancées conduit à des profondeurs de champs de plus en plus réduite. Ainsi le fait que tous les best focus ne se retrouvent pas dans la fenêtre de procédé globale risque de poser un réel problème dans les technologies futures.

De même, l'arrivée de nouveaux équipements tels que ceux basés sur l'utilisation de source extrême UV anticipent déjà les éventuels problèmes liés aux Best Focus Shift [24]. D'autres auteurs [25, 26] travaillent également sur ce sujet.

A STMicroelectronics Crolles, deux thèses dont la mienne, ont été dédiées à la compréhension de ce phénomène à deux niveaux différents. La première dans le cadre de l'étude d'un module complémentaire au scanner à immersion de la société ASML appelé FlexWave. Et enfin la seconde concernant les effets liés aux réticules, au cœur de cette partie C.

Dans le prochain chapitre nous exposerons les moyens mis en œuvre dans la première thèse pour adresser la problématique liée au best focus shift.

## 2. La prise en compte de la déformation du front d'onde : Le module FlexWave

Comme cité dans le chapitre précédent, le best focus shift provient des éléments qui se trouvent sur la totalité du chemin optique, du réticule à l'empilement de couches minces sous la résine. La première piste exploitée concerne l'extension du système optique sur les scanners 193nm à immersion d'ouverture numérique de 1,35. Ce nouveau module à haute résolution permet de manipuler directement le front d'onde. Il est installé directement dans la colonne du système de projection comme montré Figure 40.

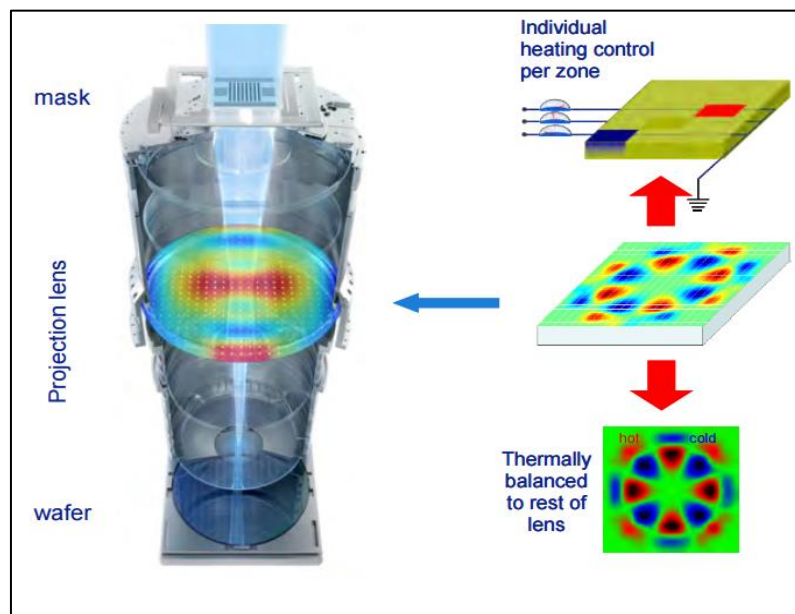


Figure 40 : Schéma de présentation du module FlexWave permettant de compenser les déformations du front d'onde

L'objectif premier de ce module était de permettre une amélioration des corrections des aberrations des lentilles du système de projection optique. On définit  $\varphi$  comme étant une fonction de déphasage associé à tout point du front d'ondes et qui représente l'écart de phase entre l'onde théorique et l'onde réelle traversant le système optique. On peut alors exprimer la déformation du front d'onde comme une combinaison linéaire de polynômes de Zernike. Les polynômes de Zernike se décomposent en fonctions paires et impaires telles que :

$Z_n^m(\rho, \varphi) = R_n^m(\rho) \cos(m. \varphi)$  pour les fonctions paires et

$Z_n^m(\rho, \varphi) = R_n^m(\rho) \sin(m. \varphi)$  pour les fonctions impaires.

Avec

$m, n$  : nombres entiers naturels non nuls, et  $n \geq m$ .

$\varphi$ : Angle d'azimut en radians,

$\rho$  : Distance radiale normalisée,

$$R_n^m(\rho) = \sum_{k=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^k (n-k)!}{\left(\frac{n+m}{2}-k\right)! \left(\frac{n-m}{2}-k\right)! k!} \rho^{n-2k} \text{ pour } n-m \text{ pair}$$

$$R_n^m(\rho) = 0 \text{ pour } n-m \text{ impair}$$

Les aberrations des lentilles sont également induites par la montée en température des lentilles lors de l'utilisation prolongée des scanners. Cette montée en température provoque un changement au niveau de l'indice optique des lentilles résultant en une modification du chemin optique parcouru par la lumière, se traduisant ainsi en une modification du front d'onde. Le module FlexWave repose sur le même principe de fonctionnement, à savoir l'utilisation d'une lentille traversée par l'onde lumineuse dont la température peut être modifiée localement. On introduit ainsi une modification volontaire du chemin optique pour réduire l'impact de la modification du front d'onde induite par les lentilles. La Figure 41 montre les différentes combinaisons élémentaires du module FlexWave permettant de corriger le front d'onde, à travers la prise en compte des 64 premiers polynômes de Zernike.

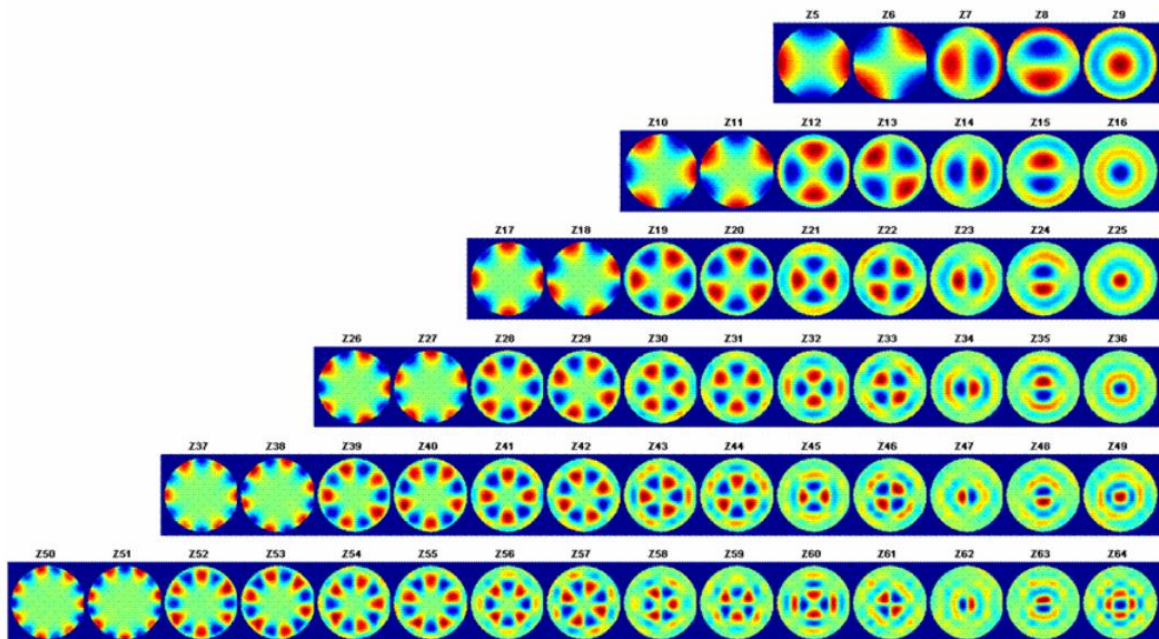


Figure 41 : Tracé des 64 premiers polynômes de Zernike sur le disque



Ce panel de déclinaison du front d'onde en polynômes de Zernike permet de traduire les différentes aberrations observables sur scanners. Etant donné que ce module offre la possibilité de modifier le front d'onde, une approche permettant de compenser les effets induits par le réticule a été étudiée. L'épaisseur et les indices optiques des différentes couches d'absorbeur du réticule provoquent à la fois des déplacements de motifs et des écarts de best focus. A terme cela se traduit par des mauvais alignements entre les niveaux déposés sur le substrat et des amincissements au niveau de la fenêtre de procédé. [27] montre que l'utilisation de ce module peut permettre une amélioration de 9% au niveau de la fenêtre de procédé. La faiblesse de ce dispositif réside dans le fait que la fenêtre dimensionnelle de correction effective du module Flexwave doit être identique à celle du réticule. Hors il est possible de se retrouver sur réticule à avoir deux cellules voisines dont les Best Focus respectifs seront trop différents pour que la déformation induite par Flexwave soit en mesure de corriger le front d'onde. Mais dès lors qu'il s'agit de corriger un effet du réticule, ne serait-il pas plus judicieux de corriger ses effets directement sur ce réticule ? Dans la suite de cette partie B c'est précisément ce dont il est question.

### 3. La prise en compte de l'épaisseur de l'absorbeur du réticule sur le trajet optique

Au chapitre A.IV.5 nous avons vu que le moyen le plus utilisé pour prendre en compte les réticules durant les étapes de simulation est de les considérer comme infiniment fins (approximation TMA). Cette approximation plus connue sous l'appellation anglaise "Thin Mask" (Masque Fin) ou M2D (Mask 2D) consiste à négliger volontairement les effets du réticule sur l'onde le traversant. Seul l'aspect diffractant du réticule est alors pris en compte. Afin de comprendre l'effet du réticule sur les performances liées au best focus shift, nous commencerons d'abord par prendre en compte l'épaisseur du réticule sur le trajet optique du réticule. Cette prise en compte est également connue sous son appellation anglophone M3D pour "Mask 3D Effect".

La Figure 42 permet de saisir le lien qui existe entre M2D, M3D et Focus. Pour cette approche, le focus est défini comme étant le plan focal où l'image d'un objet à travers le système optique est la plus nette possible.

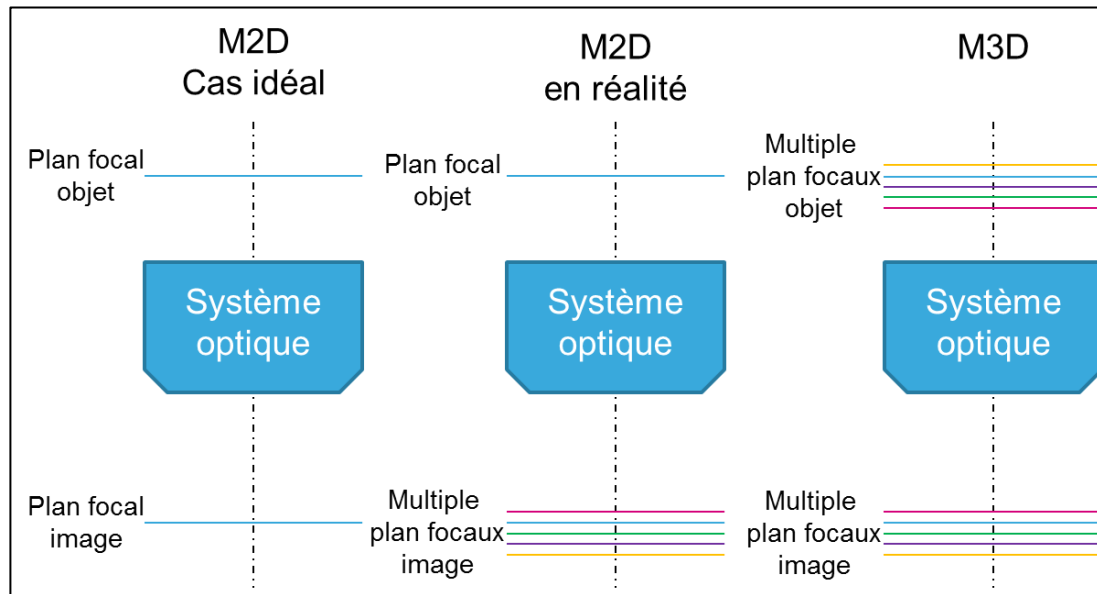


Figure 42 : Illustration permettant de saisir le lien entre Best Focus, M2D et M3D

L'approche M2D consiste à considérer que d'un point de vue optique il y a un unique plan objet et un unique plan image. Le réticule est placé au niveau du plan objet et la plaquette au niveau du plan image. Or il apparaît au niveau de la plaquette qu'il n'y a pas un seul plan image mais plusieurs, ce qui se traduit par de multiples plans focaux au niveau de la plaquette et qui conduit à avoir de multiple(s) plans focaux optimum. L'approche M3D consiste à considérer que notre système optique ne possède pas un seul mais plusieurs plans objets, qui se traduiront par plusieurs plans images. Concrètement cela se traduit par connaître la déformation du front d'onde induite par le réticule pour chacune des structures qui le composent. Dès lors il sera plus aisé de comprendre l'interaction entre les plans images et les plans objets pour minimiser ces écarts entre les différents plans image(s). C'est là précisément ce que l'on appelle Best Focus Shift Mitigation.

La formulation optique basée sur l'approche d'Hopkins (présentée au chapitre B.II.3.b) ne sera utilisée dans cette partie que pour appréhender la théorie permettant d'obtenir l'intensité résultante en sortie du système optique pour des structures 1D. Nous nous baserons ensuite sur une approche rigoureuse de la résolution des équations de Maxwell représentant la propagation du champ électromagnétique de la source à la sortie du système optique. Cette méthodologie est exposée au chapitre C.II.3.d. suivant. La figure de diffraction en sortie du réticule sera ensuite analysée afin de faire le lien entre celle-ci, la fenêtre de procédé, le best focus shift et les indices optiques de l'absorbeur qui composent le réticule. L'étude se fera sur le logiciel HyperLith™ de la société PanoramicTech qui permet justement d'utiliser cette approche plus rigoureuse. Ce travail de recherche se fera en étroite collaboration avec les fabricants de réticule et de scanners, l'objectif étant de proposer un réticule adapté à notre problématique. Une vérification sur plaquette sera in fine réalisée pour voir l'apport réel du nouveau réticule proposé. Le chapitre 3.a qui suit a pour objectif de présenter les structures qui serviront à notre évaluation.

### a. Choix des structures 1D et 2D

Lors de l'évaluation du module Flexwave, une cellule de test comprenant plusieurs structures avait été embarquée sur un réticule de type OMOG. Cette cellule comporte un ensemble de structure 1D et 2D sensibles (en termes de résolution lithographique). Cette cellule est présentée Figure 43.

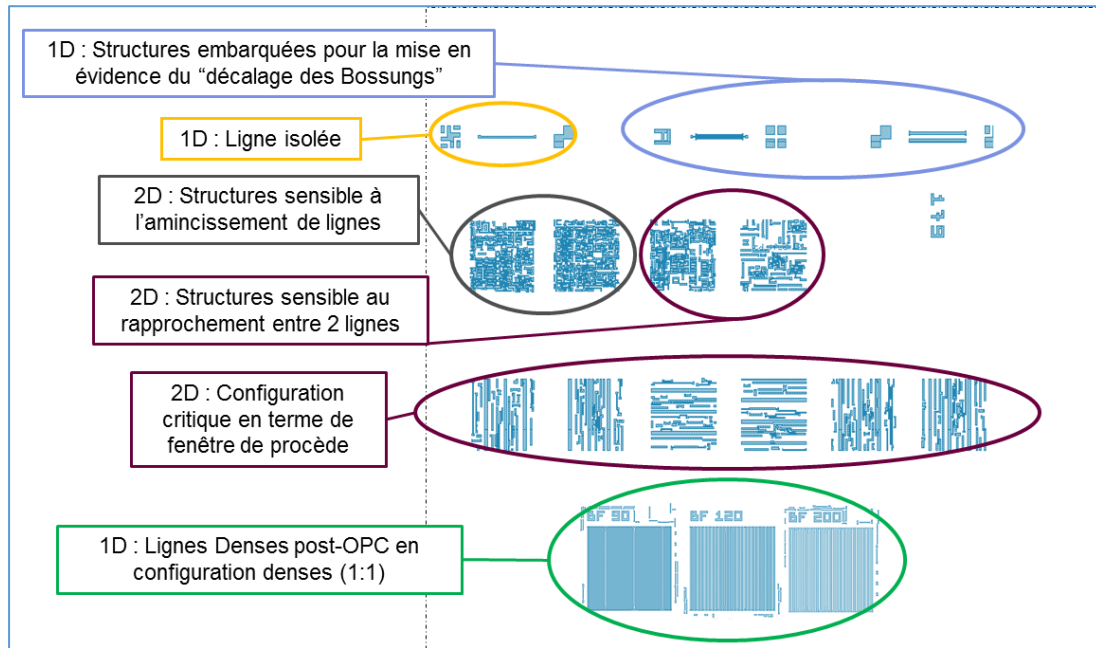


Figure 43 : Cellule contenant les motifs de test embarqués sur le réticule de type OMOG

Les structures 1D qui seront utilisées pour notre évaluation sont les trois configurations denses de type L&S (de l'anglais Line & Space) ayant un pas de réseau ("pitch" en anglais) respectif de 90nm, 120nm et 200nm. Concernant les structures 2D, l'évaluation sera faite pour une structure de type "amincissement de ligne" (ou neck en anglais), une de type "rapprochement de ligne" (ou bridge en anglais) et enfin une de type "limitée en fenêtre de procédé" (que l'on retrouve sous le nom Golden Hotspot). L'ensemble de ces six structures sont des structures post-OPC corrigées pour le réticule de type OMOG, visible Figure 44.

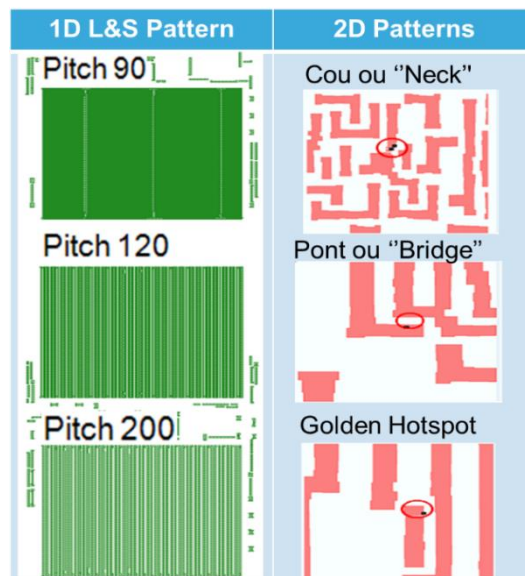


Figure 44 : Structures 1D et 2D choisies pour l'étude comparative entre EaPSM et OMOG

## b. Approche d'Hopkins : la formation de l'image aérienne

La première étape de notre travail va donc consister à comparer d'un point de vue simulation l'effet d'un changement de réticule en comparant le contraste, le NILS et le MEEF pour des structures 1D et 2D.

### i. Obtention de l'intensité de l'image aérienne

Nous commencerons notre approche théorique par l'étude de structures 1D de type L&S pour des pas de réseau de 90nm, 120nm et 200nm. Le système de projection optique, représenté Figure 45, comporte une illumination de type annulaire (cf. figure 10) de facteurs de cohérences partielles  $[\sigma_{in} ; \sigma_{out}] = [0,7 ; 0,9]$ , de longueur d'onde  $\lambda=193\text{nm}$ , et d'ouverture numérique  $NA=1,35$ .

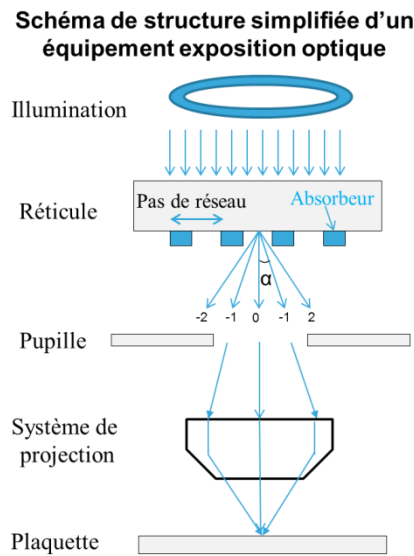


Figure 45 : Schéma simplifié d'un équipement d'exposition optique utilisant une source annulaire

La théorie basée sur l'approche d'Hopkins permet d'exprimer l'intensité en fonction des ordres de diffractions effectivement captés par la pupille et des paramètres du réseau présents sur le réticule [28]. Pour simplification des calculs, on ne considère pour notre étude que trois ordres de diffractions (-1, 0, et +1). L'intensité  $I(x)$  est donnée par :

$$I(x) = S3 \left\{ C0 + 2C1 \cos \frac{2\pi x}{p} \right\}^2 + S2 \left\{ C0^2 + C1^2 + 2C0C1 \cos \frac{2\pi x}{p} \right\} + S1C0^2 \quad \text{Equation 23}$$

Où :

- $S1$ ,  $S2$  et  $S3$  représentent les surfaces de recouvrement faisant intervenir respectivement 1, 2, et 3 ordres de diffractions
- $C0 = \beta + (1 - \beta)T$
- $C1 = \frac{(1+T) \sin(\beta\pi)}{\pi}$
- $\beta$  est le taux d'ouverture du réseau présent sur réticule défini par :  $\beta = CD_{\text{quartz}}/p$
- $p$  est le pas de réseau (ou pitch en anglais)
- $x$  représente la position au niveau de la plaquette
- $T$  est le coefficient de transmission complexe du réticule.

Le taux de transmission est calculé en fonction des indices optiques et des épaisseurs des matériaux qui composent le réticule. Le calcul détaillé pour un réticule de type eaPSM est donné ci-après.

## ii. Détermination du coefficient de transmission complexe

Pour un réticule de type EaPSM en configuration monocouche comme visible Figure 46, le réticule est composé :

- D'une couche de Quartz d'indices optiques  $n_1$  et d'épaisseur  $d$  ( $k_1$  étant nulle),
- D'une couche de Quartz d'indice optique  $n_1$  et d'épaisseur  $d_1$  correspondant à la surgravure du quartz faite lors de la gravure de la couche de MoSi. En effet, la gravure du MoSi n'est pas sélective par rapport au Quartz. En revanche on contrôle la surgravure du quartz à 4nm environ afin d'obtenir les  $180^\circ$  de déphasage.
- D'une couche de MoSi d'indice optique  $\{n_2, k_2\}$  et d'épaisseur  $d_2$
- Le réticule est entouré d'air d'indice optique  $n_3$

On considère pour notre calcul que le Quartz, le MoSi et l'Air sont trois milieux Diélectrique, Linéaire, Homogène et Isotrope (DLHI). On formule l'hypothèse que l'onde traversant le réticule est normale au plan et que le champ électrique incident est polarisé perpendiculairement par rapport au plan d'incidence.

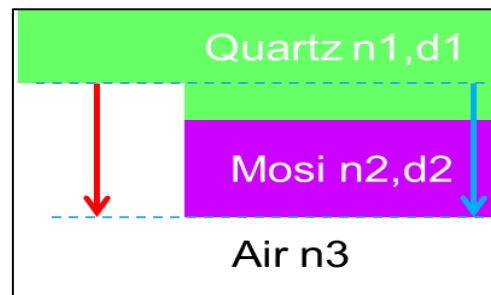


Figure 46 : Représentation schématique de l'empilement d'un réticule de type EaPSM en configuration monocouche. En rouge l'onde ne traversant que le quartz, et en bleu l'onde traversant le quartz et la couche en alliage de MoSi

On connaît les coefficients de Fresnel de Transmission et de Réflexion en amplitude donnés par :

$T_{12} = 2n_1/(n_1+n_2)$ , coefficient de transmission en Amplitude du milieu d'indice  $n_1$  vers le milieu d'indice  $n_2$

$$T_{23} = 2n_2/(n_3+n_2)$$

$$T_{13} = 2n_1/(n_3+n_1)$$

$$R_{12} = (n_1-n_2)/(n_1+n_2)$$

$$R_{23} = (n_2-n_3)/(n_3+n_2)$$

On connaît également la phase de l'onde dans chacune des couches considérées :

$$\Phi_1 = \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \quad \text{et} \quad \Phi_2 = \frac{2\pi n_2 d_2}{\lambda}$$

On peut ainsi déterminer le déphasage  $\Delta Phase$  de l'onde traversant le matériau ainsi que le coefficient de transmission  $T_{MoSi}$  de cette onde à travers l'empilement du réticule, en fonction des paramètres du matériau :

$$\Delta Phase = \arg \left[ \frac{(T_{12} T_{23} \exp(i\Phi_1) \exp(i\Phi_2))}{1 + R_{12} R_{23} \exp(2i\Phi_2)} \right] - \arg [T_{13} \exp(i2\pi n_3(d_1 + d_2)/\lambda)]$$

$$T_{MoSi} = (1 - R_{MoSi}) \exp(-4\pi k d / \lambda) \text{ avec } R_{MoSi} = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2}$$

Nous sommes donc en mesure de calculer les surfaces de recouvrement effectivement captées par la pupille en fonction du pas de réseau, et d'en déduire en utilisant l'équation 23 l'intensité normalisée sur plaquette.

iii. Obtention des surfaces de recouvrement normalisées en fonction du pas de réseau

Les surfaces de recouvrement effectivement captées par la pupille sont déterminées pour une source annulaire de longueur d'onde  $\lambda=193\text{nm}$  de paramètre  $[\sigma_{in} ; \sigma_{out}] = [0,7 ; 0,9]$  et pour une ouverture numérique  $NA=1,35$ . On retrouve deux représentations schématiques Figure 47 et Figure 48.

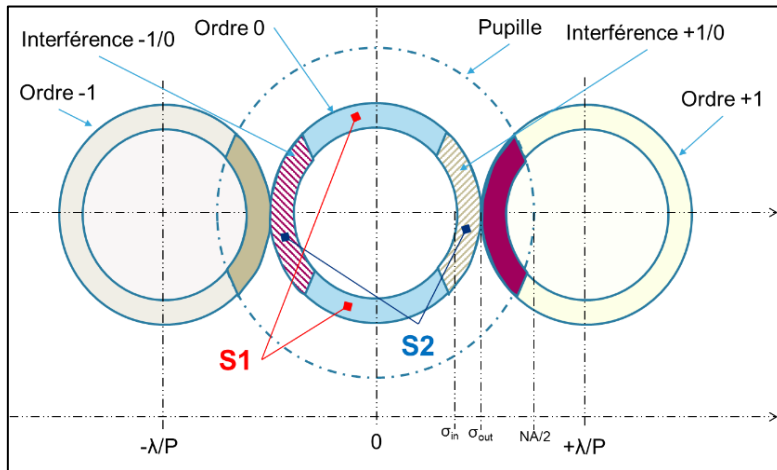


Figure 47 : Détermination des surfaces de recouvrement  $S1$  et  $S2$  pour  $NA/2 < \lambda/P < NA$

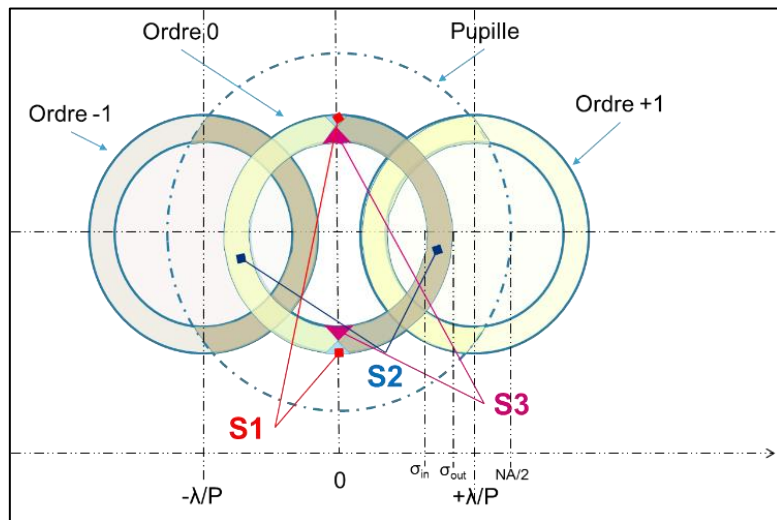


Figure 48 : Détermination des surfaces de recouvrement  $S1$ ,  $S2$  et  $S3$  pour  $\lambda/P < NA/2$

On retrouve sur la Figure 49 l'évolution des surfaces de recouvrement S1 S2 et S3 en fonction du pas de réseau  $p$  :

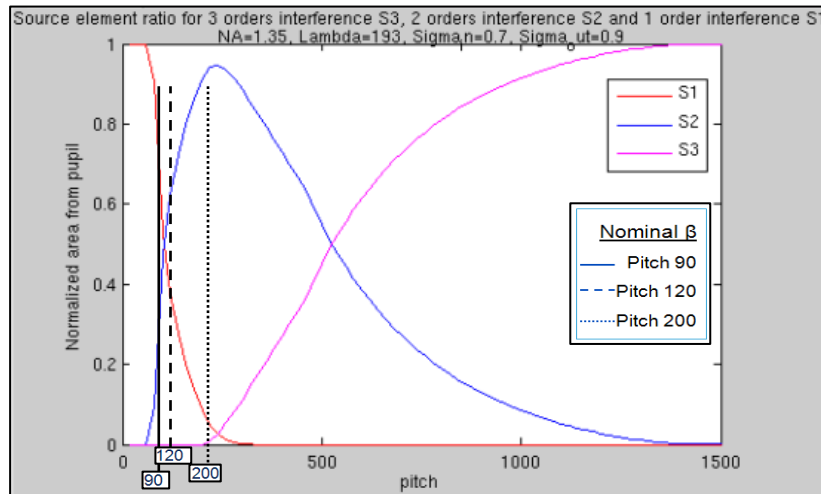


Figure 49 : Evolution des surfaces de recouvrement S1, S2 et S3 normalisées par rapport à la pupille en fonction du pas de réseau  $P$

On remarque que lorsque le pas de réseau augmente, la quantité d'informations issues des différents ordres de diffraction augmente également. La proportion de la surface de l'ordre 0 effectivement captée par la pupille diminue et devient nulle à partir d'un pas de réseau de 300nm environ.

Dans l'équation 23, le taux d'ouverture  $\beta$  apparaît également comme un élément important lors de la détermination du contraste, du NILS et du MEEF pour les trois structures 1D que nous avons choisies. Afin de comparer les performances de chacun des réticules pour nos trois structures, nous allons procéder au calcul de l'intensité sur plaquette pour chacun d'entre eux, pour chaque structure 1D et en fonction du taux d'ouverture. Nous ferons varier le taux d'ouverture de 0,2 à 0,8. On fera également apparaître le taux d'ouverture nominale sur chaque courbe correspondant au CD après modification OPC.

#### iv. Exploitation des résultats

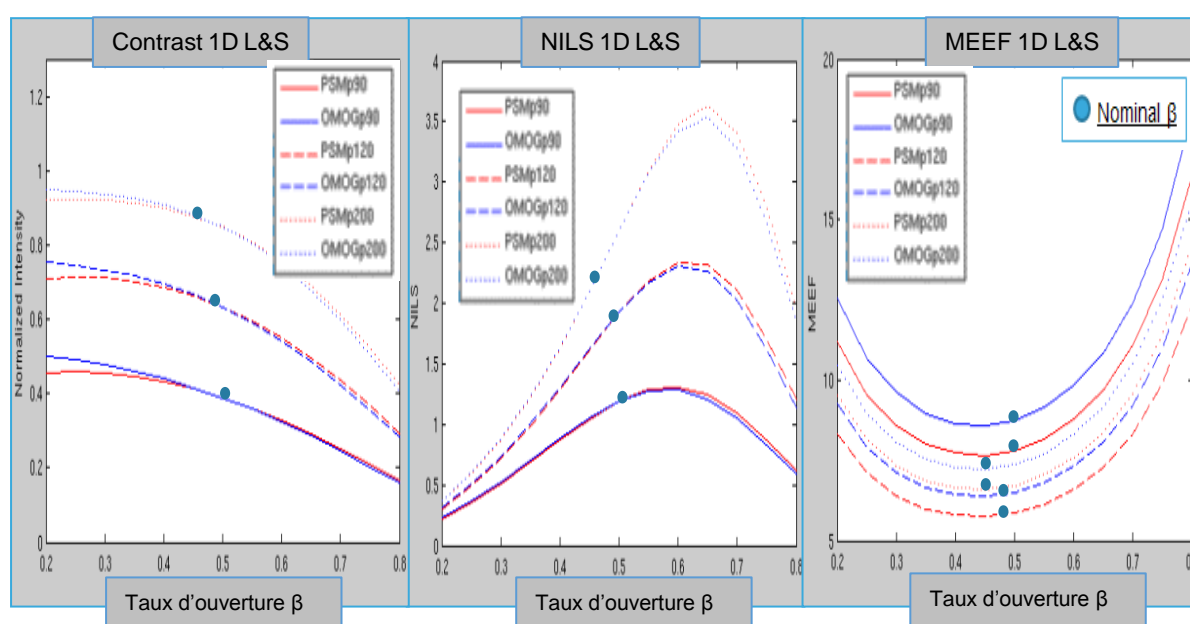


Figure 50 : Courbe de variation de contraste, de NILS et de MEEF pour une structure 1D de type L&S en fonction du taux d'ouverture  $\beta$ , pour des pas de réseau de 90nm, 120nm et 200nm.

De manière générale, le contraste est plus élevé lorsque le pas de réseau augmente. La différence entre un réticule de type OMOG et EaPSM n'est pas significative voir quasi nulle pour les taux d'ouverture nominale des trois structures 1D retenues pour l'étude. Les courbes représentant le NILS permettent d'apprécier la qualité des profils obtenus dans la résine. Plus le NILS est élevé et plus la qualité des profils des motifs dans la résine sera meilleure. Ces courbes montrent clairement que le taux d'ouverture optimum est différent pour chaque structure. De plus le taux d'ouverture nominale n'est pas optimisé pour favoriser l'obtention de profil droit dans la résine. Concernant le MEEF, l'objectif est d'avoir le MEEF le plus faible possible. Pour une structure identique le MEEF d'un réticule EaPSM est plus faible que celui d'un réticule OMOG. On note également que le MEEF correspondant à nos CDs nominaux est très proche du cas idéal, puisque les points correspondant à l'ouverture nominale sont proches du minima des différentes courbes.

#### c. Conclusion

Le contraste optimal est obtenu pour des taux d'ouverture compris entre 0,2 et 0,3. Le NILS optimal est obtenu pour des taux d'ouverture compris entre 0,57 et 0,66. Quant au MEEF il est optimal pour un taux d'ouverture de 0,44. Le comportement des 2 réticules est similaire excepté pour le MEEF où le eaPSM montre de meilleures performances.

Cette première partie nous a permis de mieux comprendre comment l'image est formée à travers notre système de projection optique, de comprendre les effets de la diffraction et de connaître l'interaction entre les ordres effectivement captés par la pupille. Dans le prochain chapitre la mise en place des tests sur nos structures 1D et 2D via l'utilisation du simulateur sera présentée.



Nous abandonnons donc l'approche d'HOPKINS au profit d'une approche rigoureuse dont nous présenterons les deux principales méthodes : la méthode FDTD et la méthode RCWA. L'utilisation d'une méthode rigoureuse nous permettra d'avoir des résultats plus proches de ceux obtenus par expérience.

#### d. Les méthodes rigoureuses

L'obtention de l'intensité qui prend en compte la topographie du réticule sur le trajet optique passe par la résolution des équations de Maxwell dans leur généralité. Les solutions analytiques aux équations de Maxwell, dès lors que le système à modéliser s'éloigne des cas d'écoles sont rares. Ceci impose donc un recours à la simulation numérique. Un exposé des différentes méthodes existantes, rigoureuses ou semi-rigoureuses dépasse le cadre de cette introduction. De manière générale on peut regrouper sous deux catégories les méthodes de résolution des équations de Maxwell, celles qui discrétisent l'espace et le temps et celles qui utilisent une approche modale. Seules les méthodes disponibles dans le logiciel HyperLith™ seront développées dans ce manuscrit. En plus de la résolution basée sur l'approche de Kirchhoff, Il existe deux autres méthodes de résolution rigoureuse des équations de Maxwell dans ce logiciel. La première consiste à résoudre les équations de Maxwell en discrétisant le réticule étudié par un maillage, et dans laquelle les équations différentielles sont remplacées par des différences finies. C'est la méthode FDTD. La seconde est la méthode modale de Fourier connue sous son acronyme anglais RCWA pour Rigorous Coupled-Wave Analysis. On expose ces deux méthodes dans les chapitres i et ii suivants.

##### i. La méthode FDTD

L'approche Finite Domain Time Difference ou FDTD a été introduite par Kane S. Yee [29] en 1966. Elle fut d'abord développée pour des applications militaires (propagation des ondes radios dans les radars et les antennes) et trouva ensuite de nombreuses applications dans le domaine médical (détection des cancers), spatial (modélisation de phénomène géophysique) et autres [30] [31]. Enfin, elle fut introduite en lithographie par [32] afin de tenir compte des effets de topographies du réticule. Le principe repose sur la résolution des équations de Maxwell en exprimant le champ électromagnétique à partir d'un développement limité de second ordre. On définit d'abord un plan d'excitation ainsi que les paramètres de maille tridimensionnelle du réticule afin de permettre le calcul du champ électrique à un instant  $t$  en fonction du champ magnétique aux instants  $t - \frac{1}{2}\Delta t$  et  $t + \frac{1}{2}\Delta t$  et réciproquement. Les différences finies sont appliquées durant ce processus itératif jusqu'à ce que les champs électriques et magnétiques convergent vers une solution unique [23]. Cette approche nécessite cependant une capacité de mémoire importante et des temps de calcul longs. Il n'est pas possible aujourd'hui de réaliser des simulations sur un réticule complet, seules quelques structures peuvent être simulées et il sera donc nécessaire de faire un choix représentatif des configurations de structures à modéliser.

##### ii. La méthode RCWA

La méthode RCWA [33], a été introduite par M.G. Moharam et T.K. Gaylord au début des années 1980 pour la modélisation de réseaux plans diélectriques et métalliques. Le principe de cette méthode repose sur la décomposition en série de Fourier de la permittivité électrique de l'objet diffractant et la résolution des équations de Maxwell projetées dans une base de Floquet-Fourier. L'approximation sur la dérivée seconde du champ n'est plus considérée avec cette méthode. Le calcul des champs électriques et magnétiques requiert la décomposition

en ondes planes et la résolution d'un système dont les valeurs propres sont issues des équations de Maxwell. En revanche la méthode RCWA requiert que l'objet diffractant soit de forme périodique. Dans le cas contraire, l'objet est fragmenté en réseaux élémentaires et le calcul des champs électriques et magnétiques est réalisé comme pour un objet diffractant périodique. Les différents champs sont ensuite reliés entre eux via l'écriture sous forme matricielle des conditions aux limites. La méthode RCWA est à privilégier par rapport à d'autres méthodes de modélisation pour sa rapidité de calcul lorsque les structures étudiées sont périodiques. Lorsque l'objet est non-périodique le temps de calcul s'accroît et il est préférable d'utiliser d'autres méthodes modales. De plus, la modélisation de la composante TM du champ électromagnétique peut être instable et nécessite des temps de calcul plus longs [21].

### iii. Conclusion sur la méthode à utiliser

Dans notre étude nous utiliserons des structures 1D périodiques de type L&S mais également des structures 2D non périodiques. Certaines structures seront issues de niveaux technologiques qui ont subi des modifications OPC et pour lesquels le critère de périodicité imposé par la méthode RCWA ne sera pas respecté. Il apparaît alors que le choix de la méthode de résolution à retenir dans le cadre de notre étude est la méthode FDTD.

Nous commencerons la suite de notre étude en présentant les points importants qu'il sera nécessaire de paramétrer en tenant compte des capacités de simulations et de la précision voulue.

## 4. Les paramètres de simulation (liés au simulateur et au scanner)

Le Simulateur que l'on utilise est HyperLith™ fourni par la société PANORAMIC TECH. Il se décompose en 6 fenêtres principales qui permettent à la fois de décrire les éléments matériels (source, réticule, scanner et plaque de silicium) et les paramètres mathématiques du modèle physique (concernant la propagation de l'onde électromagnétique).

### a. Les paramètres de simulation liés aux éléments matériels

#### i. Le réticule

On décrit dans le simulateur de manière précise le réticule et les paramètres liés à l'écriture des motifs sur le réticule.

La première partie consiste à définir les couches de matériau utilisées que l'on peut scinder en deux : Le substrat et l'absorbeur. Dans notre étude nous comparons deux réticules, un OMOG et un EaPSM. Le substrat de ces deux réticules est identique, on utilise du quartz. L'absorbeur en revanche est différent. On retrouve dans la Figure 51 un schéma représentant une vue de coupe d'une ligne pour les deux types de réticule, ainsi que les valeurs des indices  $n$  et  $k$  permettant de traduire les propriétés optiques des différentes couches.

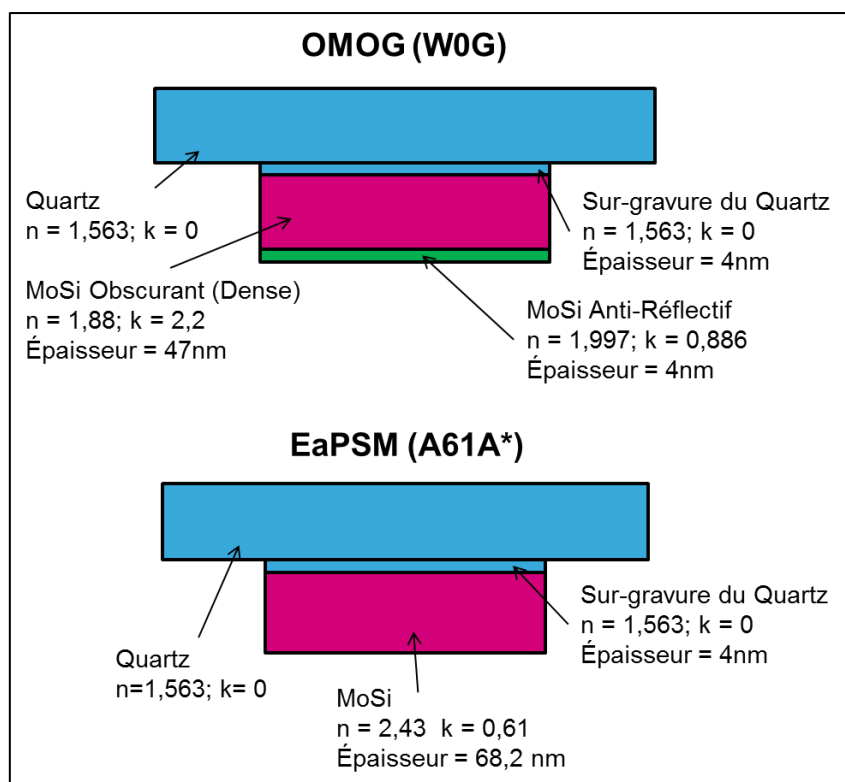






Figure 51 : Coupe représentative d'un réticule de type OMOG et EaPSM illustrant les couches de matériau qui composent les deux réticules.

Le réticule de type OMOG peut être modélisé par une couche supérieure de MoSi que l'on appelle l'anti-réfléctif, suivi d'une couche de MoSi qualifiée d'obscurant. Le réticule EaPSM ne sera lui modélisé que par une couche en alliage de MoSi. Il y a également une couche de quartz qu'il est nécessaire de prendre en compte dans la modélisation. En effet lors de la gravure par plasma réactif des motifs dans l'empilement du réticule, la gravure du MoSi n'est pas sélective par rapport au quartz. La gravure ne s'arrête donc pas à l'interface MoSi/quartz. La gravure par plasma est supervisée via la concentration des ions Molybdène et Silicium présents dans le plasma. Dès la quasi-disparition de ces ions dans le plasma on poursuit la gravure pendant un certain laps de temps qui permet de s'assurer que le matériau absorbant a bien été retiré. C'est la gravure réalisée dans ce temps que l'on appelle la sur-gravure du quartz ou plus communément le "quartz overetch". Ce temps est contrôlé pour que le quartz soit gravé de 4 nanomètres. Ces 4 nanomètres vont contribuer à augmenter le chemin optique d'une onde qui traverserait le motif par rapport à celle que ne verrait que le quartz. On prend donc en compte ces 4 nanomètres comme faisant partie de l'épaisseur du réticule dans la zone où l'on définira le motif et on retrouvera cette sur-gravure du quartz dans tous les réticules utilisant un alliage de MoSi comme absorbeur.

On définit également une pente au niveau des profils de chaque motif pour le simulateur, comme visible Figure 52 . La mesure de la pente des profils étant destructive, elle n'est réalisée que lors de la qualification des réticules pour l'introduction en production. Pour l'étude et après des mesures réalisées chez les fournisseurs de réticule, la pente des profils sera égale à 88°.

Pattern Layers					
Name	CallName	Color	n	k	
QuartzOverEtch	Abs		1.563 \$nquartz\$	0.0	0.0
MoSi Shading	Abs		1.754 \$nMosiShad\$	2.137	\$kMosiShad\$
MoSi AR	Abs		1.997 \$nMosiAR\$	0.8857	\$kMosiAR\$
Air Clear out	Air		1.0	1.0	0.0

zmin	zmax	round_Outer	round_Inner	swa (deg)
0.0 0.0	4.0 \$hQOE\$	0.0 0.0	0.0 0.0	90.0 90-\$swa\$
4.0 \$hQOE\$	46.0 \$hQOE\$+\$hMosiShad\$	0.0 0.0	0.0 0.0	90.0 90-\$swa\$
46.0 \$hQOE\$+\$hMosiShad\$	90.0 \$hQOE\$+\$hMosi\$+\$h\$	0.0 0.0	0.0 0.0	90.0 90
0.0 0.0	90.0 \$hQOE\$+\$hMosi\$+\$h\$	0.0 0.0	0.0 0.0	90.0 90.0

swa skew (deg)	bias	bias skew	skew angle (deg)
0.0 0.0	0.0 0	0.0 0.0	0.0 0.0
0.0 0.0	0.0 -\$demag\$*\$hQOE\$/tan(l	0.0 0.0	0.0 0.0
0.0 0.0	0.0 -\$demag\$*(\$hQOE\$+\$h\$	0.0 0.0	0.0 0.0
0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0

Figure 52 : Configuration des couches et des profils du réticule dans le HyperLith®

## ii. Le scanner

Plusieurs paramètres permettent de décrire le scanner dans sa quasi-totalité au niveau du simulateur. Nous considérerons pour l'étude que les lentilles sont parfaites et parfaitement alignées. De même on considèrera qu'il n'y a pas de fluctuations d'intensité de la source et qu'elle est supposée parfaite. Ainsi il reste l'ouverture numérique que l'on prendra égale à 1,35, correspondant à celle disponible sur le scanner en salle blanche que l'on utilisera pour la vérification sur plaquette de silicium.

## iii. L'empilement sous la résine

L'empilement sous la résine est défini en renseignant l'épaisseur de chaque couche ainsi que les indices optiques n et k correspondants. Afin d'éviter le phénomène d'onde stationnaire du aux réflexions de l'onde sous l'empilement de la résine, et étant donné que l'on souhaite comparer deux types de réticules, on utilisera l'approximation "résine infinie". Cela consiste à définir une épaisseur de résine telle qu'elle serait sur plaquette (en renseignant ses indices optiques), puis de paramétrer la couche de silicium sous la résine avec les mêmes indices optiques que la résine afin qu'il n'y ait pas de réflexion à l'interface résine silicium. Les motifs ainsi obtenus dans la résine seront le résultat du transfert de l'image aérienne sans les effets résines. La Figure 53 résume la configuration prise pour le paramétrage de l'empilement utilisé pour notre étude.

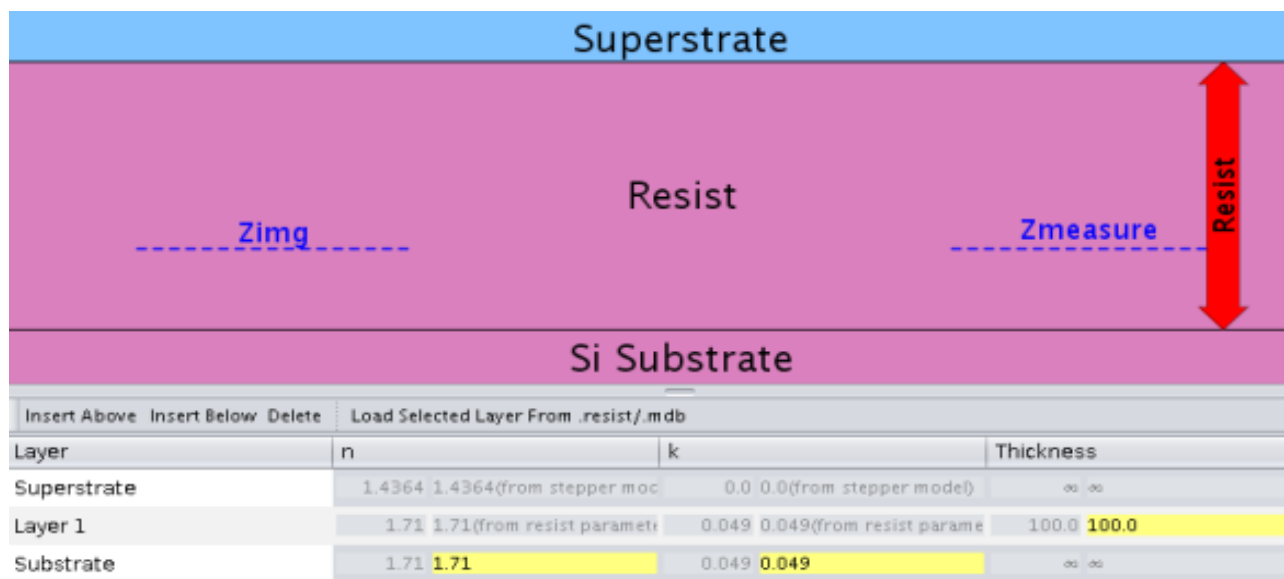


Figure 53 : Configuration de l'empilement plaquette en configuration "infinite stack" prise pour notre étude.

#### b. Les paramètres de simulation liés au modèle physique

On commence le paramétrage du modèle physique par le choix du modèle de simulation parmi ceux décrits dans la partie B.II.3.d. (Kirchhoff, FDTD ou RCWA). De la source à la plaquette, chacun de ces paramètres a été optimisé afin de trouver le meilleur compromis entre vitesse et précision de calcul.

##### i. La source

La source utilisée pour la partie simulation provient d'une mesure réalisée sur scanner permettant d'obtenir une cartographie précise de la répartition de l'intensité. Une seconde étape permet de filtrer les points isolés sur cette cartographie et de symétriser les différents points d'intensité. On retrouve Figure 54 la source obtenue. Enfin on choisit également le schéma de polarisation de la source et son échantillonnage. On comprend bien que plus l'échantillonnage est important, et plus la précision augmentera au détriment d'une vitesse de calcul plus élevée. L'échantillonnage qui fournit le meilleur compromis dans notre étude est de 20 points.

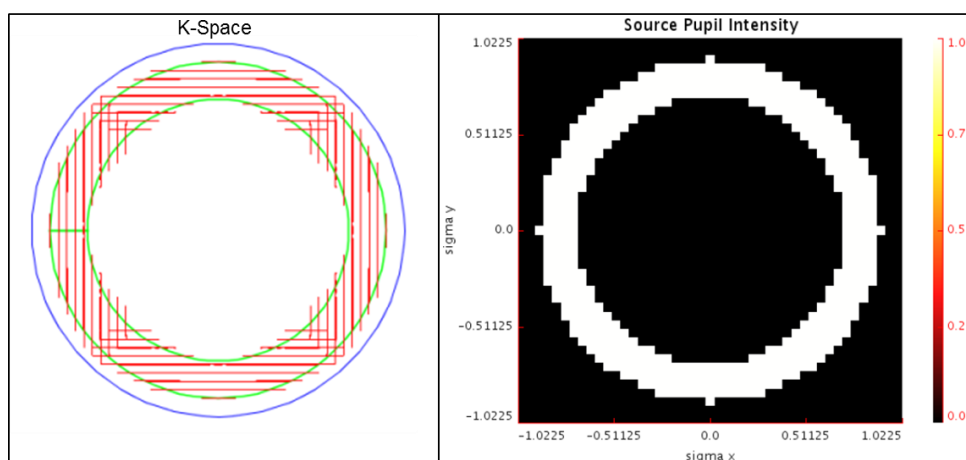


Figure 54 : Source configurée dans le simulateur. A droite la cartographie en intensité de la source annulaire utilisée, à gauche la représentation dans l'espace de Fourier

## ii. Choix des angles d'incidence des coefficients de diffraction non constants

Le choix des angles d'incidence est également un des éléments qui permettra d'apporter une meilleure précision aux résultats de la simulation. De manière générale, un réticule avancé (i.e. ayant des motifs inférieurs à la moitié de la longueur d'onde) peut être considéré comme un objet diffractant une onde plane incidente en un ensemble d'ondes planes, que l'on appelle les ordres de diffractions. La phase et l'amplitude de chaque ordre diffracté sont liées à l'onde incidente via un nombre complexe que l'on définit comme étant le coefficient de diffraction [c.f. figure chapitre A.II.6.]. Le facteur de cohérence partielle de la source est relié à la quantité d'ondes incidentes provenant de la source et reçues par le réticule. Dans le cas de sources étendues on sait que l'ensemble des angles d'incidences qui arrivent sur le réticule ont des directions de propagations variées et loin de l'axe optique. L'hypothèse jusqu'alors utilisée était de considérer que l'ensemble des ondes diffractées par le réticule l'étaient de la même manière. Or [34] montre dans cette étude que cette hypothèse n'est pas valide lorsque l'on travaille avec des réticules de types EaPSM et des réticules binaires dont la taille des motifs caractéristiques est inférieure à la longueur d'onde de la source. Ceci nous amène donc à considérer les angles d'incidence pour les coefficients de diffraction non constants. Dans le simulateur on choisit le nombre d'angles d'incidence et l'angle d'incidence. Dans le cas de notre source annulaire 4 angles d'incidence à  $17^\circ$  ont été retenus, avec une composante magnétique et une composante électrique. Le calcul rigoureux est réalisé pour chacune de ces 8 composantes puis une combinaison linéaire est réalisée sur chaque point d'échantillonnage de la source, visible Figure 55.

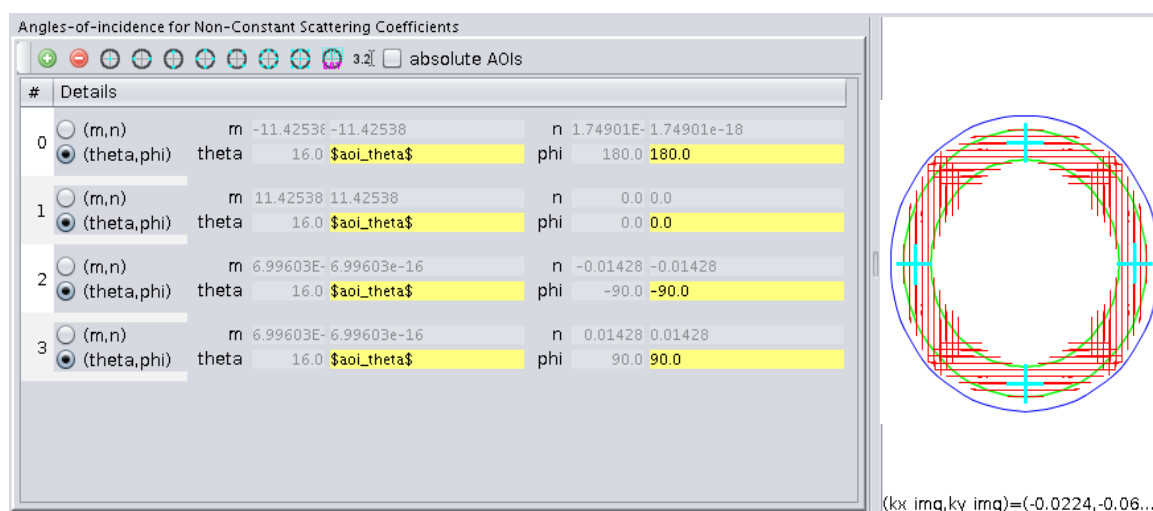


Figure 55 : Paramétrages des angles d'incidence pour les coefficients de diffraction non constants utilisés dans HyperLith® pour la source annulaire utilisée pour nos simulations.

## iii. Choix du pas de maillage en z et en x/y

Le pas de maillage est également un paramètre important qu'il est nécessaire de choisir judicieusement. On peut paramétrer indépendamment les pas de mailles dans les 3 directions de l'espace. On définit l'axe z dans le même sens et la même direction que l'axe optique et les axes x et y sont orthogonaux entre eux et à l'axe z. Le pas selon l'axe z, doit être choisi comme étant un multiple de la plus petite épaisseur de l'une des couches qui composent le réticule, **ET** un multiple de chacune des couches qui composent le réticule. Le cas échéant les interfaces

seraient prises en compte de manière erronée. Enfin les pas de mailles en x et y doivent être des multiples des motifs utilisés pour la simulation pour les mêmes raisons que précédemment.

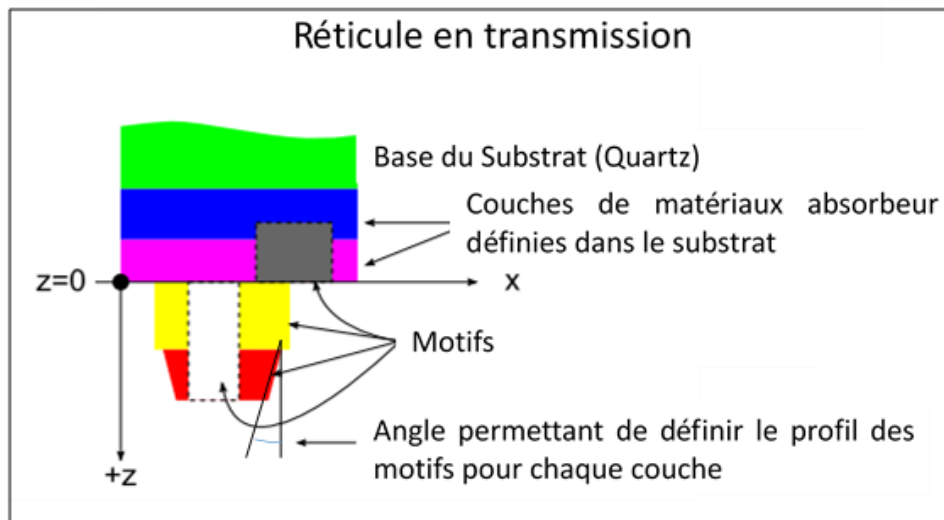


Figure 56 : Paramétrage du pas de maille selon l'axe z dans le simulateur HyperLith® et des couches de matériau qui composent le réticule.

Pour notre étude nous nous placerons à 30% de la hauteur de résine pour ajuster le seuil de l'intensité de l'image aérienne, en utilisant le motif de référence que l'on appelle le Mesdim (qui n'est autre qu'un réseau de ligne dense de pas de réseau de 90nm et de taille de CD de 49nm). Le plan de mesure est fixé à 30% de la hauteur de résine, ce qui correspond à la hauteur utilisée sur le Microscope Electronique à Balayage pour effectuer la mesure sur plaquette.

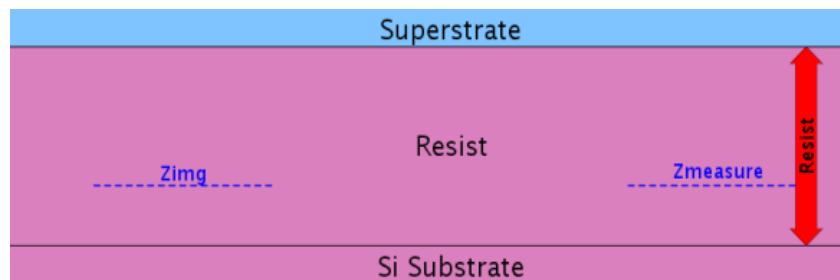


Figure 57 : Paramétrage du plan image  $Z_{img}$  et du plan de mesure  $Z_{measure}$  dans le simulateur HyperLith®

Hyperlith® permet également de réaliser des simulations permettant de faire varier le focus. Il est donc possible de réaliser des Matrices Dose/Focus comme sur plaquette afin de tester la stabilité en CD, de déterminer le meilleur plan focal et la fenêtre de procédé commune aux structures testées et embarquées sur un même réticule.

## 5. Résultats de la simulation

Nous commencerons cette partie simulation par un préambule qui permet de replacer le travail réalisé dans un contexte industriel en rapport au contexte historique.

### a. Préambule

Les travaux menés durant cette thèse l'ont été avec plusieurs compagnies partenaires et ce concernant la même problématique. Les travaux de simulations leurs bonnes pratiques ont été menés avec Dai Nippon Printing, notre fournisseur de réticules avancés. Ces séquences de simulation croisées avec DNP avaient un double objectif :

- Comprendre à la fois l'influence des paramètres optiques (indices optiques  $n$  et  $k$ ), de l'épaisseur des couches du réticule et vérifier que ces paramètres sont bien ceux du réticules,
- S'assurer des résultats obtenus en les menant en parallèle.

Nous avons également cherché à comprendre comment ces paramètres sont obtenus et contrôlés. Plusieurs éléments ressortent alors de ces exercices de simulations :

1. Le cycle de fabrication des réticules fait intervenir deux acteurs différents : DNP qui transfère les motifs dont nous avons besoin en tant que IDM et les fabricants de Blank (le réticule vierge)
2. Si un nouveau réticule était développé, le cycle de qualification serait très long pour deux raisons principales :
  - a. La stabilité en production et le contrôle des différentes couches de ce nouveau réticule chez le blank provider
  - b. La qualification chez DNP pour connaître la variabilité et la stabilité de ces nouveaux réticules en écriture, en nettoyage et en longévité
3. Ni le blank provider ni DNP n'ont vraiment conscience que le réticule peut contribuer à réduire de manière notable la fenêtre de procédé et être mis en cause dans la problématique de variation de best focus
4. Il ne nous sera pas possible de discuter directement avec les blank provider car nous ne sommes pas leur client direct. De plus, l'organisation de réunion tripartite se montrerait déplacée vis-à-vis de DNP. L'accès aux informations liées à la fabrication des blanks se fera donc via DNP. Par ailleurs on retrouve très peu de détail dans la littérature sur le procédé de fabrication des réticules.

Il sera donc difficile à l'échelle d'une thèse de mettre en place un réticule spécifique à notre problématique.

En parallèle un programme de recherche en collaboration avec ASML dans le cadre d'un projet nommé ECLIPSE est toujours en cours. C'est d'ailleurs à travers ce programme que ST avait évalué le module FLEXWAVE. Après une première réunion, nous prenons connaissance du fait qu'une équipe de recherche ASML travaille sur la même problématique depuis près de 3 ans déjà. Il s'avère que le développement d'un nouveau réticule EaPSM est également leur principale piste de recherche. Ils sont déjà en collaboration avec un Blank provider directement et ont déjà commencé à évaluer un nouveau réticule de type EaPSM. Les premiers résultats de simulation utilisant les paramètres du réticule EaPSM standard chez ST



nous auront donc permis de comprendre et appréhender le fonctionnement du simulateur. Par contre nous utiliserons les paramètres de ce nouveau réticule pour notre étude comparative en simulation et sur plaquette. Etant donné que l'utilisation d'un réticule peu répandu conduit forcément à les payer plus cher nous évaluerons l'écart entre ce nouveau réticule EaPSM optimisé et notre standard EaPSM.

Dans la suite de cette partie B nous présenterons les résultats de simulation permettant de comparer le contraste de l'image aérienne, le NILS, le MEEF ainsi que les fenêtres de procédé obtenus pour le réticule EaPSM optimisé et OMOG.

### b. Les structures 1D

Dans cette partie nous utiliserons les structures 1D présentées au chapitre B.II.3.a. Dans un premier temps nous présenterons les résultats obtenus pour le contraste de l'image aérienne, le NILS et le MEEF pour chacune des trois structures Figure 58.

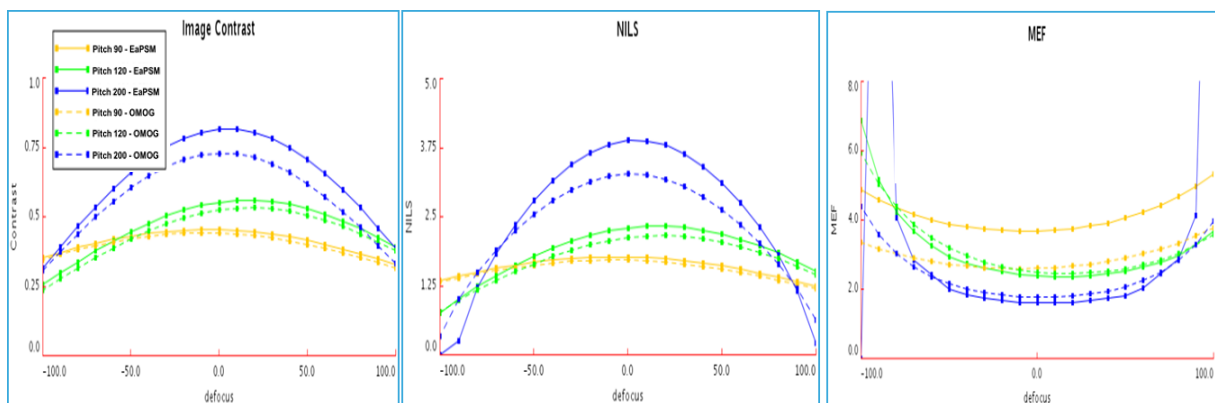


Figure 58 : Courbe de variation de contraste, de NILS et de MEEF pour une structure 1D de type L&S en fonction du défocus, pour des pas de réseau de 90nm, 120nm et 200nm.

Pour un même pas de réseau, les points maximum en contraste sont situés sur le même plan focal pour les deux types de réticules. Il n'y a pas de différence notable en termes de contraste, excepté pour le pas de réseau à 200nm pour lequel le contraste maximum est supérieur pour l'EaPSM de 13% par rapport à l'OMOG. Concernant les autres pas de réseau, on note que la courbe pour l'EaPSM est légèrement supérieure à celle de l'OMOG. En revanche les maximums pour chacun des pas de réseau considérés ne sont pas sur le même plan focal. Pour le pas de réseau à 90nm le maximum est obtenu pour un défocus de -10nm, +20nm pour le pas de réseau à 120nm et +5nm pour le pas de réseau de 200nm. On retrouve le même comportement concernant les courbes de NILS.

Pour la courbe de MEEF utilisée nous ne prenons pas en compte le facteur de réduction du système optique. Un MEEF de 1 traduit donc un comportement linéaire entre la variation de la taille d'un motif sur réticule et celui mesuré sur plaquette. [35] montre que pour des motifs denses type ligne et espace, le MEEF est inférieur à 1 lorsque les motifs sont supérieurs à la longueur d'onde, proche de 1 au voisinage de la longueur d'onde et très supérieur à 1 pour des motifs visés en dessous de la longueur d'onde (Ce qui est bien en adéquation avec les résultats trouvés). Plus le CD visé est inférieur à la longueur d'onde de travail et plus le MEEF sera élevé.

Les courbes de MEEF pour les pas de réseau de 120nm et 200nm ne montrent pas d'écart notable entre les deux types de réticules. Pour le pas de réseau de 90nm, le MEEF est de 3 pour l'OMOG et de 4 pour l'EaPSM. Nous avons donc une variation de 1 pour 4 entre le CD mesuré sur plaquette et celui mesuré sur le réticule pour le EaPSM. Concernant l'OMOG une variation de 1nm sur le réticule conduit à une variation de 3nm sur plaquette. On retrouve ainsi une différence de près de 25% et vis-à-vis du MEEF, les réticules de types OMOG sont plus performants.

D'un point de vue lithographique on s'intéressera aux fenêtres de procédés communes obtenues pour les deux types de réticule présentés Figure 59.

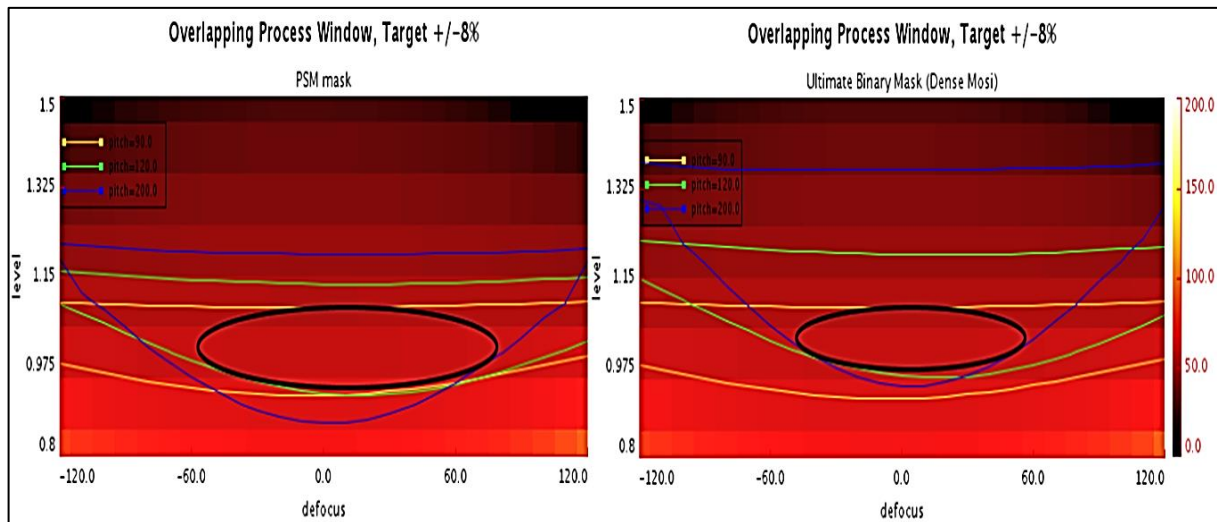


Figure 59 : Fenêtres de procédés communes aux structures 1D (pas de réseau 90nm, 120nm, et 200nm) obtenues pour chacun des deux réticules étudiés.

Les différentes courbes ont été tracées pour une variation de CD tolérée de  $\pm 8\%$  (tolérance prise également en production). Le réticule de type EaPSM montre une profondeur de champs plus large de 20% par rapport au réticule de type OMOG et une latitude en énergie plus élevée de 10%.

### c. Conclusion sur les résultats 1D

Bien que le MEEF soit plus important pour le réticule de type EaPSM comparé au réticule OMOG, l'EaPSM montre de meilleures performances lithographiques en termes de fenêtre de procédé et des performances semblables en termes de contraste et de NILS. Cependant ce MEEF signale que le biais qui sera introduit par l'OPC devra être contrôlé et la marge de manœuvre concernant l'erreur d'écriture du côté des fabricants de réticule minimisé également.

### d. Les structures 2D

Concernant les structures 2D, les motifs utilisés pour la simulation sont directement issus de fichiers contenant le dessin physique complet du circuit intégré, que l'on désigne par GDS (de l'anglais Graphic Data System). Les motifs utilisés ont subi une étape de correction des effets de proximité optique et il aurait été difficile de les reproduire directement dans le simulateur. Par contre les pas de maillages en x et y doivent être adaptés pour que la correction des effets de proximité optique soit prise en compte dans la simulation. Il en résulte des temps de calcul

du simulateur particulièrement longs et gourmands en mémoire. A titre d'information, le temps de simulation pour la structure de type "Golden\_Hotspot" est de 153 heures environ, soit plus de 6 jours en continu. Malheureusement les simulations n'ont pas toutes pu aboutir pour chacune de nos structures en raison de temps de calculs trop long. Nous présenterons donc les résultats pour la structure de type Golden Hotspot ainsi que pour la structure de type Neck.

#### i. Structure Golden Hotspot

Dans cette partie sont présentées les courbes de contraste et de NILS pour la structure que nous appellerons Golden Hotspot, ainsi que la fenêtre de procédé comparative entre les deux réticules Figure 60. Les courbes comparatives de MEEF n'ont pas été tracées puisque les simulations ont été faites à partir du GDS dans lequel les dimensions sont des valeurs fixes.

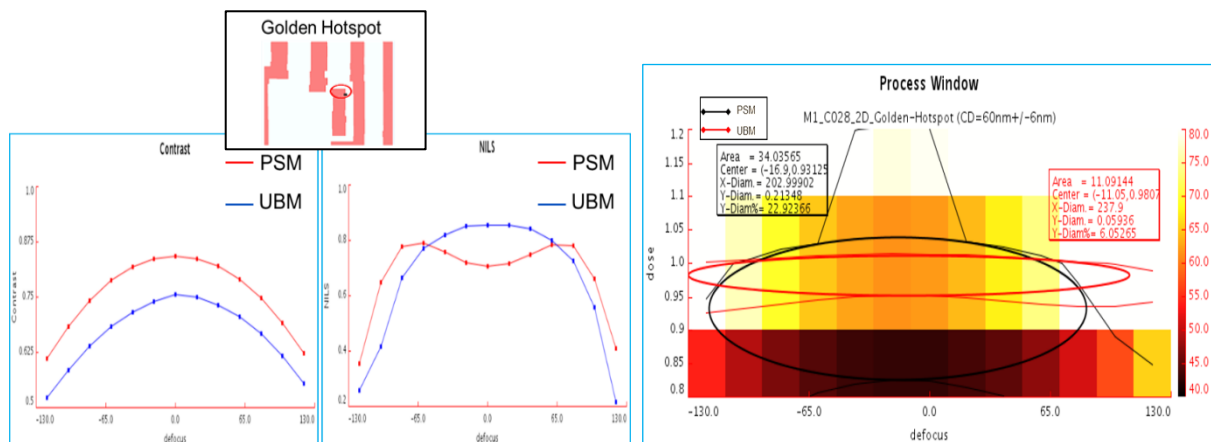


Figure 60 : A gauche : Courbe de variation de contraste et de NILS pour la structure de type Golden Hotspot ; A droite : Tracé de la fenêtre de procédé comparative entre les réticules de type EaPSM et OMOG (UBM)

Les points maximum en contraste sont situés sur le même plan focal pour les deux types de réticules. Le contraste maximum est supérieur pour l'EaPSM de 16% par rapport à l'OMOG. Concernant le NILS on remarque un comportement atypique pour le réticule de type EaPSM avec un minimum local autour de 0nm. Ce minimum local coïncide avec le maximum en NILS pour l'OMOG. Néanmoins l'atténuation du profil du motif dans la résine pour l'EaPSM est de 12%. Le profil obtenu sera donc meilleur au point de focus optimum avec l'OMOG pour cette structure. On note tout de même une meilleure stabilité du profil sur les extrémités de la plage de focus étudiée pour le réticule de type EaPSM.

La profondeur de champ pour le réticule de type OMOG est plus large de 14% comparé à celle observé pour l'EaPSM. Cependant elles sont toutes les deux confortables d'un point de vue process. La latitude en énergie est par contre quatre fois plus large pour le réticule de type EaPSM comparé à l'OMOG et dénote un contrôle du procédé lithographique plus difficile pour l'OMOG.

## ii. Structure Neck ou Cou

De même que pour la structure de type Golden Hotspot, les courbes comparatives de MEEF n'ont pas pu être tracées. On retrouve Figure 61 les courbes de contraste et de NILS pour la structure Neck ainsi que la fenêtre de procédé comparative entre les deux réticules.

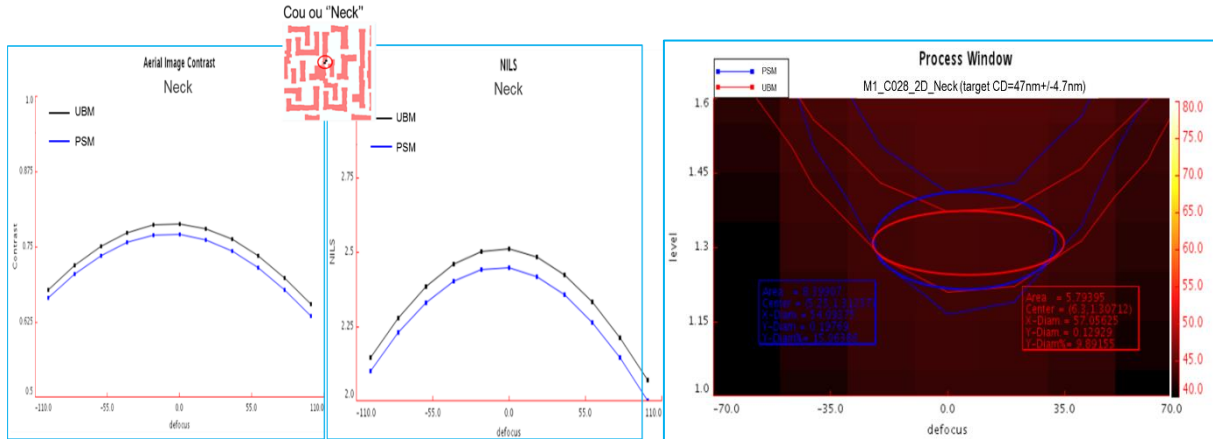


Figure 61 : A gauche : Courbe de variation de contraste et de NILS pour la structure de type Neck ; A droite : Tracé de la fenêtre de procédé comparative entre les réticules de type EaPSM et OMOG (UBM)

Bien que comparable, les maxima en contraste et en NILS sont légèrement supérieurs pour le réticule de type OMOG que pour le réticule de type EaPSM. La profondeur de champ est comparable entre les deux réticules et s'établissent à environ 60nm. Elles sont donc très peu confortables voir problématique d'un point de vue process lithographique. La latitude en énergie est 36% plus large pour le réticule de type EaPSM comparée à l'OMOG.

## e. Conclusion sur la partie simulation.

Les résultats obtenus via simulation pour les structures 1D nous permettent de dire que le EaPSM est plus indiqué que l'OMOG pour des niveaux denses de type Metal28 bien que la robustesse des modèles OPC utilisés devra être plus élevée et le contrôle CD des motifs sur le réticule EaPSM plus rigoureux en raison d'un MEEF moins performant. Cependant les résultats obtenus pour les structures 2D, bien que comparable laissent apparaître une légère supériorité de l'OMOG concernant le contraste et le NILS. Par contre les fenêtres de procédés des structures 2D étudiées sont nettement plus confortables avec le réticule de type EaPSM. Le réticule de type EaPSM est donc meilleur pour ce niveau.

### III. Les résultats plaquettes

Suites à nos travaux de simulation, deux réticules ont été fabriqués et gravés avec le même design, celui du METAL 1 28nm. Le modèle OPC utilisé pour le réticule EaPSM est le même que celui qui a été utilisé pour le réticule de type OMOG. Les motifs présents sur le réticule de type EaPSM n'ont donc pas été optimisés pour obtenir la meilleure résolution. Dans la suite de cette partie III les résultats présentés proviennent des mêmes structures que celles utilisées pour la partie simulation. Afin d'introduire le moins de variabilité possible dans notre étude comparative, on utilisera les mêmes équipements d'exposition et de mesures. Les mesures seront réalisées sur le même microscope électronique à balayage en utilisant les mêmes conditions de faisceau et les deux plaques seront mesurées l'une après l'autre, afin de réduire le risque d'introduction d'un facteur différentiateur pour notre étude. On ne détaillera pas dans ce manuscrit les étapes ayant permis d'appréhender l'utilisation du MEB. Deux FEMs ont donc été réalisées, chacune centrée à un point de fonctionnement permettant de résoudre la structure de référence à la même dimension pour chacun des réticules. Le pas de dose utilisé est de 0.5mJ/champ et le pas de focus utilisé est de 20nm/champ. Chacune des 6 structures identifiées a été mesurée 2 fois dans le champ, sur les sites 15 et 24, et il y a 136 champs sur une plaquette. On commencera par exploiter les résultats plaquettes obtenus pour les structures 1D.

#### 1. Structures 1D, exploitation des résultats et méthodologie d'exploitation

Les deux plaquettes utilisées pour l'expérience sont les mêmes en terme d'empilement. Pour chacune des trois structures 1D on tracera les courbes de Bossungs et la fenêtre de procédé à  $\pm 8\%$  du CD visé, et ce pour les 2 plaquettes. Le tracé sera effectué avec un outil développé en interne par l'équipe RET, que l'on appelle DGMage. Cet outil permet d'obtenir directement le Best Focus et la fenêtre de procédé à partir du fichier de résultats obtenu sur MEB. L'exploitation des résultats se déroule en 3 phases :

1. S'assurer que les motifs ont été correctement imprimés dans la résine (vérification des étapes d'exposition et de développement)
2. S'assurer que le point de mesure pour chaque image est correct (en effet lors de mesure de structure dense le MEB peut confondre les lignes avec les espaces, ou mal placer les points de mesure sur les contours à l'interface résine/espace)
3. Récupérer l'ensemble des points de mesures et les transférer sur DGMage

Les résultats seront présentés pour chaque pas de réseau et de manière comparative entre OMOG et PSM. Concernant les fenêtres de procédés l'échelle utilisée sur les graphiques n'est pas identique (les courbes Iso-CD sont tracées automatiquement par DGMage sans que l'on ait la main sur l'adaptation de l'échelle).

a. Pas de réseau de 90nm  
i. Courbes de Bossungs

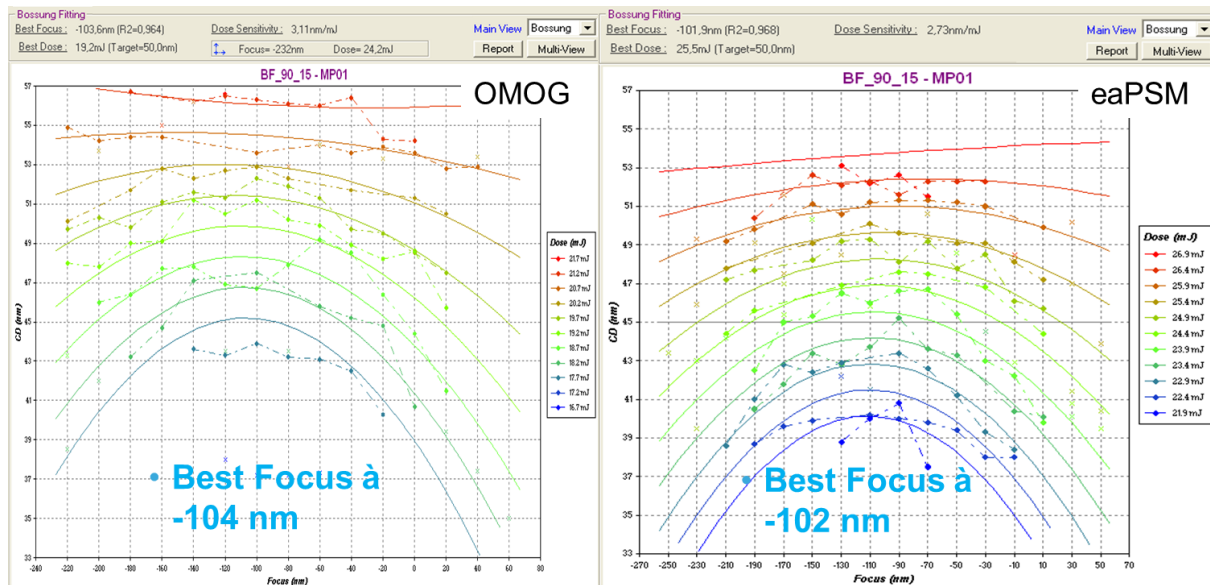


Figure 62 : Courbes de Bossungs obtenues pour un pas de réseau de 90nm sur le site 15. A droite les résultats pour le réticule de type eaPSM, le best focus est de -102nm. A gauche les résultats pour le réticule de type OMOG, le best focus est de -104nm.

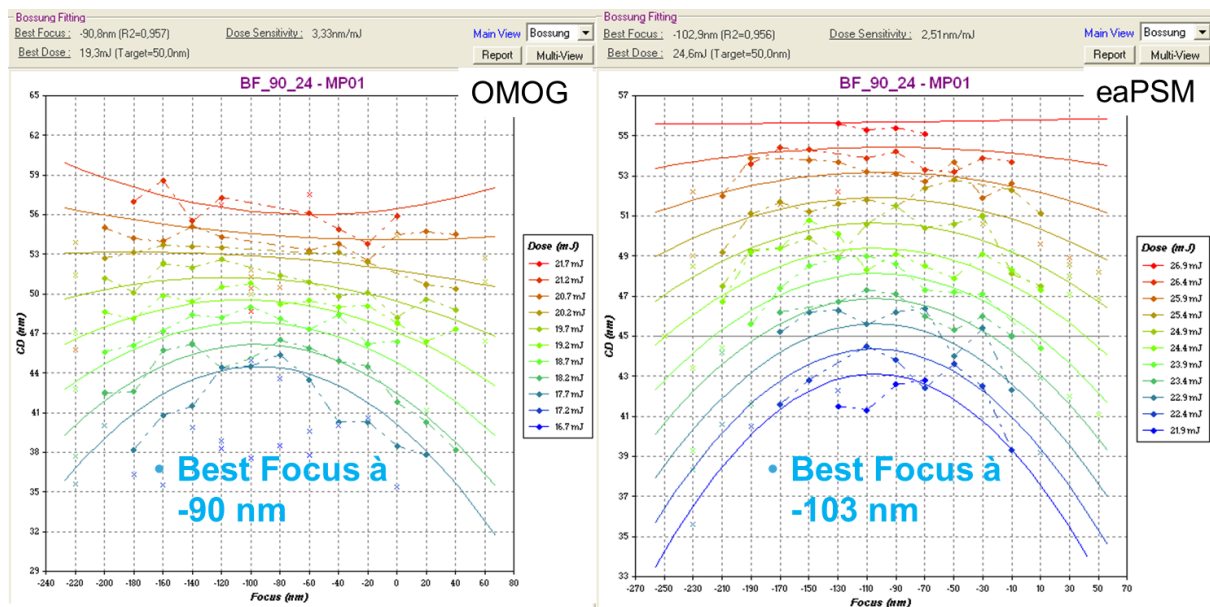


Figure 63 : Courbes de Bossungs obtenues pour un pas de réseau de 90nm sur le site 24. A droite les résultats pour le réticule de type eaPSM, le best focus est de -103nm. A gauche les résultats pour le réticule de type OMOG, le best focus est de -90nm.

Les Figure 62 et Figure 63 montrent les résultats obtenus pour le pas de réseau de 90nm sur les deux sites de mesures (sites 15 et 24). Pour le masque de type eaPSM il n'y a pas d'écart de best focus entre les deux sites. On retrouve une différence de 14nm pour le masque de type OMOG entre les deux sites.



## ii. Fenêtre de procédé

On retrouve Figure 64 et Figure 65 les tracés des courbes Iso-CD permettant de déterminer la Profondeur de champ DOF, et la latitude d'exposition EL pour chacun des deux sites de mesures et pour chacun des réticules.

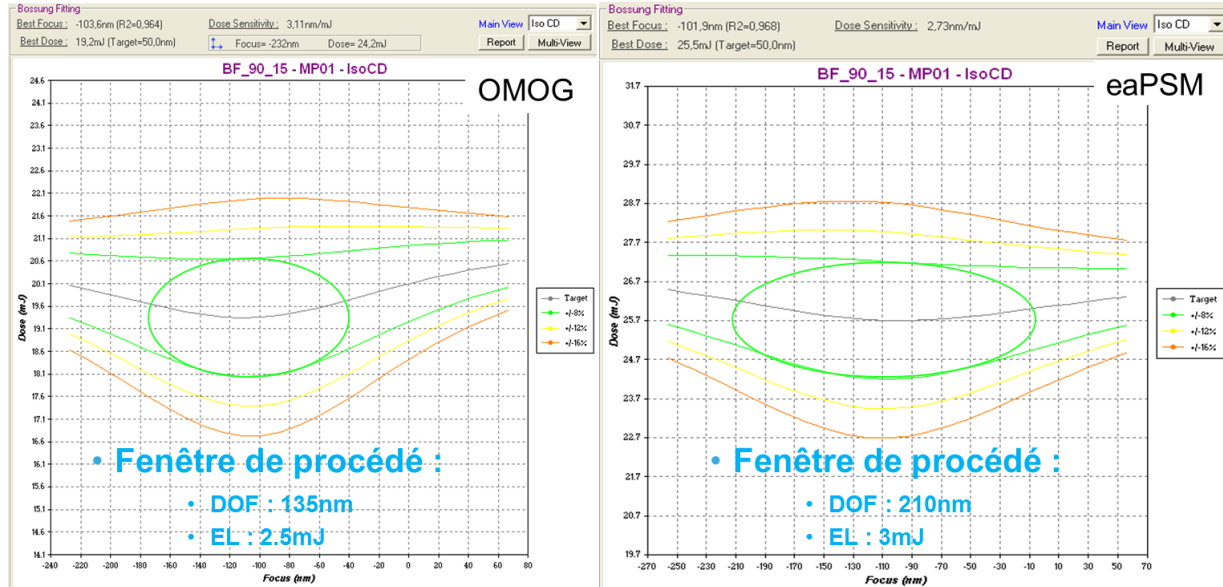


Figure 64 : Tracé de la fenêtre de procédé pour le pas de réseau de 90nm sur le site 15. A droite les résultats pour le réticule de type eaPSM, avec une DOF de 210nm et une EL de 3mJ. A gauche les résultats pour le réticule de type OMOG, avec une DOF de 135nm et une EL de 2.5mJ.

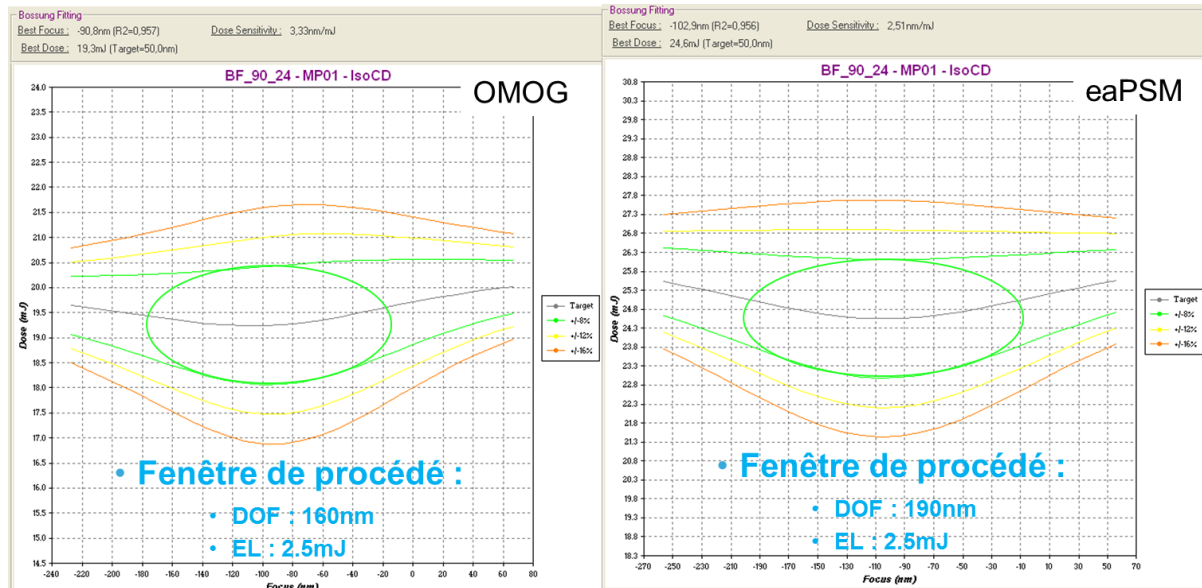


Figure 65 : Tracé de la fenêtre de procédé pour le pas de réseau de 90nm sur le site 24. A droite les résultats pour le réticule de type eaPSM, avec une DOF de 190nm et une EL de 2.5mJ. A gauche les résultats pour le réticule de type OMOG, avec une DOF de 160nm et une EL de 2.5mJ.

### iii. Conclusion

La plaquette ayant été exposée avec le réticule de type EaPSM présente pour les deux localisations utilisées de meilleurs résultats en termes de profondeur de champ et de latitude d'exposition :

- La profondeur de champ est 55% plus étendue sur le premier site et 18% sur le second
- La latitude d'exposition est 20% plus large sur le premier site et similaire sur le second pour l'EaPSM.

En terme de variation de Best Focus on retrouvera partie C.III.1.d un tableau récapitulatif qui nous permettra d'apporter une réponse complète. La différence de Best Focus entre les deux localisations pour chacun des réticules est plus faible pour l'EaPSM que pour l'OMOG. On remarque également que la dose d'exposition nominale est plus élevée pour l'EaPSM que pour l'OMOG. Le logiciel calcule la Sensibilité à la Dose au point de Best Focus pour chacune des courbes de Bossungs. De même la sensibilité à la dose est plus faible pour l'EaPSM que pour l'OMOG. Ceci dénote une certaine stabilité supplémentaire à une variation de process en ce qui concerne la dose d'exposition. Nous donnons dans le chapitre suivant les résultats obtenus pour le pas de réseau de 120nm.

#### b. Pas de réseau de 120nm

##### i. Courbes de Bossungs

Les Figure 66 et Figure 67 montrent les résultats obtenus pour le pas de réseau de 120nm sur les deux sites de mesures (sites 15 et 24). Pour le masque de type eaPSM il y a un écart de best focus entre les deux sites de 3nm. On retrouve une différence de 4nm pour le masque de type OMOG entre les deux sites. Ces écarts ne sont pas significatifs. Cependant on remarque que le Best Focus pour les structures sur le masque de type EaPSM pour le pas de réseau de 120nm sont très proches de ceux obtenus pour le pas de réseau de 90nm.

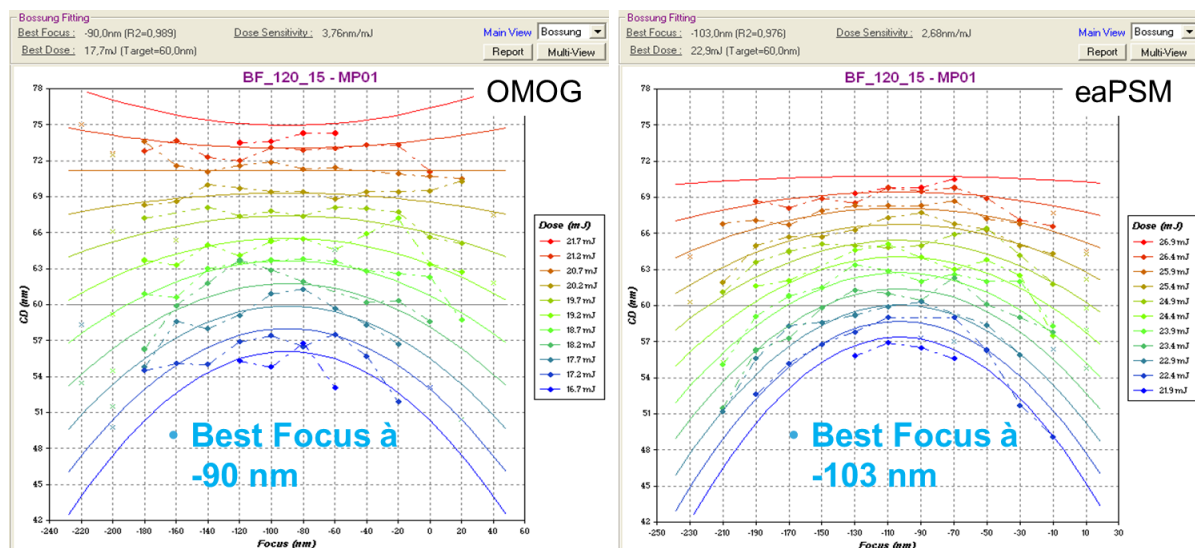


Figure 66 : Courbes de Bossungs obtenues pour le pas de réseau de 120nm sur le site 15. A droite les résultats pour le réticule de type eaPSM, le best focus est de -103nm. A gauche les résultats pour le réticule de type OMOG, le best focus est de -90nm.



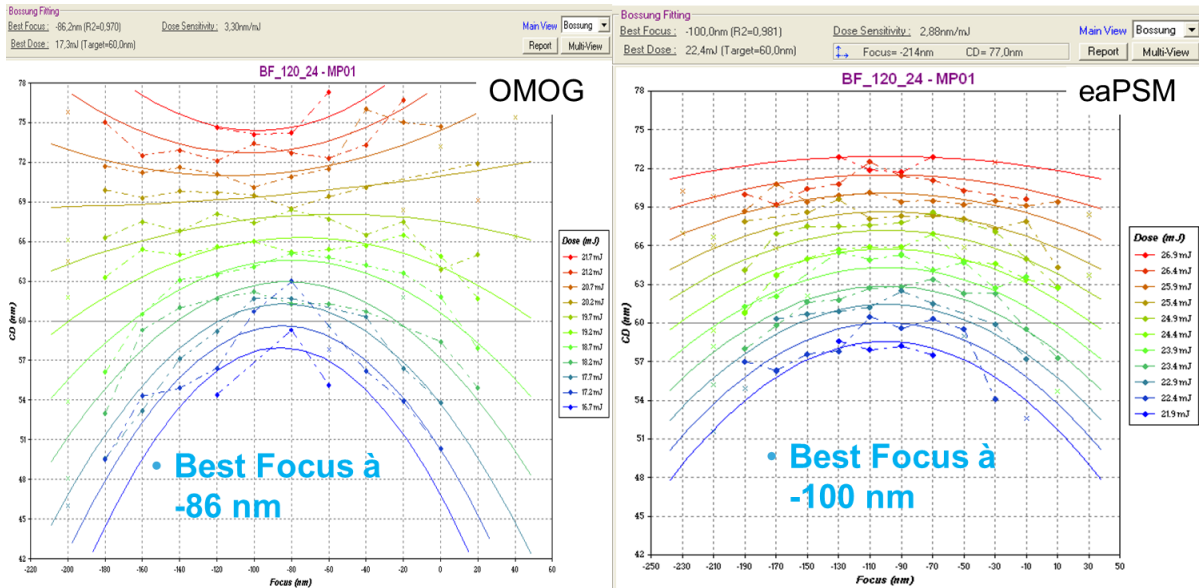


Figure 67 : Courbes de Bossungs obtenues pour le pas de réseau de 120nm sur le site 24. A droite les résultats pour le réticule de type eaPSM, le best focus est de -100nm. A gauche les résultats pour le réticule de type OMOG, le best focus est de -86nm.

## ii. Fenêtre de procédé

On retrouve Figure 68 et Figure 69 les tracés des courbes Iso-CD permettant de déterminer la Profondeur de champ DOF, et la latitude d'exposition EL pour chacun des deux sites de mesures et pour chacun des deux réticules.

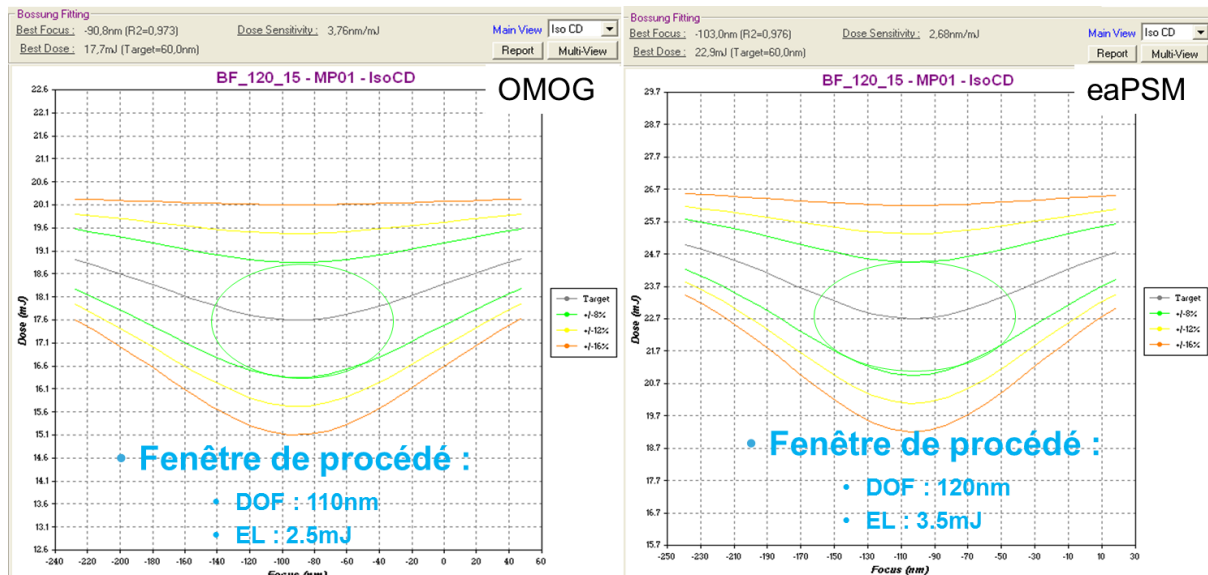


Figure 68 : Tracé de la fenêtre de procédé pour le pas de réseau de 120nm sur le site 15. A droite les résultats pour le réticule de type eaPSM, avec une DOF de 120nm et une EL de 3.5mJ. A gauche les résultats pour le réticule de type OMOG, avec une DOF de 110nm et une EL de 2.5mJ.

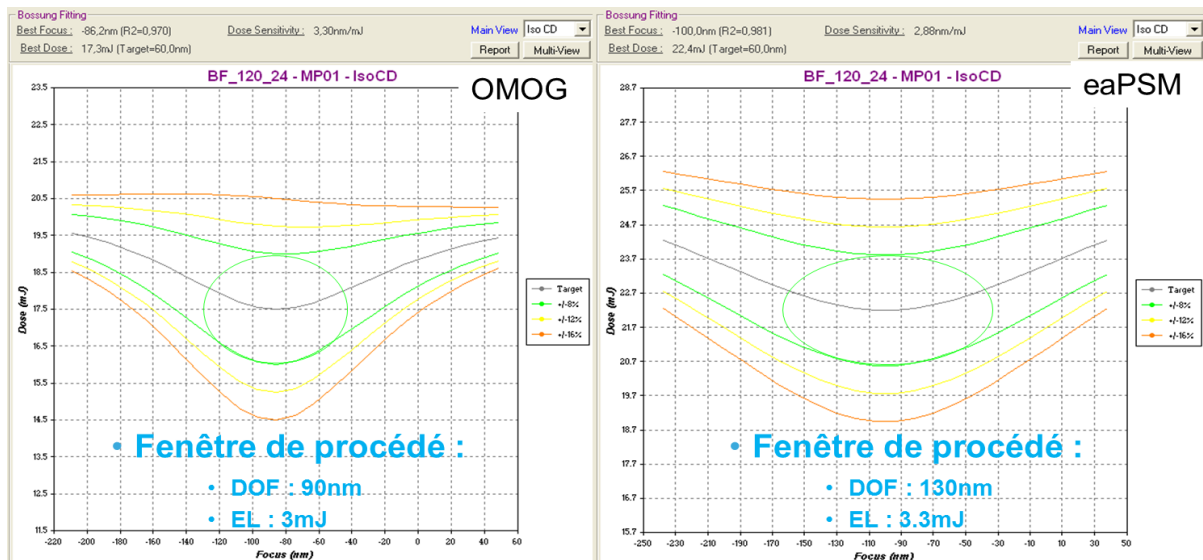


Figure 69 : Tracé de la fenêtre de procédé pour le pas de réseau de 120nm sur le site 24. A droite les résultats pour le réticule de type eaPSM, avec une DOF de 130nm et une EL de 3.3mJ. A gauche les résultats pour le réticule de type OMOG, avec une DOF de 90nm et une EL de 3mJ.

### iii. Conclusion

Pour le pas de réseau de 120nm on retrouve essentiellement les mêmes résultats que pour le pas de réseau de 90nm, une profondeur de champ plus étendue de 18% sur le premier site et de 44% sur le second, et ce pour l'EaPSM par rapport à l'OMOG. La latitude d'exposition est 40% plus large pour le premier site et 10% plus large pour le second. La différence de best focus entre les 2 localisations pour chaque plaque respective est négligeable. La sensibilité à la dose au point de best focus est plus faible pour l'EaPSM par rapport à l'OMOG. De même que pour le pas de réseau de 90nm, le lecteur est renvoyé à la partie C.III.1.d pour l'étude comparative sur la variation de Best Focus.

## c. Pas de réseau de 200nm

### i. Courbes de Bossungs

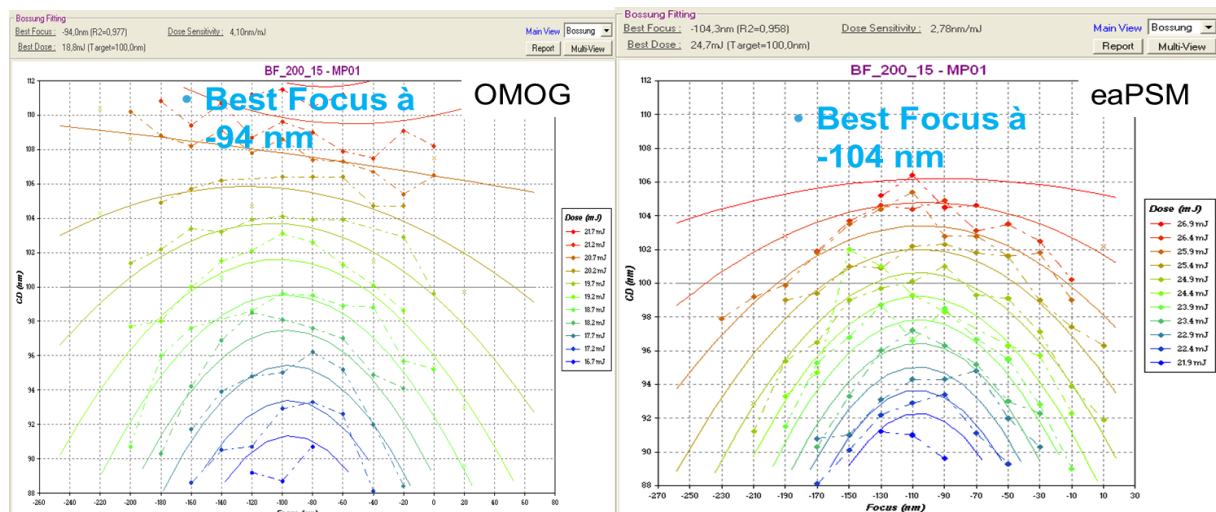


Figure 70 : Courbes de Bossungs obtenues pour le pas de réseau de 200nm sur le site 15. A droite les résultats pour le réticule de type eaPSM, le best focus est de -104nm. A gauche les résultats pour le réticule de type OMOG, le best focus est de -94nm.

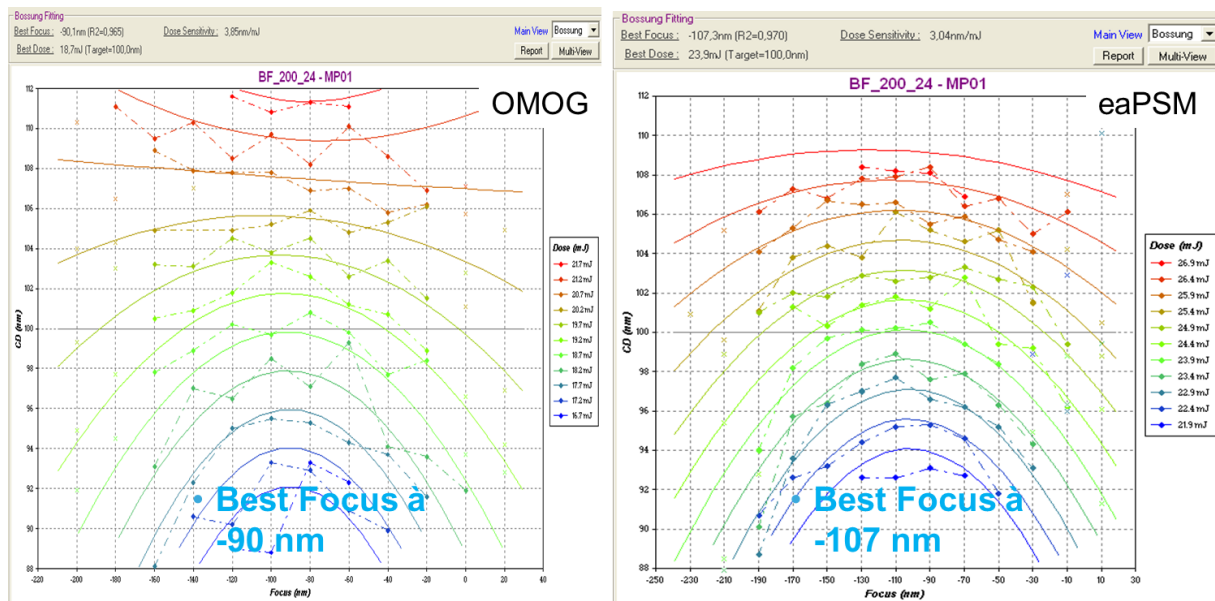


Figure 71 : Courbes de Bossungs obtenues pour le pas de réseau de 200nm sur le site 24. A droite les résultats pour le réticule de type eaPSM, le best focus est de -107nm. A gauche les résultats pour le réticule de type OMOG, le best focus est de -90nm.

Les Figure 70 et Figure 71 montrent les résultats obtenus pour le pas de réseau de 200nm sur les deux sites de mesures (sites 15 et 24). On retrouve pour le masque de type eaPSM un écart de best focus entre les deux sites de 3 nm, contre 4 nm pour le réticule de type OMOG. Ces écarts ne sont pas significatifs et on remarque que le Best Focus pour les structures sur le masque de type EaPSM pour les pas de réseau de 90nm et 120nm sont proches de ceux obtenus pour le pas de réseau de 200nm.

## ii. Fenêtre de procédé

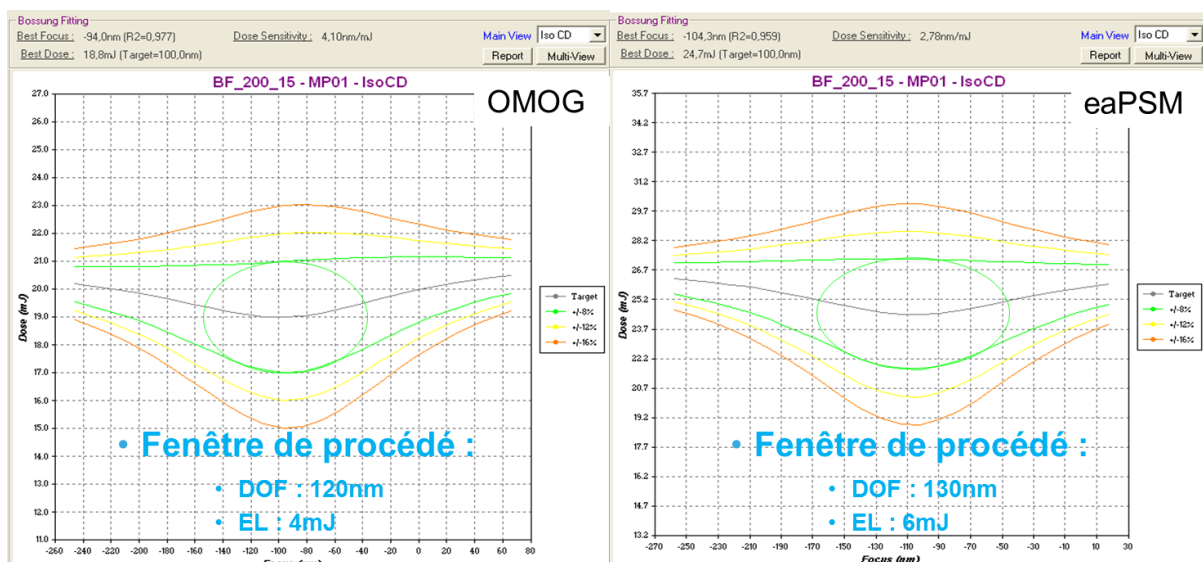


Figure 72 : Tracé de la fenêtre de procédé pour le pas de réseau de 200nm sur le site 15. A droite les résultats pour le réticule de type eaPSM, avec une DOF de 130nm et une EL de 6mJ. A gauche les résultats pour le réticule de type OMOG, avec une DOF de 120nm et une EL de 4mJ.

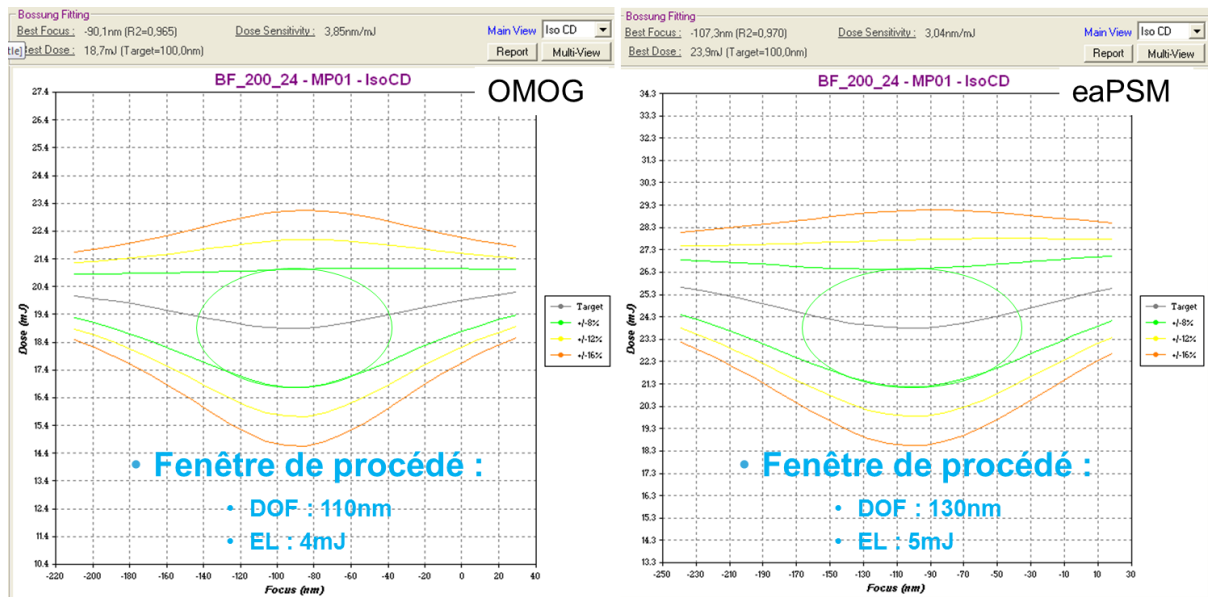


Figure 73 : Tracé de la fenêtre de procédé pour le pas de réseau de 200nm sur le site 24. A droite les résultats pour le réticule de type eaPSM, avec une DOF de 130nm et une EL de 5mJ. A gauche les résultats pour le réticule de type OMOG, avec une DOF de 110nm et une EL de 4mJ.

On retrouve Figure 72 et Figure 73 les tracés des courbes Iso-CD permettant de déterminer la Profondeur de champ et la latitude d'exposition pour chacun des deux sites de mesures et pour chacun des deux réticules.

### iii. Conclusion

Nous retrouvons ici encore pour le pas de réseau 200nm de meilleures performances pour l'EaPSM que pour l'OMOG :

- La profondeur de champ est 8% plus étendue sur le premier site de mesure et 18% sur le second
- La latitude d'exposition est 50% plus large sur le premier site de mesure et 25% sur le second

La différence de best focus entre les 2 localisations pour chaque plaque respective est négligeable et la sensibilité à la dose au point de best focus est plus faible pour l'EaPSM par rapport à l'OMOG.

### d. Conclusion pour les structures 1D

Pour nos trois structures 1D, le réticule de type EaPSM montre de meilleures performances que le réticule de type OMOG. La Table 3 et la Figure 74 résument les différents résultats obtenus dans les parties a, b et c.

	p200 15						p120 15						p90 15					
	Fenêtre de procédé						Fenêtre de procédé						Fenêtre de procédé					
	BF* (in nm)	DOF* in nm	EL* in mJ	Center Focus (nm)	Center dose (mJ)	DS* (nm/mJ)	BF* (in nm)	DOF* in nm	EL* in mJ	Center Focus (nm)	Center dose (mJ)	DS* nm/mJ	BF* (in nm)	DOF* in nm	EL* in mJ	Center Focus (nm)	Center dose (mJ)	DS* nm/mJ
OMOG	-94	120	4	-94	18,8	4,1	-91	110	2,5	-91	17,7	3,76	-104	110	2,3	-104	17,6	3,11
PSM	-104	125	6	-104	24,7	2,78	-103	130	3,5	-103	22,9	2,68	-102	140	2,7	-102	23,7	2,73

	p200 24						p120 24						p90 24					
	Fenêtre de procédé						Fenêtre de procédé						Fenêtre de procédé					
	BF* (in nm)	DOF* in nm	EL* in mJ	Center Focus (nm)	Center dose (mJ)	DS* (nm/mJ)	BF* (in nm)	DOF* in nm	EL* in mJ	Center Focus (nm)	Center dose (mJ)	DS* nm/mJ	BF* (in nm)	DOF* in nm	EL* in mJ	Center Focus (nm)	Center dose (mJ)	DS* nm/mJ
OMOG	-90	110	4	-91	18,8	3,85	-86	90	3	-91	17,7	3,30	-90	110	2,2	-104	17,6	3,33
PSM	-107	130	5	-104	24,7	3,04	-100	130	3,3	-103	22,9	2,88	-103	130	2,5	-102	23,7	2,51

\*BF : Best Focus | \*DOF : Profondeur de champ | \*EL : Latitude d'exposition | \*DS : Sensibilité à la dose au best focus

Table 3 : Résumé des résultats plaquette obtenus pour les structures 1D pour chacun des deux réticules en termes de Best Focus et de fenêtre de procédé.

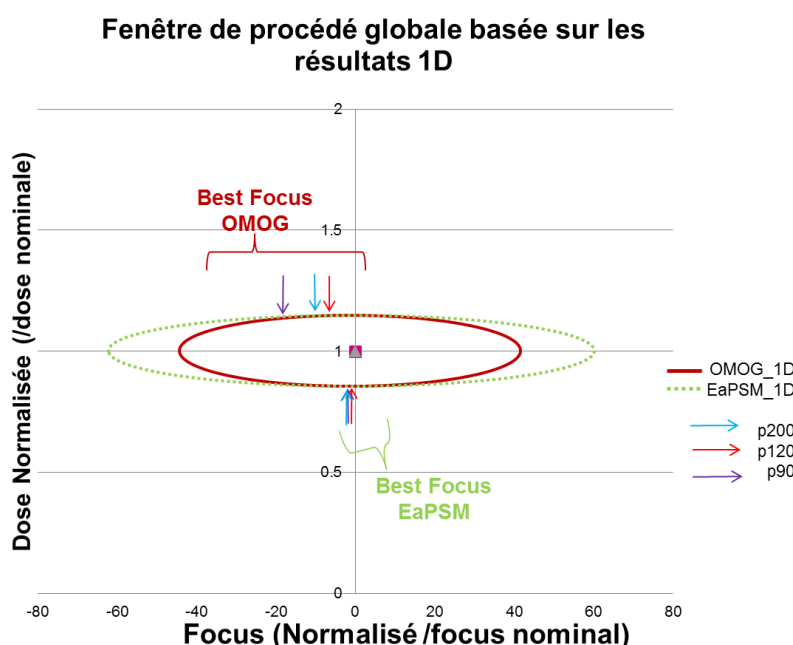


Figure 74 : Comparaison graphique des fenêtres de procédé globales des structures 1D entre le réticule de type EaPSM et le réticule de type OMOG

La fenêtre de procédé globale calculée pour chacun des deux types de réticules englobe les résultats trouvés pour chacune des 6 structures. On retrouve la même latitude d'exposition pour les 2 mais la profondeur de champ est 36% plus étendue pour le EaPSM par rapport au réticule de type OMOG (123nm pour le EaPSM contre 90nm pour l'OMOG). Concernant les Best Focus pour chacun des pas de réseau, on remarque que la dispersion est plus faible pour le réticule de type EaPSM. On retrouve un écart maximum de 7nm pour l'EaPSM contre 18nm pour l'OMOG. Bien que plus élevé cet écart n'est pas vraiment problématique pour le réticule de type OMOG car chacun des Best Focus est inclus dans la fenêtre de procédé. Nous retiendrons que la stabilité en terme de variation de Best Focus est meilleure pour le réticule de type EaPSM. Nous allons évaluer dans la partie suivante le comportement pour les structures 2D.



## 2. Structures 2D

Les structures 2D identifiées proviennent de retour d'expérience et d'analyse de risque. Ce sont en réalité ce que nous appelons des "hotspots" (=configuration critique de l'anglais certes, que nous pourrions traduire par points chauds ou points sensibles mais cela perdrait de son sens), c'est à dire des configurations particulièrement sensibles en process car potentiellement sources de dysfonctionnement de la puce finale (test de fiabilité).

### a. Les Courbes de Bossungs et le best focus pour les structures 2D

Le Best Focus est calculé à partir des courbes de Bossungs. Jusqu'ici les points d'inflexion de chaque courbe  $CD=f(\text{Focus})$  pour les différentes doses d'exposition utilisées étaient quasi-identiques. Or les structures 2D ont un comportement différent des structures 1D comme on peut le voir pour l'exemple Figure 75.

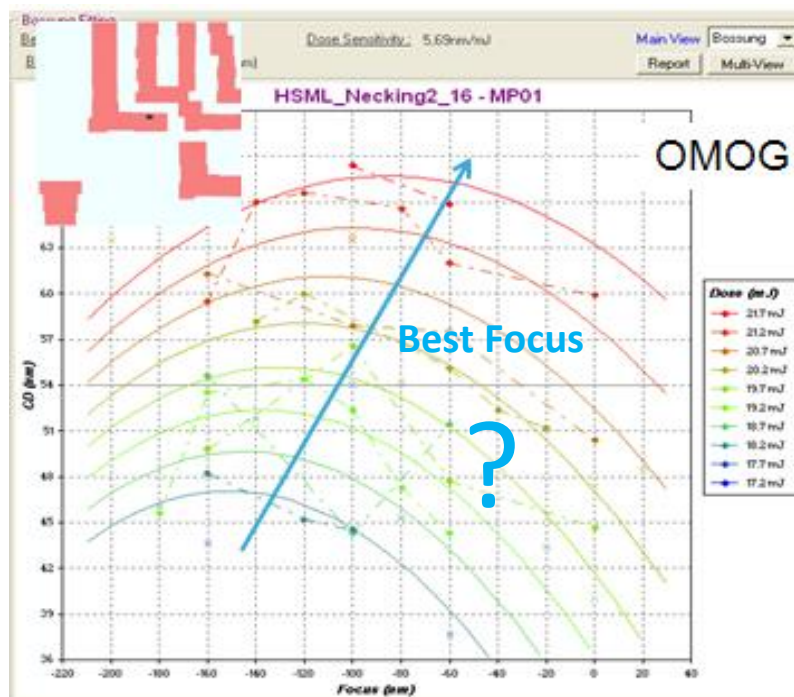


Figure 75 : Exemple de courbe de Bossungs présentant une variation de point d'inflexion en fonction de la dose d'exposition

L'effet est plus ou moins prononcé selon les points de mesures mais il n'est pas possible de déterminer un Best Focus à partir des courbes de Bossungs. Ce phénomène est connu dans la littérature sous l'appellation *Bossung Tilt* [36]. Une nouvelle technique de détermination est nécessaire pour que nous puissions statuer sur l'apport réel de ce changement de réticule. En effet, il ne nous sera pas possible de valider l'apport de ce nouveau réticule en se basant uniquement sur l'étude 1D et les simulations. Dans le prochain chapitre nous commencerons par apporter une explication permettant de comprendre ce phénomène. Nous proposerons une approche qui permettra de s'affranchir du Bossung tilt pour déterminer le Best Focus pour nos structures 2D.

### b. Le Bossung tilt ou la dépendance du best focus à la dose

Dans cette partie nous allons tenter d'apporter une explication au Bossung tilt. Nous avons vu en introduction que le réticule et le scanner provoquaient une déformation du front d'onde. Notre onde de départ comporte des composantes électriques et magnétiques. L'intensité et la phase récupérées en sortie de notre système permettent de reconstituer l'image de notre réticule. En faisant un peu l'analogie avec le domaine du traitement de l'image, nous savons que l'équation de transfert de l'intensité, plus connue sous son acronyme anglais TIE pour Transport Intensity Equation, permet de mettre en évidence la relation qui lie l'intensité à la phase en sortie du système optique de projection. En effet l'intensité comporte des informations sur l'atténuation de la lumière à travers le réticule, tandis que la phase transporte des informations au sujet de la longueur du trajet optique et des objets qui en déforme le front d'onde. Nous considérerons la propagation selon l'axe optique  $z$  d'un faisceau cohérent et monochromatique dans le cadre de l'approximation paraxiale. L'approximation paraxiale consiste à considérer que le champ s'est propagé suivant une direction privilégiée (l'axe optique  $z$  dans notre cas) et que l'observation s'effectue sur un point proche de cet axe. On peut représenter ce champ  $E$  par :

$$E(x, z) = E_{parax}(x, z) \exp(ikz) \quad \text{Equation 24}$$

Avec 
$$E_{parax}(x, z) = \sqrt{I(x, z)} \exp(i\phi(x, z)) \quad \text{Equation 25}$$

Où  $x$  représente la position transversale à l'axe optique  $z$ ,  $I$  et  $\phi$  représente respectivement l'intensité et la phase. La physique de la propagation des ondes dans l'approximation paraxiale est décrite par :

$$\frac{d}{dz} E_{parax}(x, z) = \frac{i}{2k} \nabla_x^2 E_{parax}(x, z) \quad \text{Equation 26}$$

Où  $\nabla_x^2$  représente le Laplacien selon  $x$ .

En appliquant l'équation 26 à la 24, il en résulte l'équation de transport de l'intensité :

$$\frac{d}{dz} I(x, z) + \nabla_x \cdot \left[ I(x, z) \frac{\nabla_x \phi(x, z)}{k} \right] = 0 \quad \text{Equation 27}$$

Avec  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  il vient :

$$\frac{d}{dz} I(x, z) = -\frac{\lambda}{2\pi} \nabla_x \cdot [I(x, z) \nabla_x \phi(x, z)] \quad \text{Equation 28}$$

En multipliant le terme de gauche par  $dx/dx$  et en développant l'opérateur Laplacien selon  $x$  à droite il vient :

$$\frac{dI(x, z)}{dx} \frac{dx}{dz} = -\frac{\lambda}{2\pi} \left[ \frac{dI(x, z)}{dx} \cdot \frac{d\phi(x, z)}{dx} - I(x, z) \frac{d^2\phi(x, z)}{dx^2} \right] \quad \text{Equation 29}$$

Le Bossungs tilt (CD vs. focus) peut être relié à la phase du champ électrique au point de focus par l'équation 1D du TIE, étant donné que le CD est défini pour une variation de dimension selon une direction. Une variation d'intensité de l'image aérienne dans l'axe des  $x$  (à seuil fixe) dans un plan focale  $z$  fixe de l'axe optique, correspond à une variation de CD. D'où la relation :

$$\frac{dCD}{dz} = 2 \frac{dx}{dz} \quad \text{Equation 30}$$

L'équation 29 peut alors s'écrire :

$$\frac{dI(x, z)}{dx} \frac{dCD}{dz} = -\frac{\lambda}{\pi} \left[ \frac{dI(x, z)}{dx} \cdot \frac{d\phi(x, z)}{dx} - I(x, z) \frac{d^2\phi(x, z)}{dx^2} \right] \quad \text{Equation 31}$$

On peut alors réécrire l'équation comme :

$$\frac{dCD}{dz} = -\frac{\lambda}{\pi} \left[ \frac{d\phi(x, z)}{dx} - \frac{I(x, z) dx}{dI(x, z)} \frac{d^2\phi(x, z)}{dx^2} \right]$$

On reconnaît ici le ILS que nous avons défini au chapitre A.II.7. D'où :

$$\frac{dCD}{dz} = -\frac{\lambda}{\pi} \left[ \frac{d\phi(x, z)}{dx} - \frac{1}{ILS} \frac{d^2\phi(x, z)}{dx^2} \right] \quad \text{Equation 32}$$

L'équation 32, autrement nommé CD-TIE par [37] permet de relier le bossung tilt proche du meilleur plan focal à la phase et l'intensité. Il est alors possible de quantifier le tilt des Bossung en nm par unité de focus. Cependant dans le cadre de notre exercice expérimental il n'est pas possible de mesurer directement le déphasage en sortie du réticule dans notre système de projection optique. En revanche des données de phase issues d'un AIMS (Aerial Imaging and Measurement System tool) peuvent permettre de prédire ce phénomène de Bossung Tilt, et donc de connaître en avance de phase les effets du réticule sur la perte de Fenêtre de procédé lors de l'étape d'exposition. Nous n'avons pas eu accès à ce genre d'équipements et nous proposons donc dans la partie suivante une nouvelle méthodologie d'exploitation des résultats sur plaquette pour contourner ce phénomène de Bossung Tilt.

### 3. Mise à jour de la méthodologie d'exploitation des résultats sur plaquette

Pour une structure donnée, nous avons vu que le best focus déterminé à partir des courbes de Bossungs correspond au point d'inflexion de chacune des courbes CD=f(focus) tracé pour les différents niveaux de dose. Lorsque l'on n'a pas de Bossung tilt ou lorsque celui-ci est faible (comme cela été le cas pour nos structures 1D), ces points d'inflexions correspondent au point où la sensibilité à la dose est minimale. Le point où la dose est nominale est également le point où les profils des motifs dans la résine seront le plus proche de 90°. On peut donc déterminer le Best Focus d'une structure projetée avec notre système d'exposition en utilisant les courbes de Bossungs, la sensibilité à la dose ou en faisant des coupes pour observer les profils. La mise en place de coupe pour l'observation des profils est à la fois une mesure destructive et chronophage, sans compter que l'obtention de coupe précise pour l'observation de profils est un métier à part entière. Nous travaillerons sur la sensibilité des structures à la dose. Nous compléterons l'étude basée sur la sensibilité à la dose par l'observation des images obtenues pour nos structures 2D via le MEB.

#### a. La sensibilité à la dose

Nous travaillerons dans cette partie à partir des mêmes résultats de mesures que précédemment. La mise en place de cette nouvelle méthodologie s'est faite de manière progressive. Le point de focus où la sensibilité de la dose est minimale correspond au best focus. La valeur de la sensibilité à la dose est obtenue en faisant une régression linéaire sur la courbe de variation de CD en fonction de la dose, puis en calculant la pente de cette droite, et



ce pour chaque point de focus. La courbe de variation de la sensibilité à la dose en fonction du focus est ensuite tracée. Le best focus correspondra au point d'inflexion de la courbe dans la plage de focus étudiée. Les données à traiter étant nombreuses, nous mettrons en place un script Matlab qui nous permettra d'automatiser le traitement de ces données. Nous verrons dans cette partie la mise en place des différents critères qui nous ont permis d'obtenir les paramètres à implémenter dans le script via différents exemples de structures. Pour le réglage des différents paramètres nous commencerons le débogage sur les structures 1D.

#### i. Tracé des courbes de variation de CD en fonction de la dose

Pour chaque niveau de focus on trace la courbe de variation de CD en fonction de la dose. Un exemple est donnée Figure 76 pour le pas de réseau de 200nm avec le réticule de type OMOG et pour un focus de -100nm.

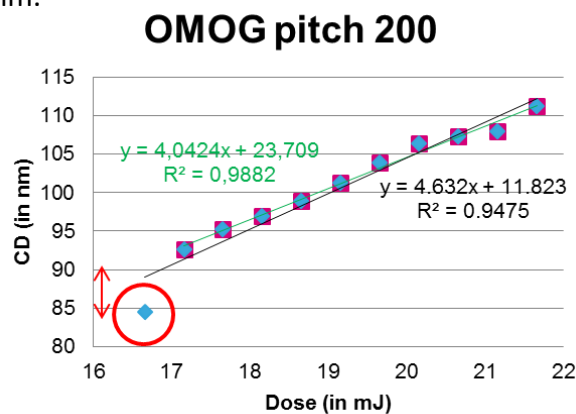


Figure 76 : Courbe de variation de CD en fonction de la dose pour une structure 1D de pas de réseau 200nm pour un réticule de type OMOG

La sensibilité à la dose est ensuite extraite en faisant une régression linéaire, telle que :

$$CD = \hat{a} \cdot Dose + b \text{ où } \hat{a} \text{ est un estimateur de la sensibilité à la dose.}$$

L'utilisation d'une régression linéaire suppose que le CD obtenu dans la résine varie de façon linéaire par rapport à la dose. Nous devons d'abord vérifier cette hypothèse. Lors de la qualification d'une résine, la variation de CD en fonction de la dose est un élément important que l'on contrôle. Il apparaît que la sensibilité à la dose dépend de la température de recuit utilisée après étalement de la résine, visible Figure 77.

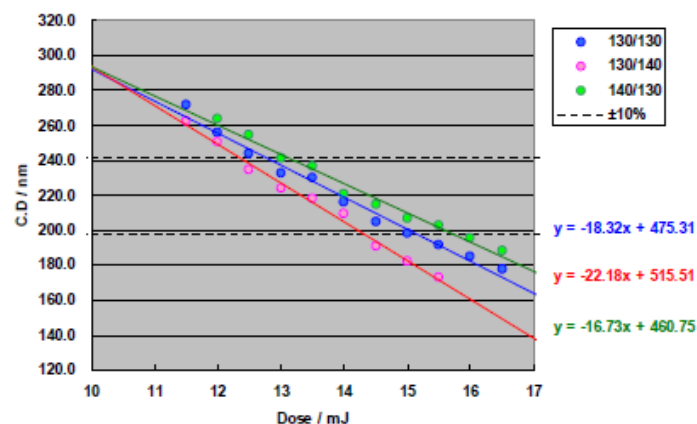


Figure 77 : Variation de la sensibilité à la dose en fonction de la dose d'exposition pour trois procédés de recuit de résine.

Selon que l'on utilise une structure dense ou isolée, le comportement de la résine est différent comme on peut le voir Figure 78. Il en est de même si on compare les courbes de variations obtenues pour une ligne ou une tranchée. Enfin la sensibilité à la dose dépend également de la taille du motif sur réticule. La Figure 79 montre les résultats pour la résine que nous avons utilisée lorsque la température de recuit post étalement change en fonction du biais sur réticule introduit.

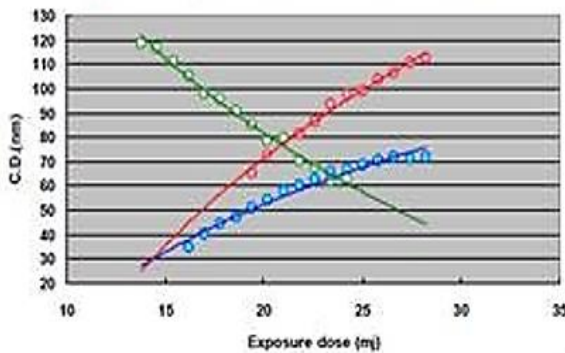


Figure 78 : Variation de CD en fonction de la dose pour une ligne isolée en rouge, une ligne dense ou une tranchée isolée.

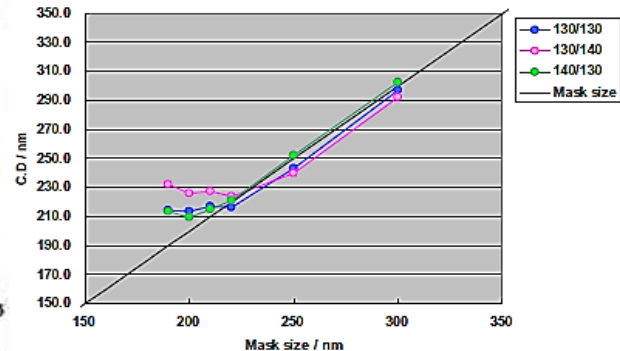


Figure 79 : Variation de CD plaquette en fonction du biais introduit sur réticule pour la résine utilisée pour le niveau METAL28nm.

Les fournisseurs de résines utilisent également une régression linéaire pour modéliser le comportement de leur résine et ne garantissent le bon fonctionnement de leurs résines que sur la plage de fonctionnement linéaire.

## ii. Filtrage des données

Les données que nous utilisons proviennent de mesures faites sur plaquettes et comportent forcément du bruit amenés par la technique de mesure (MEB). Ce bruit est d'autant plus important lorsque l'on regarde des structures à 2 dimensions. La première étape du filtrage consiste à retirer les points éloignés de la distribution. En reprenant l'exemple de la Figure 80 (OMOG\_200), nous pouvons voir clairement que le point à 16,9mJ est atypique par rapport au reste de la distribution. Ce point est retiré de la distribution comme tous les points dont l'écart sera supérieur à trois fois l'écart type.

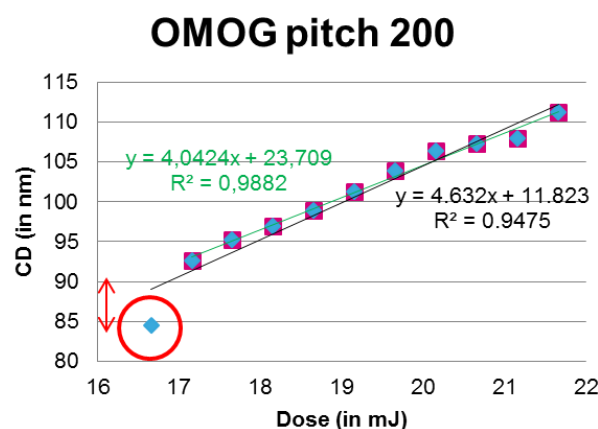


Figure 80 : Illustration d'un point atypique sur la courbe de variation du CD en fonction de la dose d'exposition pour une structure 1D de type L&S de pas de réseau 200nm avec un réticule de type OMOG.

En comparant les valeurs de pente calculées à partir de l'échantillon avec et sans ce point atypique, on remarque une variation de plus de 14%.

Pour certains focus, le nombre de points sur la courbe est faible. La question se pose alors pour savoir à partir de combien de points peut-on considérer comme valide la sensibilité à la dose calculée. On sait d'un point de vue statistique qu'une régression sur un échantillon dont la population est inférieure à 5 peut être erronée. Nous placerons donc un critère sur la quantité de points présents pour chaque focus. Si le nombre de motifs mesurés est inférieur à 5, nous écarterons ce point de sensibilité à la dose de notre calcul de best focus. De même si le coefficient de corrélation est inférieur à 0,9 nous écarterons le point de notre étude. Un exemple est présenté Figure 81 pour la structure 1D du EaPSM avec le pas de réseau de 90nm, obtenu avec un focus éloigné du focus nominal.

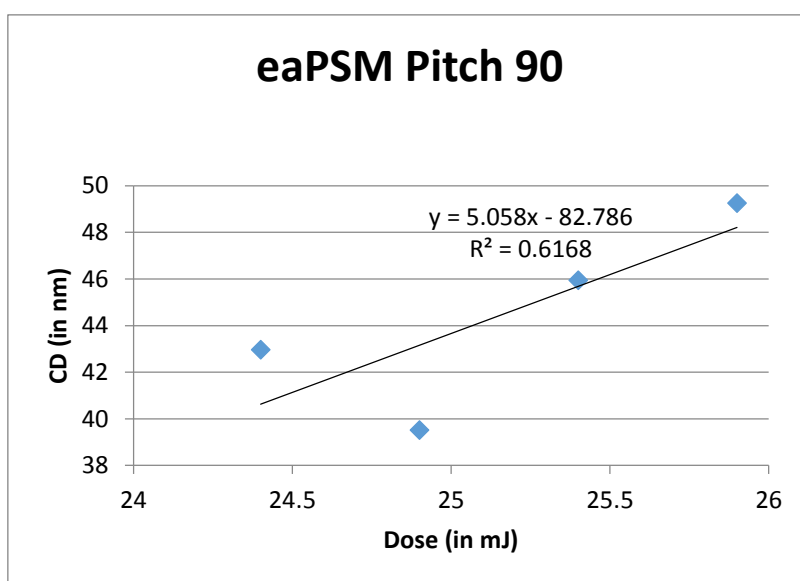


Figure 81 : Exemple de configuration pour laquelle la valeur de sensibilité à la dose ne sera pas prise en compte.

Ces trois premiers filtres permettent d'obtenir un lot de mesures fiable pour la détermination du best focus.

Un dernier filtre basé sur la largeur de l'intervalle de confiance de la droite de régression permet de tenir compte du risque pris en assimilant la variation de CD comme linéaire par rapport à la dose appliquée. Nous donnons la méthode utilisée dans le prochain chapitre.

### iii. Mise en place d'un intervalle de confiance

L'intervalle de confiance que nous allons utiliser est symétrique.

En effet le coefficient directeur de la droite que l'on obtient est en réalité un estimateur statistique dont la précision dépend de la taille et de l'écart type de l'échantillon. Cet intervalle de confiance est donc calculé avec un seuil  $\alpha$  de 5%. Cette valeur de seuil traduit le fait que l'on veuille que notre modèle explique au moins 95% des variations de notre échantillon. L'intervalle de confiance  $Ic$  est obtenu par :

$$Ic(\alpha) = [\hat{a} - t\alpha_{(n-2)}\sqrt{S^2}; \hat{a} + t\alpha_{(n-2)}\sqrt{S^2}] \quad \text{Equation 33}$$

Avec :

-  $\hat{a}$  : la pente estimée de la droite via la régression linéaire

-  $t_{\alpha(n-2)}$  : la valeur donnée par la table de la loi de Student pour  $\alpha=5\%$  et  $n-2$  degrés de liberté,  $n$  étant la taille de l'échantillon, c'est-à-dire le nombre de points ayant servi pour la régression linéaire.

-  $S$  étant la variance de  $\hat{a}$  défini par 
$$S = \frac{\sum_{i=1}^n (CD_{mesuré_i} - CD_{model_i})^2}{(n-2) \sum_{i=1}^n (Dose_i - \overline{Dose})^2} \quad \text{Equation 34}$$

Où : -  $CD_{mesuré_i}$  est le CD mesuré sur plaquette pour le  $i^{ème}$  champ.

-  $CD_{model_i}$  est le CD calculé à partir de l'équation de la droite de régression liée à chaque pas de focus pour le  $i^{ème}$  champ.

-  $Dose_i$  est la dose d'exposition utilisée pour le  $i^{ème}$  champ

-  $\overline{Dose}$  est la dose moyenne calculée pour chaque pas de focus.

Concernant le quatrième filtre mis en place pour l'obtention de notre courbe de variation de sensibilité à la dose en fonction du focus, nous choisirons d'écarter les points dont l'intervalle de confiance dépasse 25% de la valeur absolue comme on peut le voir Figure 82.

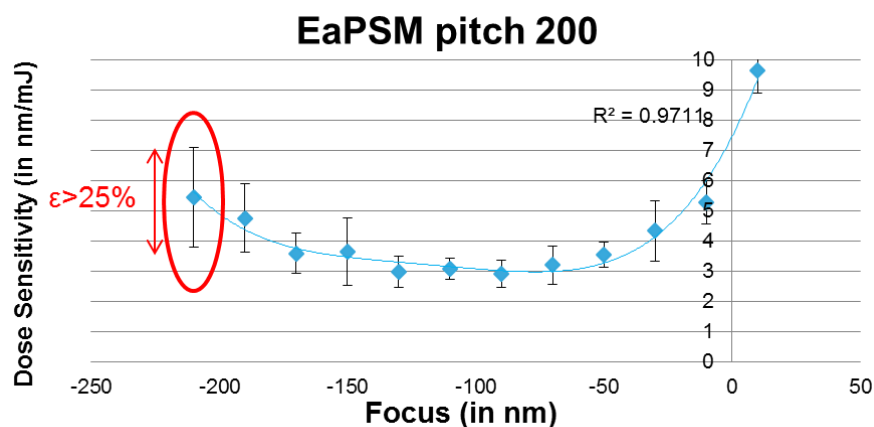
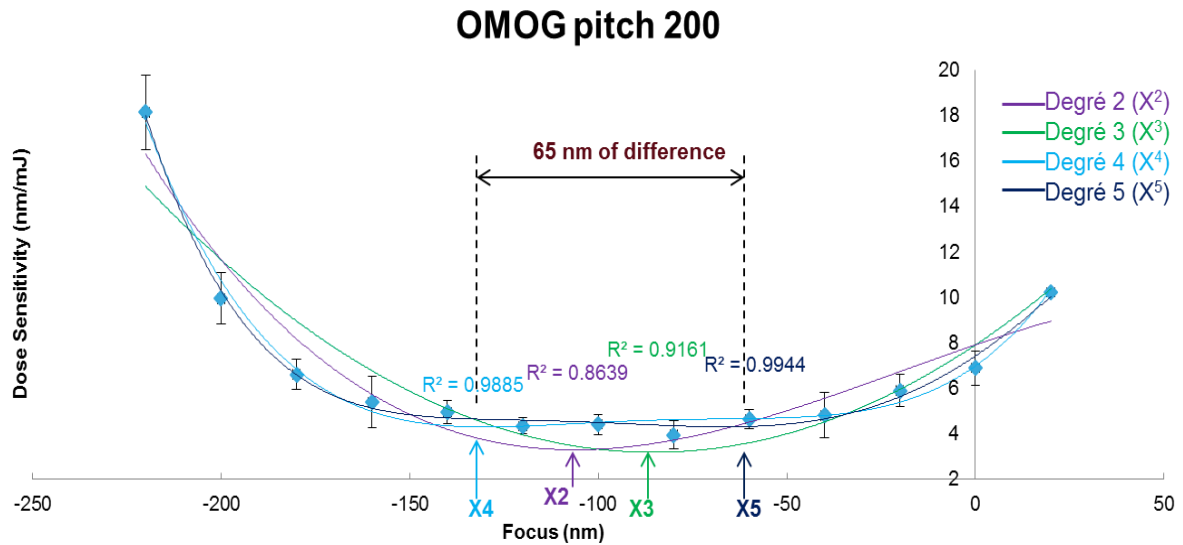


Figure 82 : Exemple de configuration où le point de sensibilité à la dose n'est pas pris en compte dû à un intervalle de confiance inadéquat.

Dans le prochain chapitre nous aborderons la stratégie mise en place pour la détermination du Best Focus.

#### iv. Tracé de la courbe de variation de la sensibilité à la dose en fonction du focus

A ce stade nous avons la courbe de variation de la sensibilité à la dose en fonction du focus. Le Best Focus est obtenu au point d'inflexion de la courbe de régression polynomiale obtenue. Hors on peut voir sur l'exemple donné Figure 83 que selon le degré du polynôme utilisé pour réaliser la régression polynomiale, le point d'inflexion ne sera pas le même. La variation de la position du point d'inflexion pour notre exemple d'illustration est telle que la variation du best focus est de plus de 65nm. De plus cette variation est différente d'une structure à l'autre.



*Figure 83 : Superposition de courbe de régression polynomiale pour la détermination du Best Focus. Exemple donné pour une structure 1D de type L&S de pas de réseau 200nm pour le réticule de type OMOG.*

Au vu des filtres mis en place pour la détermination de la sensibilité à la dose, nous pouvons être confiants sur la qualité finale des points utilisés pour le tracé en fonction du focus. En revanche on voit bien qu'il faut mettre en place une stratégie pour le choix du degré du polynôme utilisé pour la régression. Nous avons calculé les intervalles de confiance pour chacune des sensibilités à la dose que nous avons retenues. Le degré du polynôme que l'on retiendra pour notre régression polynomiale sera le premier polynôme dont la courbe passe par tous les intervalles de confiances. Autrement dit, la bonne courbe sera celle qui prend en compte le fait que l'on veuille que chaque valeur de sensibilité à la dose explique au moins 95% des variations de la régression linéaire.

#### v. Récapitulatif de la méthodologie appliquée

Le Table 4 résume la méthodologie mise en place pour chacune des structures mesurées sur plaquette.

A. Obtenir la sensibilité à la dose	
1	Tracer la droite variation de CD en fonction de la dose pour chaque pas de focus
2	Retirer les points atypique, c'est-à-dire ceux dont l'écart à la droite est supérieur à 3 fois l'écart type
3	Ne pas prendre en compte les sensibilité à la dose si le nombre de point utilisé est inférieur à 5
4	Ne pas prendre en compte les sensibilité à la dose si le coefficient de corrélation est inférieur à 0.9.
5	Au seuil $\alpha = 5\%$ , ne pas prendre en compte les sensibilité à la dose si l'intervalle de confiance est supérieur à 25% de la valeur de sensibilité à la dose estimée.
B. Obtenir le Best Focus	
1	Tracer la courbe de variation de la sensibilité à la dose en fonction du focus en incluant les intervalles de confiances.
2	Choisir le degré du polynôme utilisé pour la régression de telle sorte à ce qu'elle passe par tous les intervalles de confiances
3	Calculer le point d'inflexion de chaque courbe, qui permettra de trouver la valeur du Best Focus.

*Table 4 : Description de la méthodologie de filtrage et de détermination du Best Focus basée sur la variation de la sensibilité à la dose en fonction du Focus.*

#### vi. Résultats

Plusieurs FEM ont été utilisés pour tester la stabilité et le débuge de nos scripts Matlab. A titre indicatif, le temps d'obtention des résultats en utilisant le script est de cinq minutes contre une semaine avec l'utilisation de feuille de calcul Excel.

La Table 5 et l'histogramme Figure 84 regroupent les résultats obtenus avec nos structures 2D et 1D pour les deux types de réticules, permettant de vérifier que les résultats sont comparables à ceux obtenus via la méthodologie standard. En effet, le Bossung tilt étant plus faible pour les structures 1D que 2D, les valeurs seront certainement différentes mais la tendance doit être la même.

	EaPSM					OMOG				
	p120	p200	p90	Golden_Hotspot	Neck	p120	p200	p90	Golden_Hotspot	Neck
Best Focus (en nm)	-100.29	-113.61	-106.58	-113.28	-116.63	-87.01	-85.86	-96.57	-111.23	-136.20
Delta Best Focus /p90	6.29	-7.03	0.00	-6.70	-10.05	9.55	10.71	0.00	-14.67	-39.63

*Table 5 : Best Focus obtenus pour les structures 1D et 2D pour chacun des deux réticules à partir de la nouvelle méthodologie mise en place basée sur la variation de la sensibilité de la dose en fonction du Focus.*

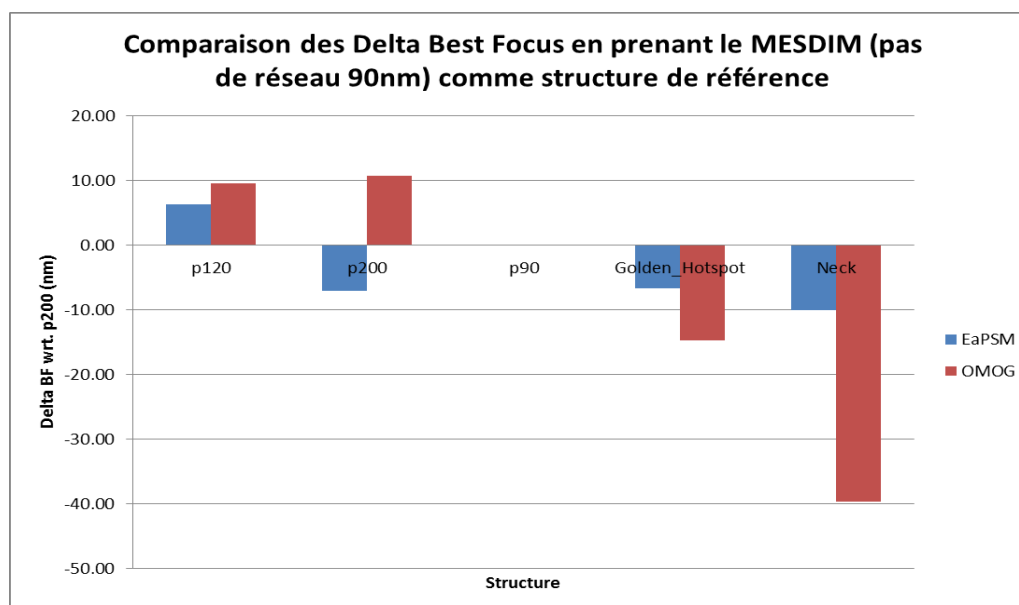


Figure 84 : Histogramme représentant l'écart de Best Focus (i.e. Best Focus Shift) par rapport à la structure 1D de type L&S de pas de réseau de 90nm

La nouvelle méthodologie appliquée aux structures 1D respecte la tendance observée dans la partie B.III.1.d, comme résumé Table 6.

	EaPSM		OMOG	
	Méthodologie Classique	Nouvelle Méthodologie	Méthodologie Classique	Nouvelle Méthodologie
$\Delta$ Best Focus	7nm	7nm	18nm	10.7nm

Table 6 : Comparaison du Best Focus Shift obtenu avec la méthodologie classique et la nouvelle méthodologie pour les structures 1D.

Cependant l'écart n'est pas aussi prononcé avec la nouvelle méthodologie par rapport à la méthodologie classique. Pour le réticule de type EaPSM, on retrouve le même écart de 7nm environ entre les différents Best Focus 1D. Avec le réticule de type OMOG on obtient environ 11nm avec la nouvelle méthodologie alors que l'on avait 18nm en appliquant la méthodologie classique. Que ce soit avec la méthodologie classique ou avec la nouvelle méthodologie et en observant seulement les structures 1D, ces résultats ne montrent pas d'amélioration significative du EaPSM par rapport à l'OMOG.

En utilisant la sensibilité à la dose pour déterminer le Best Focus de nos structures 2D, et en considérant que la structure 1D ayant un pas de réseau de 90nm est la structure de référence, il en ressort que le réticule de type EaPSM présente une plage de Best Focus de 16nm environ, alors que pour le réticule de type OMOG, cette plage est d'environ 50nm. Ces résultats nous permettent donc de dire que le réticule de type EaPSM est clairement plus performant que le réticule de type OMOG et qu'il permet de répondre à notre première problématique (c.f. partie C.I.), à savoir réduire les écarts de focalisation sur plaquette entre les différentes structures embarquées sur le niveau Métal<sub>1</sub> de la technologie "CMOS 28nm".

Pour nous conforter dans les conclusions que nous avons émises concernant les structures 2D, nous allons examiner les images des structures 2D en termes de criticité dans la partie

suivante. En effet, les structures 2D que nous avons choisies d'étudier sont des "Hotspots" et il serait incorrect de parler de fenêtre de procédé pour des hotspots. L'étude présentée dans la partie suivante nous permettra ainsi de répondre à notre seconde problématique.

#### b. La criticité des hotspots 2D et validation de l'apport du EaPSM par rapport à L'OMOG

Dans un premier temps nous avons calculé les profondeurs de champs de nos structures 1D et il est difficile de parler de fenêtre de procédé pour des hotspots. Nous allons donc mettre en perspective les fenêtres de procédé obtenues via l'étude 1D avec la cartographie des images 2D obtenues avec le MEB. Un schéma d'illustration est proposé Figure 85. Il sera alors possible d'observer le comportement des structures 2D dans une fenêtre de procédé où les structures 1D sont correctes en termes de spécificités.

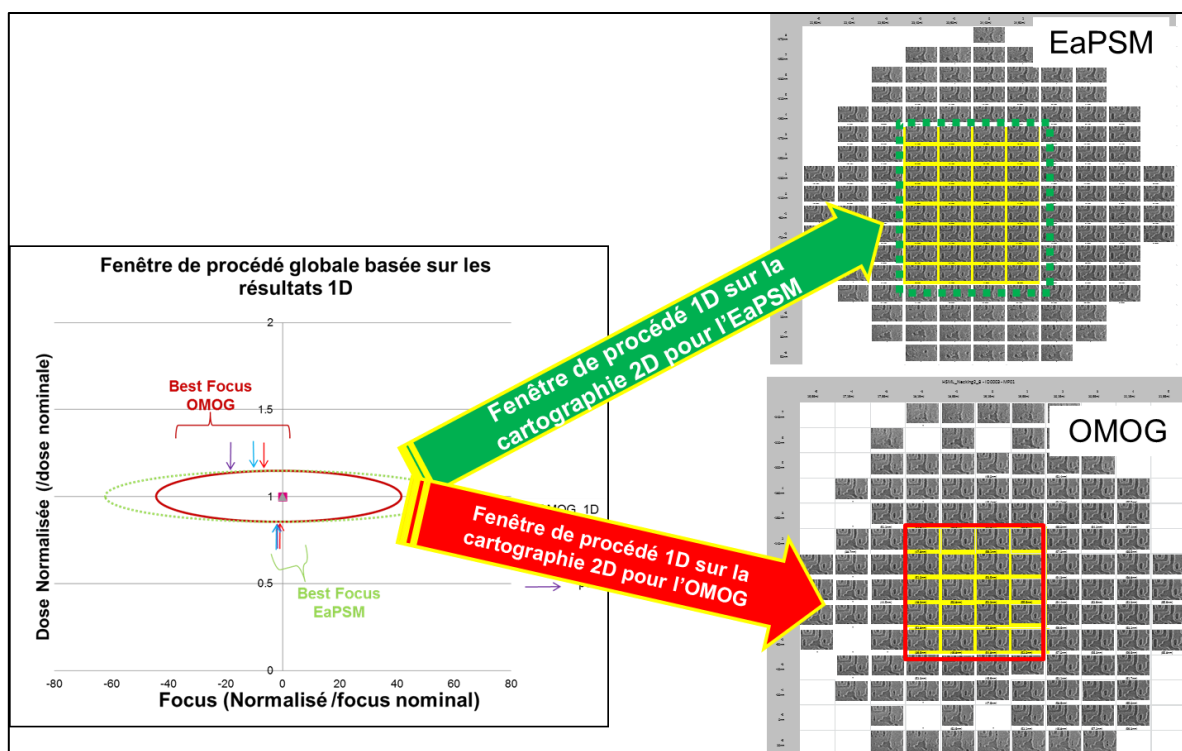


Figure 85 : Représentation de la mise en perspective des fenêtres de procédé obtenues via l'étude 1D avec la cartographie des images 2D obtenues avec le MEB

Les figures qui suivent présentent les résultats comparatifs obtenus pour chacune des trois structures 2D que nous avons identifiées.



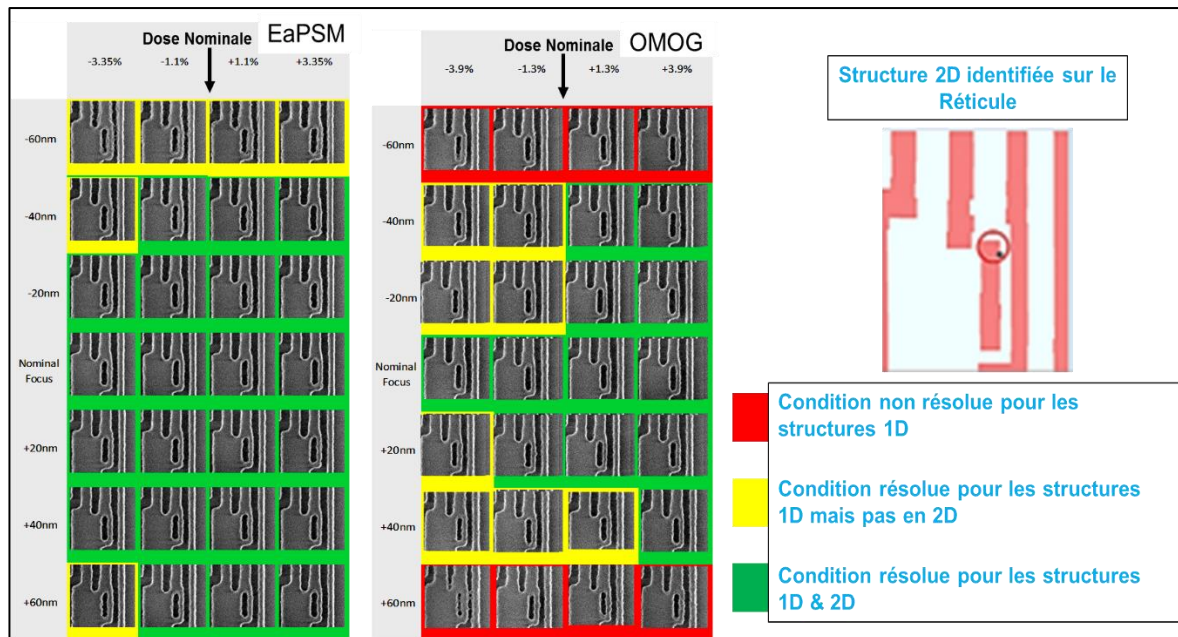


Figure 86 : Comparaison de la criticité de la structure "Golden Hotspot" sur la fenêtre de procédé 1D défini pour le réticule EaPSM à gauche et pour le réticule OMOG à droite. Les images en rouge correspondent à des conditions de procédé (Dose & Focus) non résolues pour les structures 1D et 2D. En Jaune les images correspondant aux conditions de procédé pour lesquelles seules les structures 1D sont résolues. En vert les conditions pour lesquelles les structures 1D ET 2D sont résolues.

Cette première structure Figure 86 que l'on a appelée "Golden Hotspot" montre clairement que sur la fenêtre de procédé déterminée via l'étude des structures 1D, la criticité de ce hotspot est moindre avec le réticule EaPSM qu'avec le réticule de type OMOG. Certes le pas de dose est un peu plus important avec le réticule de type OMOG lorsque ce pas est normalisé par rapport à la dose nominale, mais ceci s'explique par le fait que la dose nominale est plus faible avec le réticule de type OMOG. En effet le pas de dose est identique en valeur absolue.

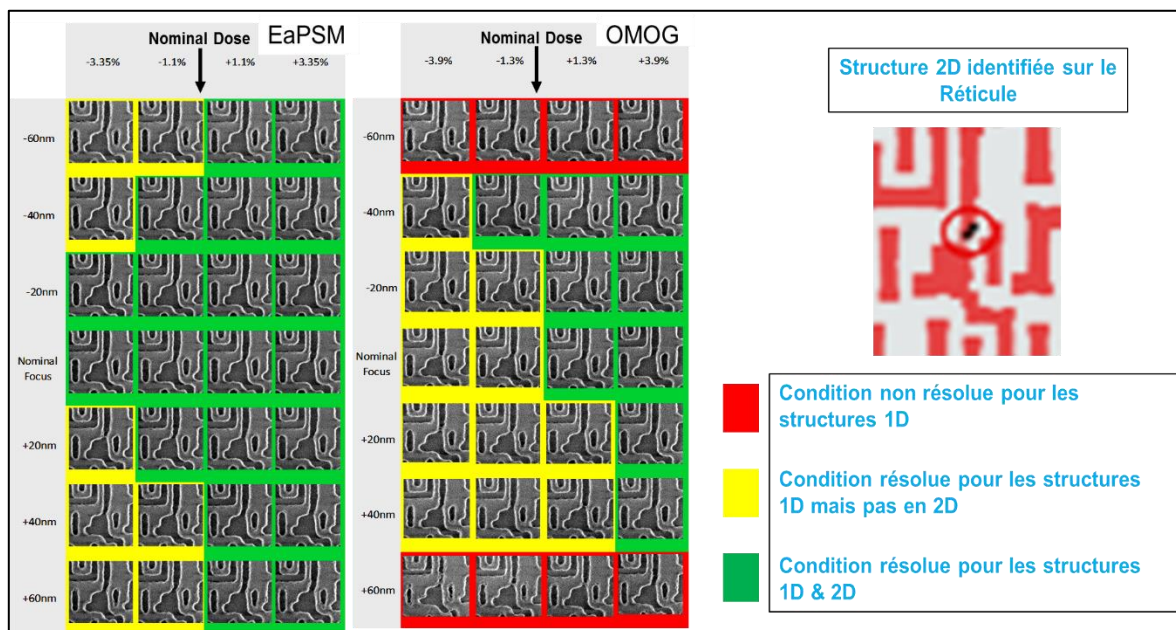


Figure 87 : Comparaison de la criticité de la structure "Neck" sur la fenêtre de procédé 1D défini pour le réticule EaPSM à gauche et pour le réticule OMOG à droite. Les images en rouge correspondent à des conditions de procédé (Dose & Focus) non résolues pour les structures 1D et 2D. En Jaune les images correspondant aux conditions de procédé pour lesquelles seules les structures 1D sont résolues. En vert les conditions pour lesquelles les structures 1D ET 2D sont résolues.

Pour cette configuration hotspot visible Figure 87 de type "neck", on retrouve également le même comportement que pour la structure de type "Golden Hotspot". En effet on mesure ici aussi un espace dans la résine, dont la criticité conduit à un "cou" dans la ligne de métal déposée par la suite (i.e. une rupture dans le circuit). La superposition de la fenêtre de procédé 1D avec cette structure montre également un meilleur comportement du réticule de type EaPSM par rapport au réticule de type OMOG.

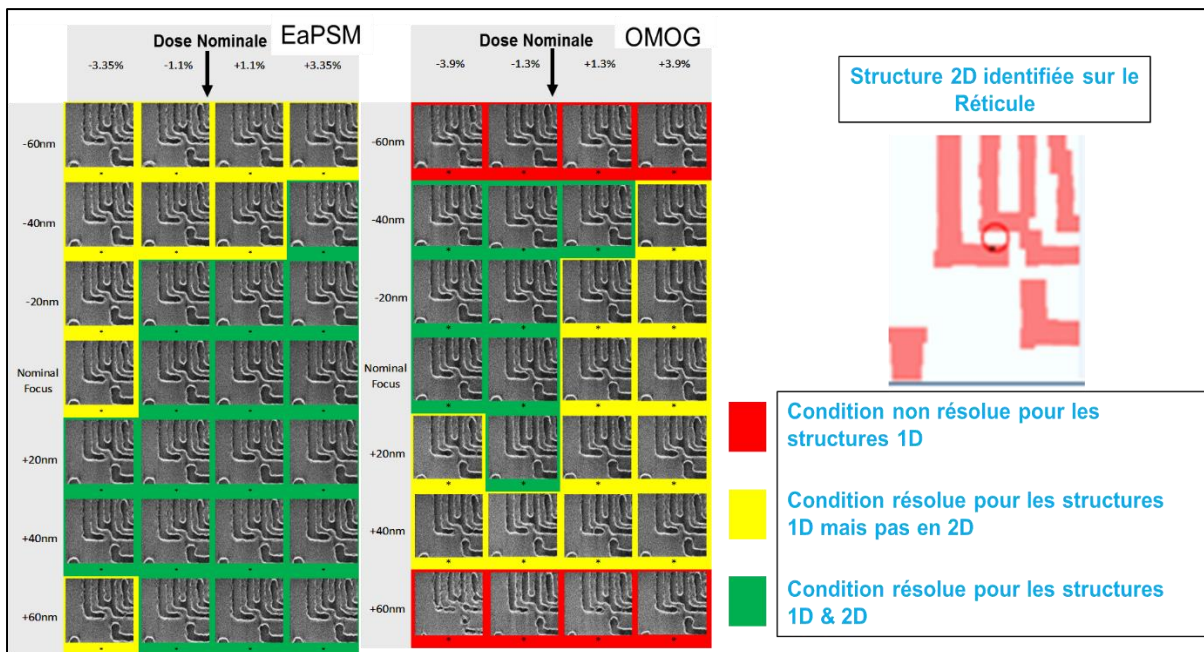


Figure 88 : Comparaison de la criticité de la structure "Bridge" sur la fenêtre de procédé 1D défini pour le réticule EaPSM à gauche et pour le réticule OMOG à droite. Les images en rouge correspondent à des conditions de procédé (Dose & Focus) non résolues pour les structures 1D et 2D. En Jaune les images correspondant aux conditions de procédé pour lesquelles seules les structures 1D sont résolues. En vert les conditions pour lesquelles les structures 1D ET 2D sont résolues

Enfin cette dernière structure 2D appelée "Bridge" représente la mesure d'une ligne de métal. On se retrouve donc ici en polarité inverse par rapport aux structures 2D précédentes. Ce Hotspot permet donc de mettre en évidence un comportement de type Court-circuit électrique. Là encore le réticule de type EaPSM montre un meilleur comportement que le réticule de type OMOG.

Les images SEM montrent donc que le réticule de type EaPSM est plus indiqué pour des niveaux de type Métal dense qu'un réticule de type OMOG.

#### 4. Conclusion

Pour cette partie III, deux matrices Dose/Focus (une pour chaque réticule évalué) ont été réalisées. Notre double problématique consistait d'une part à évaluer le gain en termes de réduction des effets de focalisation entre les différentes structures embarquées sur un même niveau, et d'autre part à améliorer la fenêtre de procédé globale permettant d'améliorer la résolution lithographique de niveau dense de type Metal\_28. Deux séries de structures (1D et 2D) préalablement identifiées et testées en simulation ont été observées sur plaquette.

Concernant les structures 1D, et via l'application de la méthodologie usuelle qui consiste à tracer les courbes de Bossungs et les courbes Iso-CD pour répondre à notre problématique, le réticule de type EaPSM est plus indiqué que le réticule de type OMOG. Bien que peu significatifs, on note un gain en termes de réduction des effets de focalisations pour le réticule EaPSM par rapport à l'OMOG avec une plage de dispersion en focus de 7nm pour le EaPSM et 18nm pour le réticule OMOG. Cet écart n'est pas vraiment problématique pour le réticule de type OMOG car chacun des Best Focus des structures 1D considéré est inclus dans la fenêtre de procédé globale 1D. Mais c'est surtout en termes de fenêtre de procédé que le gain est le plus significatif pour l'étude des structures 1D, avec une profondeur de champ de 120nm pour le EaPSM contre 90nm pour l'OMOG, soit 36% de plus. Les latitudes d'exposition sont identiques pour les deux réticules.

Concernant les structures 2D, la méthodologie d'exploitation des résultats usuelle ne permet pas d'identifier le best focus en se basant sur les courbes de Bossungs. Pour ces structures un phénomène alors peu observable sur les structures 1D perturbe la détermination du best focus. Ce phénomène connu dans la littérature sous l'appellation Bossung Tilt traduit une dépendance du Best Focus à la dose. Une nouvelle méthodologie basée sur la sensibilité à la dose a été développée afin de s'affranchir de ce phénomène, et un script Matlab a été développé pour une détermination plus rapide des best focus de chaque structure 2D. Les résultats obtenus avec la méthodologie basée sur la sensibilité à la dose a également mis en évidence une meilleure performance du réticule de type EaPSM par rapport au réticule de type OMOG. Le réticule de type EaPSM présente une plage de dispersion en Best Focus pour les structures 2D de 16nm environ, alors que pour le réticule de type OMOG, cette plage est d'environ 50nm. Nos structures 2D étant des hotspots, il est difficile de parler de fenêtre de procédé pour de telles structures étant donné qu'elles ont été identifiées de par leur criticité. Les fenêtres de procédé globales pour les structures 1D ayant été établies de manière précise pour chacun des deux réticules, nous avons étudié le comportement de nos hotspots à l'intérieur de ces fenêtres de procédé 1D. Après avoir évalué les structures 2D en termes de criticité, le réticule de type EaPSM montre de meilleures performances pour les trois structures 2D évaluées. En effet, sur le réticule de type EaPSM les points de fonctionnements (dose et focus d'exposition) pour lesquels les structures 2D étaient résolues sont plus importants que pour le réticule de type OMOG.

A travers la mise en place de cette nouvelle méthodologie d'exploitation nous avons donc pu pousser plus loin les investigations en comparant la réponse des deux réticules pour des structures 1D et 2D. Il apparaît ainsi d'un point de vue expérimental que l'utilisation d'un réticule de type EaPSM est plus indiquée que l'utilisation d'un réticule de type OMOG. L'EaPSM présente une fenêtre de procédé plus confortable pour les structures 1D et un best focus shift beaucoup moins important entre les différentes structures embarquées sur un

niveau dense de type Métal. Le comportement de structures 2D de type Hotspot est également plus stable en termes de criticité pour le réticule EaPSM.

Ainsi les résultats de simulation et expérimentaux montrent que le réticule de type EaPSM convient mieux qu'un réticule de type OMOG pour un niveau Métal dense.

Dans la suite et comme annoncé en préambule nous comparerons la différence entre le réticule EaPSM standard utilisé à ST et le réticule EaPSM optimisé proposé par ASML.

#### IV. Comparaison EaPSM standard et EaPSM optimisé

L'objectif de cette partie est de comparer les deux réticules à décalage de phase utilisés pour les niveaux Métaux du 28nm, à savoir le A61A\* qui est le standard à ST et le AH1 que nous avons évalué dans cette partie. On comparera dans un premier temps les certificats de conformités de chacun des deux réticules, avant d'évaluer la variabilité liée à leur fabrication respective via l'utilisation d'abaques conçus pour l'étude. Enfin on réalisera des tests via le simulateur Panoramic que nous avons utilisé jusqu'ici pour évaluer l'impact de cette variabilité sur la résolution de structures classiques en lithographie.

##### 1. Variabilité liée à la fabrication des réticules

Chaque réticule que l'on reçoit à ST est livré avec un Certificat de conformité sur lequel figure des informations relatives aux mesures de contrôles réalisées par les Mask Shop permettant de valider son utilisation au niveau IDM. Les paramètres mesurés sont la phase et la transmission sur les quatre coins du réticule, comme décrit sur l'extrait Table 7. La Mask Shop ne réalise donc pas de contrôle sur l'épaisseur et pas non plus sur les indices n et k du matériau absorbeur du réticule. Ces mesures sont réalisées en amont chez le fournisseur de blanks.

A61A*				AH1			
Mask Set	Z400A	Wavelength	193.000	Mask Set	280DA	Wavelength	193.000
Layer	3GB0 061	Target	6.300	Layer	5U09 069	Target	6.300
Wavelength	193.000	Tolerance	0.200	Wavelength	193.000	Tolerance	2.000
Target	180.000	Range	0.200	Target	166.000	Range	1.000
Tolerance	2.000	Average	181.703	Tolerance	5.000	Average	164.795
Range	2.000	Max	181.960	Range	5.000	Max	165.710
Average	181.703	Min	181.530	Average	164.795	Min	163.190
Max	181.960	Range	0.430	Max	165.710	Range	2.520
Min	181.530			Min	163.190		
Range	0.430			Range	2.520		

Table 7 : Extrait des paramètres mesurés en MaskShop pour les deux réticules de type EaPSM. A droite l'EaPSM standard utilisé à ST. A gauche le réticule optimisé utilisé pour l'étude.

On remarque que les moyennes des paramètres de phase et de transmission diffèrent d'un EaPSM à l'autre, ainsi que les valeurs de tolérances associées à ces paramètres. Le A61A\*-notre standard à ST- à une tolérance de 2° sur la phase et de 0,2 sur la transmission, tandis que pour le AH1 ces tolérances sont de 5° pour la phase et 2 pour la transmission. Ces valeurs témoignent d'une stabilité liée au procédé de fabrication des blanks bien meilleure pour notre standard à l'heure actuelle. Cependant pour une utilisation en production à ST, les tolérances devront être les mêmes pour le AH1 et le A61A\*. Les tolérances associées au nouveau EaPSM ne sont donc pas acceptable. Après discussion avec notre Mask Shop il apparaît que ces tolérances seront les mêmes une fois le procédé de fabrication des blanks stabilisé, ce qui pourrait prendre entre 5 mois et un an selon la quantité produite. En considérant le peu de différences qu'il y a d'un point de vue résolution entre l'utilisation du EaPSM optimisé et



l'EaPSM standard, ce nouveau blank optimisé ne sera pas retenu. En revanche nous avons évalué l'apport du EaPSM par rapport à l'OMOG et l'apport cette fois ci en termes de résolution justifie un changement de blank pour les niveaux dense de type Métal.

Néanmoins ces premiers exercices concernant la variabilité entre ces deux EaPSM nous ont conduits à évaluer les tolérances actuellement en place sur notre EaPSM standard. Concernant les tolérances sur les paramètres d'épaisseur et d'indice  $n$  et  $k$ , c'est la Mask Shop qui impose ces valeurs au fabricant de blanks. La mesure des paramètres  $n$ ,  $k$  et épaisseur étant destructive, les fournisseurs de blanks réalisent ce contrôle via un échantillonnage d'un réticule contrôlé pour 50 réticules fabriqués. Les fabricants de blanks ne donnent la valeur de l'épaisseur et des indices  $n$  et  $k$  qu'à titre indicatif, puisqu'ils certifient leurs blanks uniquement sur les valeurs de phase et transmission. La Mask Shop impose donc à son fournisseur les mêmes tolérances que celles que ST impose à la Mask Shop sur les réticules EaPSM.

Par l'intermédiaire de notre Mask Shop nous avons su que le matériau absorbeur est déposé à une épaisseur de 68.2nm avec une variation possible de  $\pm 2$ nm. Les paramètres de phase et transmission étant liés à l'épaisseur et aux indices  $n$  et  $k$  de notre absorbeur, nous avons calculé dans la Table 8 les variations provoquées par chacune des grandeurs sur les autres, pour notre réticule EaPSM standard. Etant donné qu'il n'y a pas de tolérances sur les indices  $n$  et  $k$ , nous avons évalué sur la dernière ligne du tableau l'impact que pourrait avoir une variation de  $\pm 0,1$  sur l'indice  $n$  et de  $\pm 0,01$  sur l'indice  $k$ .

	Spécificité Nominale	Phase	Transmission	$n$	Epaisseur	$k$
Epaisseur	68,2nm $\pm$ 2nm	$\pm 4^\circ$	$\pm 0,5\%$	$\pm 0,52$	NA	$\pm 0,15$ (T=6,3=CST)
Phase	$180^\circ \pm 3^\circ$	NA	NA	$\pm 0,04$	$\pm 1,35$ nm	NA
Transmission	6,3 $\pm 0,2\%$	NA	NA	$\pm 0,2$	$\pm 1$ nm	$\pm 0,08$
$n$	$\pm 0,1$	$\pm 10^\circ$	$\pm 0,1\%$	NA	$\pm 5$ nm(ph=CST)	Dépend de la fabrication du Blank
$k$	$\pm 0,01$	NA	$\pm 0,4\%$		$\pm 1,1$ nm	NA

*Table 8 : Table de variation et d'interdépendance des paramètres de phase, transmission, épaisseur et des indices optiques  $n$  et  $k$  pour le réticule EaPSM standard utilisé à STMicroelectronics*

Il apparait que les  $\pm 2$ nm de tolérance sur l'épaisseur du matériau absorbeur (à  $n$  et  $k$  figés) peuvent conduire à une variation de  $4^\circ$  de la phase et de 0.5% de transmission. On remarque également que le contrôle des valeurs  $n$  et  $k$  serait nécessaire pour améliorer la conformité des réticules à leur utilisation au niveau IDM. Malheureusement la mesure étant destructive ce type de contrôle ne pourra pas être mis en place pour chaque réticule utilisé. Nous allons passer par des tests en simulation pour vérifier si les configurations les plus extrêmes induisent un écart important d'un point de vue lithographique. C'est ce que l'on propose de développer dans la partie suivante.

## 2. Vérification en simulation de la variabilité des paramètres du réseau inhérent à sa conception

### a. Description des différents réseaux de type EaPSM sélectionnés pour la simulation

Nous avons, pour les tests en simulation de cette partie, défini six cas d'étude détaillés dans la Table 9. Étant donné qu'il existe plusieurs trios ( $n$ ,  $k$ , épaisseur) permettant de faire en sorte que le réseau soit conforme en termes de phase et transmission, nous avons cherché les configurations extrêmes et nominales. Chaque cas englobe les 4nm de sur-gravure du quartz pour les calculs de phase et transmission.

Cas	Épaisseur (nm)	$n$	$k$	Phase (°)	Transmission (%)
1	68.2	2.430	0.610	178,86	5.34
2	68.2	2.420	0.574	179,99	6.29
3	70.2	2.354	0.554	182.95	6.48
4	66.2	2.490	0.595	177.06	6.11
5	70.2	2.380	0.559	179.85	6.30
6	66.2	2.460	0.589	180.31	6.30

Table 9 : Description des paramètres du réseau EaPSM des six cas identifiés pour l'étude de la variabilité d'un point de vue lithographique.

Le cas numéro 1 est le cas nominal avec les valeurs  $n$ ,  $k$  et épaisseur communiqué par les fournisseurs de blank. Pour ce cas nous retrouvons une transmission de 5,34% via le calcul en utilisant la méthode explicitée chapitre C.II.3.b.

Pour le cas numéro 2 les valeurs  $n$  et  $k$  ont été optimisées afin d'obtenir 180° de phase et 6,3% de transmission, mais l'épaisseur est conservée à 68,2nm.

Pour le cas numéro 3 nous avons pris l'épaisseur maximale que l'on peut avoir sur le blank, à savoir 70,2nm, puis nous avons choisi les valeurs de  $n$  et  $k$  permettant de respecter les spécificités en termes de phase et transmission avec respectivement 182,95° et 6,48%.

Le cas numéro 4 correspond à l'opposé du cas numéro 3, avec une épaisseur de 66,2nm et un couple  $n$  et  $k$  permettant d'obtenir 177° pour la phase et 6,1% en transmission.

Enfin, les cas 5 et 6 correspondent aux variations d'épaisseurs maximales admissibles avec des valeurs de  $n$  et  $k$  ajustées pour permettre d'atteindre quasi-exactement 180° de déphasage et 6,3% en transmission.

### b. Paramètres de simulation et description des motifs choisis pour la vérification

Pour cette partie la simulation est réalisée avec la méthode de résolution rigoureuse FDTD (c.f. partie C.II.3.d.i), avec un scanner à immersion utilisant une source de longueur d'onde de 193nm et une ouverture numérique NA de 1,35. Nous avons choisi une source annulaire de paramètres  $(\sigma_{in} ; \sigma_{out}) = (0,6 ; 0,95)$ . Afin de n'observer que les effets liés au réseau, nous avons choisi un empilement sur plaquette en mode résine infinie permettant de s'affranchir des

effets des ondes stationnaires. Enfin, la dose nominale et la valeur du seuil de l'intensité permettant d'obtenir les profils dans la résine seront choisies avec la structure MESDIM (réseau de ligne de pas 90nm). Ces éléments sont résumés Figure 89.

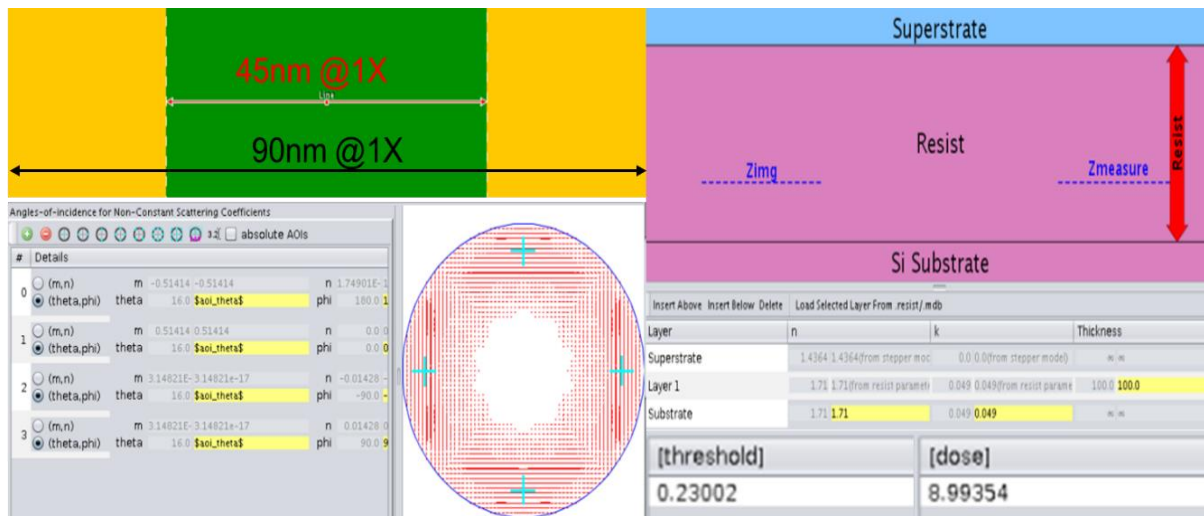


Figure 89 : Paramètres et configurations du simulateur HyperLith® utilisé pour l'étude de l'impact de la variabilité des paramètres du réticule d'un point de vue résolution lithographique

Concernant les motifs de test, trois structures 1D de type L&S (Ligne et Espace) respectivement en configuration dense, semi-dense et isolée seront testées. La ligne mesurera pour les trois configurations 45nm, puis nous ferons varier le pas de 90nm, puis 135nm et enfin 225nm. Une structure de type contact avec une configuration en quinconce sera utilisée.

### c. Résultats de la simulation

#### i. Structures 1D

Pour mettre en évidence les éventuelles différences liées à la résolution de nos trois structures 1D pour chacun des cas spécifiés dans la partie B.IV.2.a., les résultats seront présentés en termes de profil dans la résine, pour trois niveaux de focus, -100nm, 0nm et +100nm et présentés Figure 90.

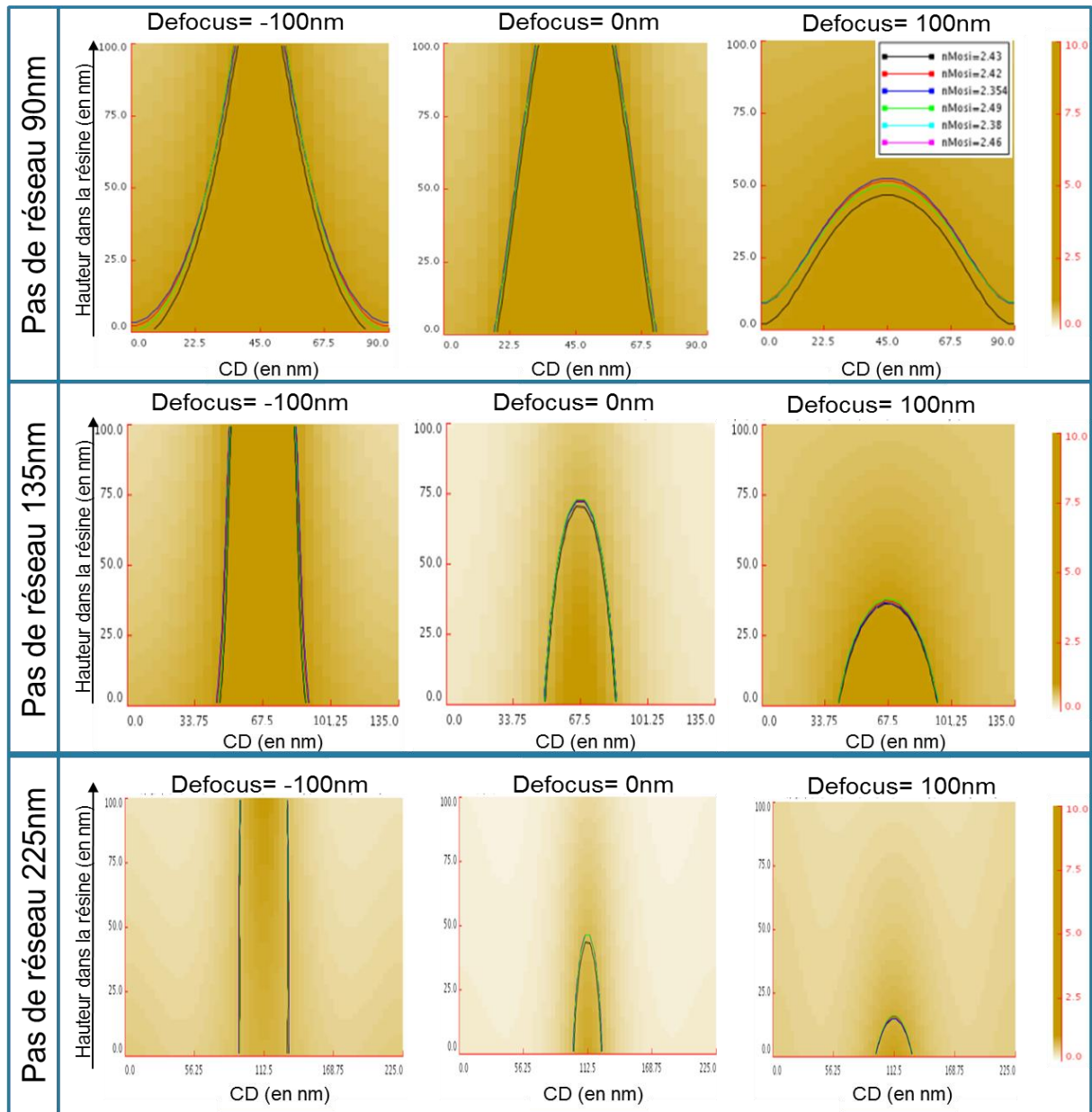


Figure 90 : Etude des profils résine obtenus en fonction du défocus pour les six cas d'étude identifiés, et pour une structure 1D de type Line&Space en configuration dense, semi-dense et isolée pour une ligne de 45nm sur plaquette.

Pour le pas de réseau de 90nm à défocus -100nm, on remarque une légère variation de CD au pied du motif dans la résine mais pas de différence à défocus 0nm.

Pour le défocus à +100nm le motif est mal résolu dans la résine. Tous les cas sont confondus hormis le cas 1 qui se démarque des autres. Ceci s'explique par le taux de transmission plus faible de 1% par rapport aux autres. Pour les pas de réseau semi-dense et isolé tous les cas sont confondus et on ne dénote donc aucune différence de CD.

## ii. Structure 2D

La structure 2D de type Contact en quinconce est décrite Figure 91. La dimension du contact selon les axes x et y est identique, à savoir 45nm. Le pas de réseau choisi est de 140nm.



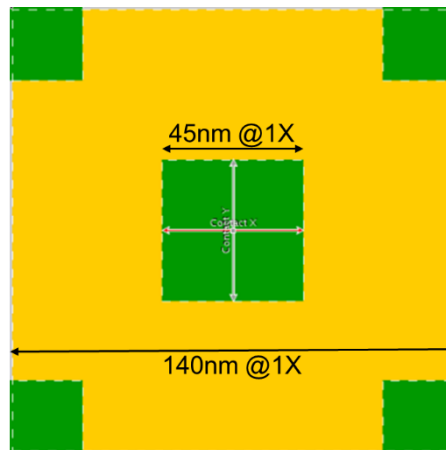


Figure 91 : Structure 2D de type Contact en configuration en quinconce. Les dimensions sont précisées en dimension plaquelette

Bien que notre source soit symétrique, nous présenterons les résultats selon une coupe dans la hauteur de la résine à 30nm soit à 30% de la hauteur de la résine afin d'être en mesure de capturer d'éventuelles différences dans les directions x et y. De même que pour les structures 1D nous ferons nos observations pour trois niveaux de focus, -100nm, 0nm et +100nm.

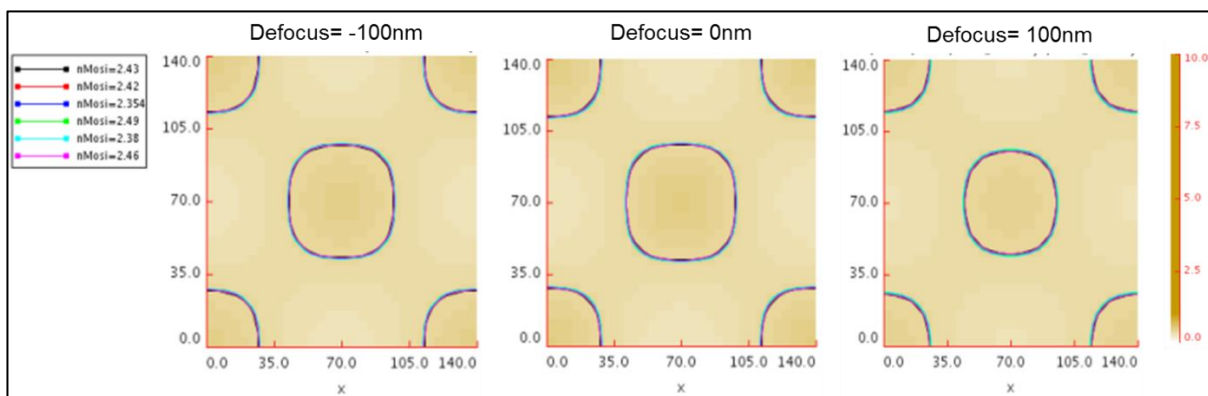


Figure 92 : Etude des profils résine obtenus en fonction du défocus pour les six cas d'étude identifiés, pour une structure 2D de type Contact de 45nm (dimension plaquelette 1X)

Les 6 différents cas sont confondus et on ne note aucune différence de CD notable selon les axes x et y pour notre structure 2D de type contact.

### 3. Conclusion

En considérant le fait que le EaPSM optimisé proposé par ASML doit passer par une étape de stabilisation de son procédé de fabrication de plusieurs mois, et en considérant que l'épaisseur de la couche de matériau absorbant en alliage de MoSi est déposé avec une tolérance de +/-2nm avec un couple (n,k) équivalent, les 2 réticules sont similaires. De plus, les tests en simulation permettant d'évaluer les cas extrêmes de réticule acceptables, montrent qu'en termes de résolution les différences sont quasi-inexistantes. Il y a donc peu d'intérêt à basculer de l'EaPSM standard à l'EaPSM optimisé.

## V. Conclusion

Le niveau Métal\_1 de la technologie CMOS 28nm est résolu avec une fenêtre de procédé réduite de l'ordre de 80nm, et présentant des écarts de focalisation importants entre les structures embarquées sur ce même niveau. Il présente à la fois des contraintes liées à la densité des motifs et des configurations au niveau du design pouvant conduire à des amincissements de lignes et des rapprochements entre les motifs. D'autres travaux de thèse portant sur ce même sujet ont été menés, et cette partie C s'inscrit dans la complémentarité de ces travaux. En revanche il était question ici de ne considérer que le réticule (ce qui n'a pas été fait auparavant) pour répondre à notre problématique dont les deux objectifs consistent à :

- 1. Améliorer la fenêtre de procédé globale sur plaquette.**
- 2. Réduire les écarts de focalisation sur plaquette entre les différentes structures embarquées sur ce même niveau.** Nous avons défini ces écarts sous leur appellation anglaise Best Focus Shift.

Pour un niveau dense de type Métal de la technologie CMOS 28nm, le réticule standard utilisé est un réticule de type OMOG. Les réticules peuvent être déclinés en deux grandes familles, les réticules binaires (et binaires avancés) comme l'OMOG et les réticules à décalage de phase. Dans le cadre d'un programme de collaboration avec ASML et DNP, un réticule à décalage de phase optimisé était en cours d'étude. Nous avons donc comparé le comportement de ces deux réticules par rapport à notre problématique. La première partie de ce travail nous a permis de définir la notion de Best Focus Shift et l'importance de la prise en compte de l'épaisseur de l'absorbeur du réticule sur le trajet optique. Nous avons tout d'abord utilisé l'approche d'Hopkins pour comprendre l'importance des différents éléments physiques (Source, ouverture numérique, etc...) permettant de reconstituer l'image. Puis à travers l'utilisation de structures à une et deux dimensions, et l'utilisation de simulations basées sur une méthode de résolution rigoureuse des équations de Maxwell, nous avons établi que le réticule de type EaPSM est clairement plus indiqué qu'un réticule de type OMOG.

Enfin une vérification sur plaquette a été réalisée en utilisant les mêmes structures que celles utilisées pour la partie simulation. Concernant les structures 1D, et via l'application de la méthodologie usuelle qui consiste à tracer les courbes de Bossungs et les courbes Iso-CD pour répondre à notre problématique, le réticule de type EaPSM est plus indiqué que le réticule de type OMOG. Bien que peu significatifs, on note un gain en termes de réduction des effets de focalisations pour le réticule EaPSM par rapport à l'OMOG avec une plage de dispersion en focus de 7nm pour le EaPSM et 18nm pour le réticule OMOG. Cet écart n'est pas vraiment problématique pour le réticule de type OMOG car chacun des Best Focus des structures 1D considéré est inclus dans la fenêtre de procédé globale 1D. Mais c'est surtout en termes de fenêtre de procédé que le gain est le plus significatif pour l'étude des structures 1D, avec une profondeur de champ de 120nm pour l'EaPSM contre 90nm pour l'OMOG, soit 36% de plus, les latitudes d'exposition étant identiques pour les deux réticules.

Concernant les structures 2D, la méthodologie d'exploitation des résultats usuelle ne permet pas d'identifier le best focus en se basant sur les courbes de Bossungs. Pour ces structures un phénomène alors peu observable sur les structures 1D perturbe la détermination du best focus. Ce phénomène connu dans la littérature sous l'appellation Bossung Tilt traduit une dépendance du Best Focus à la dose. Une nouvelle méthodologie basée sur la sensibilité à la dose a été développée afin de s'affranchir de ce phénomène, et un script Matlab a été

développé pour une détermination plus rapide des best focus de chaque structure 2D. Les résultats obtenus avec la méthodologie basée sur la sensibilité à la dose a également mis en évidence une meilleure performance du réticule de type EaPSM par rapport au réticule de type OMOG. Le réticule de type EaPSM présente une plage de dispersion en Best Focus pour les structures 2D de 16nm environ, alors que pour le réticule de type OMOG, cette plage est d'environ 50nm. Nos structures 2D étant des hotspots, il est difficile de parler de fenêtre de procédé pour de telles structures. Les fenêtres de procédés globales pour les structures 1D ayant été établies de manière précise pour chacun des deux réticules, nous avons étudié le comportement de nos hotspots à l'intérieur de ces fenêtres de procédé 1D. Après avoir évalué les structures 2D en termes de criticité, le réticule de type EaPSM montre de meilleures performances pour les trois structures 2D évaluées. En effet, sur le réticule de type EaPSM les points de fonctionnements (dose et focus d'exposition) pour lesquels les structures 2D étaient résolus sont plus importants que pour le réticule de type OMOG.

A travers la mise en place de cette nouvelle méthodologie d'exploitation nous avons donc pu pousser plus loin les investigations en comparant la réponse des deux réticules pour des structures 1D et 2D. Il apparaît ainsi d'un point de vue expérimental que l'utilisation d'un réticule de type EaPSM est plus indiquée que l'utilisation d'un réticule de type OMOG. L'EaPSM présente une fenêtre de procédé plus confortable pour les structures 1D et un best focus shift beaucoup moins important entre les différentes structures embarquées sur un niveau dense de type Métal. Le comportement de structures 2D de type Hotspot est également plus stable en termes de criticité pour le réticule EaPSM.

Enfin nous avons comparé les propriétés du réticule EaPSM optimisé par rapport à notre EaPSM standard d'un point de vue simulation, et compte tenu des limites de spécificités des propriétés physiques mesurées et de leurs variabilités dues à l'étape de fabrication, l'adoption de ce standard ne montre que peu d'intérêt.

Malheureusement le niveau de maturité technologique du niveau étudié est tel qu'un changement de réticule en implique de nombreux autres, tels que le développement d'un nouveau model OPC, un recentrage des étapes de lithographie et gravure associées, une mise en place de nouvelles cartographies de suivi, etc... . Ce que l'on appelle maturité technologique est l'échelle interne permettant d'évaluer le stade de développement d'une technologie. Le basculement est donc toujours en cours concernant le niveau Métal du CMOS 28nm. En revanche ce réticule a déjà été adopté pour des technologies (Métal C de la technologie FDSOI 14nm) pour lequel le degré de maturité n'était pas avancé.

Le travail de cette partie a également permis de revenir sur les tolérances des différents paramètres contenus dans les certificats de conformité des réticules et d'en saisir leur importance, et ceux pour les trois acteurs que nous avons identifié plus tôt, à savoir les Blank Provider, les Mask Shops et les Integrated Device Manufacturer. Il est ainsi fondamental que ces trois acteurs saisissent l'importance du réticule sur la faisabilité et la qualité finale d'une puce. Les technologies avancées telles que les technologies FDSOI 14nm ou 7nm impliqueront forcément une collaboration de plus en plus étroite de ces trois acteurs et une prise de conscience plus importante du procédé total, de la fabrication du réticule à l'élaboration de la puce.

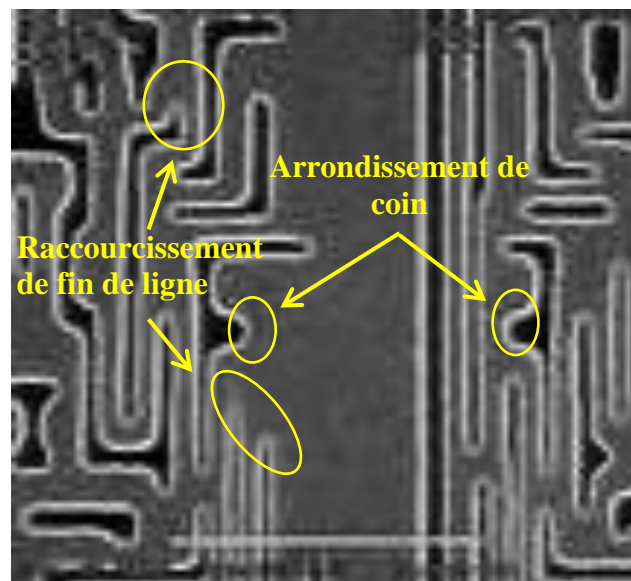


## **Partie C**

### **Création d'un modèle de réticule**

## I. Introduction

Cette partie concerne la seconde problématique identifiée au chapitre B.V.2, à savoir **si la prise en compte plus rigoureuse dans les modèles OPC des effets du processus complet de fabrication des réticules est nécessaire**. Aujourd'hui les modèles OPC sont construits avec l'hypothèse que les motifs présents sur le réticule sont ceux désirés. Cela conduit à compenser les écarts dimensionnels imputables à la fabrication du réticule au niveau des modèles OPC eux-mêmes. Le travail présenté dans cette partie s'inscrit dans ce que l'on appelle les Techniques d'Améliorations de la Résolution. Pour les technologies matures (ex : CMOS 40nm, CMOS 28nm) cette hypothèse était acceptable dans la mesure où le modèle OPC compensait ces écarts dimensionnels de manière suffisante. Mais pour les technologies avancées contenant des niveaux critiques où chaque nanomètre compte, tels que le niveau "GRILLE" de la technologie FDSOI 14nm, nous allons chercher à évaluer si la prise en compte rigoureuse des effets induits sur le réticule lors des procédés d'écriture et de gravure, peut permettre d'améliorer la fidélité des motifs obtenus sur plaquette depuis le design. A STMicroelectronics, le niveau "GRILLE" de la technologie FDSOI 14nm utilise le réticule le plus avancé et le plus critique vis-à-vis des motifs qui le composent. On choisit de travailler pour la suite de cette partie sur un réticule du même type en utilisant exactement le même procédé de fabrication, c'est-à-dire un masque binaire avancé que l'on retrouve sous l'appellation MBX. Les effets liés au procédé d'écriture et de gravure se traduisent principalement sur plaquette en non uniformité des dimensions, en arrondissement de coins ou en rétrécissement des fins de lignes [38] comme illustré Figure 93.



*Figure 93 : Exemple de structure présentant des arrondissements de coins et des raccourcissements de fin de ligne*

Avant d'aborder les enjeux de cette seconde problématique, il est important de bien connaître le flux de correction qui permet l'utilisation de modèle OPC, représentée Figure 94.

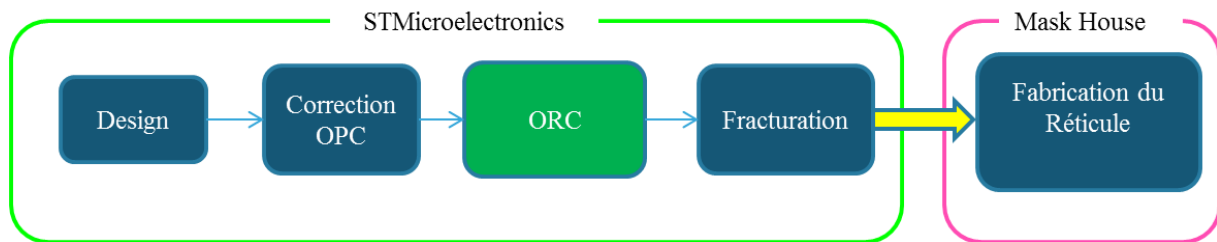


Figure 94 : Vue globale du flux de correction utilisé à STMicroelectronics

Pour rappel, le modèle OPC permet de simuler l'étape d'exposition du réticule et le développement sur plaquette. Dans le flux de correction, la première étape consiste à avoir l'ensemble des motifs d'un des niveaux du circuit, que l'on appelle le design. Les corrections OPC basées sur l'utilisation du modèle OPC consistent à modifier géométriquement les motifs du réticule pour que le contour résine soit le plus proche possible du design. À cette étape existe une boucle itérative (cf. chapitre B.IV.5.) qui permet de modifier progressivement le design. Le nombre d'itérations peut être établi de manière empirique ou jusqu'à atteindre un critère de succès défini comme étant une distance maximale entre le contour et le design. Ensuite vient l'étape de vérification des corrections, l'ORC, qui permet de s'assurer que le modèle OPC a réalisé les corrections adéquates à un transfert correct des motifs sur plaquette, et ce pour une ou plusieurs conditions d'expositions (dose et focus). Il est donc possible de vérifier via cette étape que les motifs présents sur réticule seront résolus dans une fenêtre de procédé défini. Le design corrigé est ensuite fracturé en figures géométriques basiques (carrés, rectangles, triangles) puis transmis au fabricant de réticule. La partie ORC est importante dans la mesure où la correction faite avec un modèle OPC est basée sur une boucle itérative dont le nombre d'itérations peut être insuffisant, ou dont les corrections ne permettent pas l'obtention d'un contour résine viable sur plaquette. Le modèle utilisé dans la partie ORC pour la simulation de contour contient aussi un modèle optique et un modèle résine qui peuvent être identiques ou différents à ceux utilisés pour la partie OPC. L'hypothèse sous-jacente faite lors des étapes de simulation et de correction est que les motifs envoyés aux fabricants de réticule et ceux réellement présents sur le réticule sont identiques. Ce qui signifie que les fabricants de réticule ont la capacité d'écrire les motifs sur masques avec une très grande précision. Hors les techniques et les équipements qu'ils utilisent ne permettent pas d'obtenir de tels résultats. Jusqu'alors les écarts inhérents à la fabrication des réticules étaient compensés par le modèle résine.

L'objectif de cette partie C est d'évaluer si la prise en compte plus rigoureuse des effets liés à la conception des réticules, permettrait d'obtenir une meilleure fidélité entre le design et les contours obtenus sur plaquette. L'utilisation de modèle OPC est fondamentale car elle permet de simuler les étapes d'exposition et de développement lithographique, permettant de réaliser des corrections au niveau des motifs présents sur réticule en avance de phase. Malheureusement il est impossible d'extraire à partir de mesures sur plaquettes les effets provenant du réticule de ceux provenant des effets optiques ou du scanner. Notre travail consistera donc à créer un modèle de réticule basé sur des mesures faites sur réticule, et permettant de simuler le contour masque à partir du design et de l'introduire en amont des modèles optique et résine. Nous aborderons dans une première partie le procédé de fabrication des masques avancés, les effets des procédés d'écriture, de développement et de gravure des réticules ainsi que les effets d'ores et déjà corrigés par les Mask Shop. En

deuxième partie nous exposerons la construction et la calibration d'un modèle de réticule. En troisième partie nous présenterons le flux de correction et vérification complet, c'est-à-dire du réticule à la plaquette. En dernière partie nous évaluerons l'apport de notre nouveau flux de corrections en le testant sur un produit existant.

## II. Du procédé de fabrication des réticules avancés au modèle de réticule

Comme introduit dans le chapitre C.I. le cycle de fabrication et d'utilisation d'un réticule peut se décomposer en trois étapes principale faisant intervenir chacune un acteur différent comme illustré Figure 95.

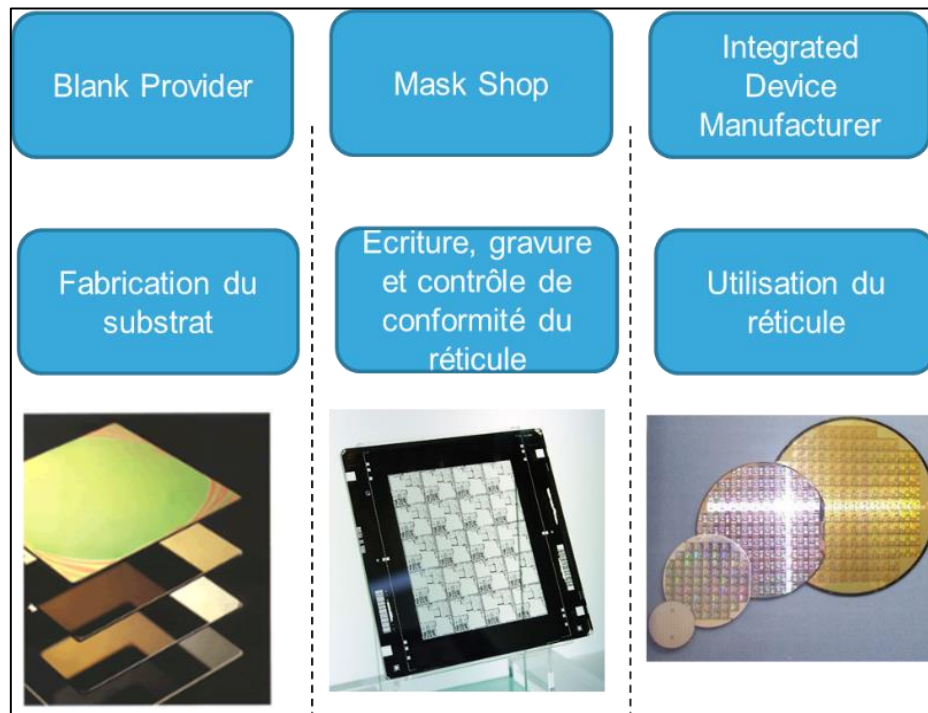


Figure 95 : Description du cycle de fabrication des réticules en fonction des intervenants.

Nous commencerons par parler du procédé de fabrication qui se déroule chez le "Blank Provider", c'est-à-dire la conception du substrat et de l'empilement multicouche qui le compose. Puis nous aborderons les étapes d'écriture, de gravure et de contrôle de conformité qui se déroule chez la Mask Shop. Enfin nous aborderons la partie pour laquelle nous sommes, STMicroelectronics, acteur. Les fabricants de circuits intégrés sont souvent désignés dans la littérature par IDM, acronyme anglais de "Integrated Device Manufacturer".

### 1. Fabrication du blank

Concernant cette partie il a été très difficile d'obtenir des informations précises et récentes sur la fabrication des blanks avancés tels que les EaPSM ou les UBM. En effet, le plus grand secret de fabrication gravite autour de la fabrication de ceux-ci, et les informations telles que les indices optiques et les épaisseurs des différentes couches qui composent les substrats avancés ont été obtenues avec beaucoup de difficultés, et après accord de non divulgation. Ces informations ont été utilisées notamment pour la partie calibration du modèle optique. La couche de matériaux absorbeurs utilisés est un alliage de Molybdène ( $\text{Mo}_x\text{Si}_y\text{O}_z\text{N}_j$ ) aux proportions stœchiométriques contrôlées pour obtenir un matériau aux indices optiques précis [39]. L'empilement multicouche sur substrat de quartz est réalisé via pulvérisation



cathodique réactive [40] en utilisant une cible en alliage de Molybdène. L'uniformité de l'épaisseur de la couche déposée dépend de la configuration de la chambre de dépôt [40] comme visible sur la Figure 96.

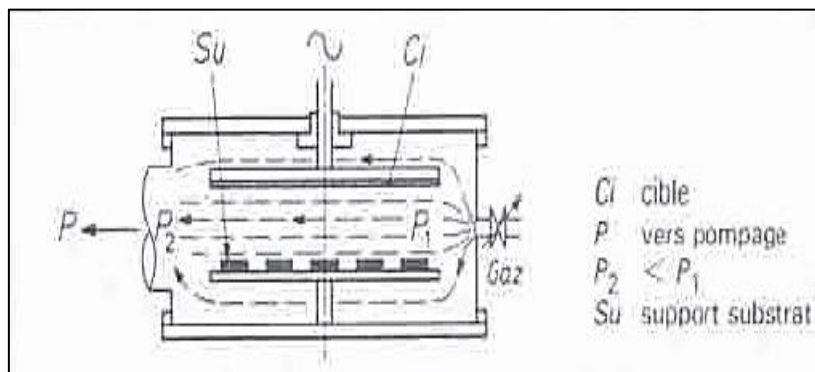


Figure 96 : Exemple de configuration d'une chambre de dépôt utilisée en pulvérisation cathodique réactive

Dans notre cas le substrat en quartz subit une rotation à vitesse contrôlée, et le flux de gaz est laminaire.

Les indices optiques sont fonctions de la microstructure qui elle-même est fonction à la fois de la température du substrat relative à la température de fusion du matériau, et de la pression partielle d'argon dans l'enceinte de dépôt comme on peut le voir sur la figure représentative Figure 97.

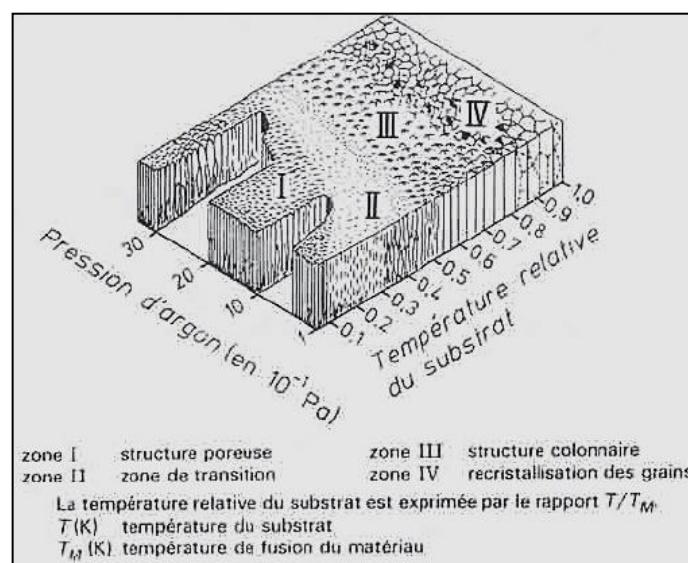


Figure 97 : Variation de la microstructure en fonction de la température relative du substrat par rapport à la température de fusion du matériau déposé et de la pression partielle d'argon dans la chambre de dépôt.

Enfin le contrôle de la stœchiométrie se fait via la maîtrise du rapport de la pression partielle d'azote  $N_2$  comme on peut le voir sur la courbe Figure 98.

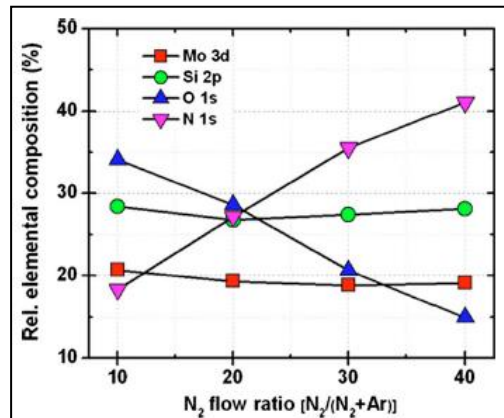


Figure 98 : Contrôle de la stœchiométrie du dépôt en fonction de la pression partielle d'azote dans la chambre de dépôt

Les blanks sont fabriqués par série de 50 et la mesure précise de l'épaisseur et des indices optiques  $n$  et  $k$  n'est pas réalisée sur tous les blanks de la série ni même sur toutes les séries. La mesure étant destructive, les blanks provider ont trouvé un moyen détourné de contrôler la conformité de tous leurs réticules, la mesure du déphasage et de la transmission telle que nous l'avons abordé au chapitre C.IV.1.

## 2. Transfert des motifs du design sur le réticule

Il existe deux famille d'équipements permettant d'écrire les motifs sur réticule, celui utilisant un faisceau laser et celui utilisant un faisceau d'électrons. L'écriture via l'équipement utilisant un faisceau laser est utilisée pour les réticules de technologies matures ou de contraintes très relâché. On retrouvera également des techniques que l'on regroupe sous l'appellation NGL, acronyme de Next Generation Lithography, où l'on retrouve les équipements utilisant de multiples faisceaux d'électrons parallèles pour une vitesse d'écriture accrue sur réticules. Certains équipements utilisent jusqu'à 262 000 faisceaux d'électrons en parallèle. Bien que les progrès aient été significatifs ces deux dernières années avec notamment l'amélioration de la puissance des sources utilisées, le contrôle de six millions de faisceaux parallèles reste toutefois à améliorer. En effet, on retrouve un parasitage des faisceaux les uns par rapport aux autres et une gestion de flux d'informations vers les organes de contrôle de chacun des faisceaux encore difficile. Dans la suite de ce chapitre nous aborderons seulement la technique utilisant un faisceau d'électrons et nous n'aborderons pas plus les autres techniques d'écriture, aussi nous invitons le lecteur à consulter l'ouvrage [41] pour plus de détails concernant les autres techniques.

### a. La préparation de données

Les motifs imprimés sur les réticules d'aujourd'hui sont définis au départ grâce à l'utilisation d'outils informatiques permettant de générer automatiquement les designs sur des ordinateurs dédiés nommés CAD pour Computer Automated Design. Ce que l'on appelle donnée est le fichier contenant les polygones et les rectangles, permettant de définir le design généré à l'aide de l'environnement CAD. Dans les années 70, CALMA COMPANY commercialise un environnement CAD appelé Graphic Design System II (GDS2), qui permet de créer des fichiers binaires au format GDS2, devenu aujourd'hui un des standard dans l'industrie du semi-conducteur pour la description et l'échange des designs. Ce format permet d'embarquer la description de 64 niveaux hiérarchiques référencés de 0 à 63.

Cette étape est celle qui permet de faire le lien entre les fabricants de circuits intégrés ou les centres de Design (de circuits intégrés) et les fabricants de réticules. Avant l'envoi des données aux fabricants de réticules, un certain nombre d'étapes et de traitements sont réalisés sur ces données, comme par exemple l'OPC. Suit l'étape de fracturation qui permet de transformer les données GDSII en un format compatible avec les machines d'écritures chez les fabricants de réticules, que l'on appelle MEBES. Au départ MEBES est le nom de la machine qui était utilisée pour écrire les réticules. Par abus de langage, on appelle toujours le fichier après fracturation un MEBES.

Les années passant et les technologies évoluant, SEMI introduit en 2002 un nouveau format de fichiers permettant de mieux prendre en compte la complexité des nouveaux circuits et de réduire leur taille sous le nom Open Artwork System Interchange Standard (OASIS). Ce format permet également plus de souplesse dans la description des différents niveaux de hiérarchie devenus plus nombreux, pour les technologies actuelles et futures.

Une fois les fichiers transmis aux fabricants de réticules, ils génèrent trois nouveaux fichiers :

- Un pour l'écriture, dont le format est une nouvelle fois adapté pour être implémenté sur la machine en vue d'effectuer l'étape d'écriture proprement dite. Le format de conversion dépend de l'équipement qui sera utilisée pour le transfert du design sur le réticule.

- un pour la métrologie, étape essentielle qui permettra de vérifier que le réticule est conforme en termes d'uniformité CD, de fidélité CD et de distorsion des motifs. On utilise dans ce cas un MEB.

- un pour l'inspection, étape finale qui permettra de vérifier et certifier la conformité du réticule par rapport au cahier des charges imposé par le fabricant de circuits intégrés.

Les étapes d'inspection et de métrologie ont toutes deux pour but de s'assurer de la qualité du réticule. Dans notre étude nous serons amenés à demander des réticules dédiés pour la calibration de notre modèle, et des mesures de structures variées sur réticule.

## b. La machine d'écriture à faisceau d'électrons

La lithographie utilisant un faisceau d'électrons [42] est une technique de pointe qui permet de créer des motifs très fins sur un réticule. Cette technique s'est inspirée du principe de fonctionnement des premiers microscopes électroniques à balayages, et consiste à balayer avec un faisceau d'électrons une surface recouverte d'un film de résine dont les propriétés chimiques sont sensibles à la quantité d'électrons reçus. Nous aborderons dans un premier temps le principe de fonctionnement de l'équipement, puis les raisons qui font de l'ebeam un outil particulièrement adapté à l'écriture de motifs fins sur réticule.

### i. Principe de fonctionnement

La machine d'écriture à faisceau d'électron est composée de plusieurs éléments :

- Une colonne optique électronique sous vide poussée munie d'un canon à électrons composé d'un filament en tungstène et d'une pointe en Hexaborure de Lanthane

(LaB<sub>6</sub>). Le faisceau d'électrons est ensuite purifié, condensé, et accéléré vers la surface du réticule.

- Un système de contrôle des mouvements mécaniques du réticule utilisant un interféromètre à six axes.
- Un système informatique qui permet de gérer les déplacements mécaniques du réticule, la déviation du faisceau pour l'orienter de manière précise à la surface du réticule et le transfert des motifs dans l'épaisseur de la résine à la surface du réticule.
- Un système de contrôle de la température du substrat, et de la chambre dans laquelle l'équipement se trouve.
- Un système de contrôle des vibrations dans l'enceinte où se trouve la machine d'écriture.

Lors de notre visite réalisée à Dai Nippon Printing Europe, nous avons pu voir que l'équipement était installé en salle blanche de telle sorte à être complètement isolé du bâtiment de par ses fondations, dans une pièce hermétique, et notre entrée dans la salle où la machine d'écriture est installée a suffi à déclencher l'alarme de température. La température est contrôlée au centième de degré Celsius près afin d'éviter d'éventuelles déviations du faisceau ou une dilatation du réticule. On retrouve sur le schéma représentatif Figure 99 les différents organes qui composent notre machine d'écriture.

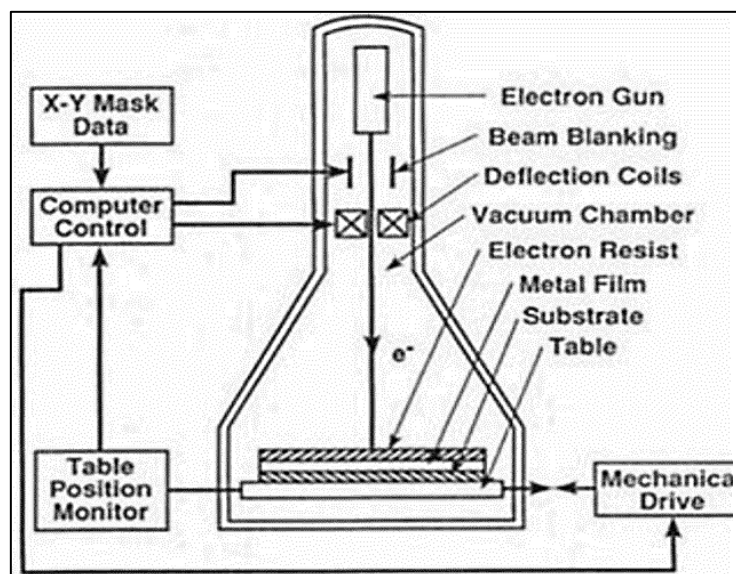


Figure 99 : Schéma représentatif d'une machine d'écriture à faisceau d'électrons utilisée pour les réticules avancés.

On retrouve également pour la machine que l'on utilise dans notre étude, à savoir l'EBM8000 fabriqué par NUFLARE TECHNOLOGY INC., un module spécifique permettant d'améliorer le temps d'écriture nommé VSB, acronyme anglais de "Variable Shaped Beam". Ce module permet de prédéfinir des polygones permettant de délimiter la zone d'impact du faisceau d'électrons sur la couche de résine. Les schémas Figure 100 permettent de comprendre le principe de la technique et les diverses formes qu'il est possible de créer.

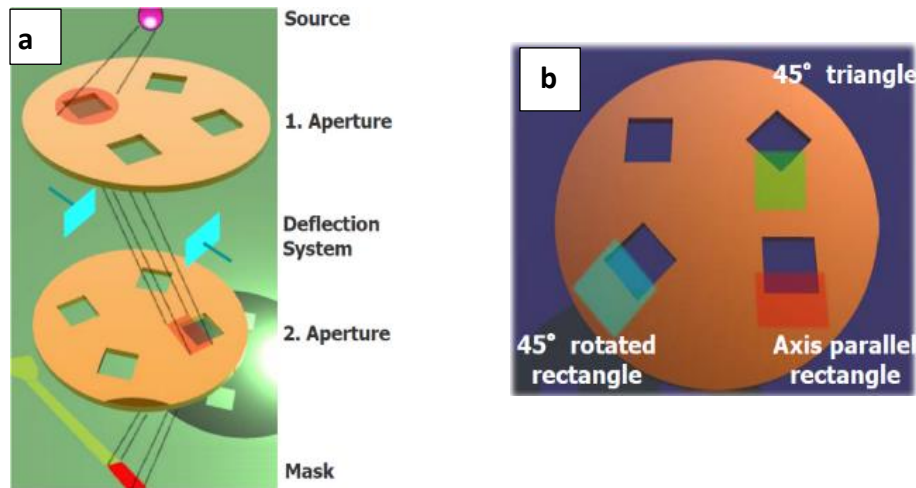


Figure 100 : a) Principe de fonctionnement du module VSB ; b) Exemple de forme préformée avec le VSB

Le premier avantage de l'utilisation d'un faisceau d'électrons est sa faible longueur d'onde, permettant d'obtenir une résolution moins limitée par les phénomènes de diffractions comme les anciennes techniques d'écritures utilisant un Laser. L'industrie microélectronique évoluant vers la miniaturisation, les motifs ainsi gravés sont de plus en plus petits.

Louis De Broglie a découvert que toutes les particules physiques dotées d'une quantité de mouvements ont une longueur d'onde, que l'on appelle communément longueur d'onde de De Broglie. Pour une particule relativiste, la longueur d'onde de De Broglie est donnée par :

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad \text{Equation 35}$$

Avec  $\lambda$  la longueur d'onde,  $h$  la constante de Planck et  $p$  la quantité de mouvement de la particule.

La relation de De Broglie permet de déterminer que la longueur d'onde d'un électron ayant une énergie cinétique d'1eV est d'un 1,23nm. Appliqué aux électrons il vient :

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2 * m_o * e * U}} \approx \frac{1.226}{\sqrt{U}} (nm) \quad \text{Equation 36}$$

Les machines d'écriture à faisceau d'électrons d'aujourd'hui utilisent une tension d'accélération de l'ordre de 50kV, dont nous détaillerons les raisons en partie suivante. Cela revient à une longueur d'onde de De Broglie de 0,005nm. On devrait donc être largement capable d'écrire des structures sub-nanométriques. Cependant il existe un certain nombre d'effets (interactions électron-électron, électron-matière, etc...) qui font que cela n'est pas possible. Dans la prochaine partie nous expliciterons plus en détails ces phénomènes.

## ii. Les effets de la machine d'écriture à faisceau d'électrons

Pendant l'étape d'écriture ce sont les interactions électrons/matière qui permettent le transfert d'énergie du faisceau incident à la résine. Les réactions chimiques induites

conduisent ainsi à une modification de la solubilité de la résine. Bien qu'une telle technique permette une capacité de résolution très élevée par rapport à l'écriture utilisant une source laser, il existe des phénomènes qui en limitent ces capacités. Ces phénomènes peuvent être classés en deux catégories: celles induites par un mauvais traitement à partir de la colonne d'électrons et / ou du module VSB et celles résultant des interactions physiques. Les effets induits par un mauvais traitement ne seront pas abordés dans nos travaux puisqu'ils résultent de défauts de traitement propre à la machine. Les effets physiques impliqués [43] proviennent des interactions électrons/électrons et électrons/matière et sont décrites ci-après.

Les électrons du faisceau d'électrons sont soumis à des forces coulombiennes entre eux. Cela provoque un étalement du faisceau primaire incident pendant l'étape d'exposition de la résine. Les électrons pénétrant le solide interagissent avec le matériau et provoquent des phénomènes d'émission d'électrons et un rayonnement électromagnétique. Le rayonnement électromagnétique est composé principalement de rayons X caractéristiques, d'une émission continue " Bremsstrahlung " appelée aussi rayonnement de freinage et pour les matériaux diélectriques et les semi-conducteurs, on retrouve un rayonnement cathodo-luminescent. Les phénomènes qui nous intéressent particulièrement peuvent être classés en deux catégories:

- Les électrons dit transmis et rétrodiffusés,
- Les électrons secondaires et les électrons Auger.

Les électrons transmis et rétrodiffusés, dont les énergies sont proches de celles des électrons incidents, résultent d'interactions avec le noyau atomique, que l'on qualifie d'interactions élastiques. L'impact de ces électrons est minimisé lors du choix de la tension d'accélération. On retrouve l'influence de la tension d'accélération concernant les électrons transmis Figure 101 et rétrodiffusés Figure 102.

Le choix de la tension d'accélération à 50kV paraît être la plus appropriée. Cependant une des premières questions que l'on est amené à se poser est «pourquoi ne pas utiliser une tension d'accélération plus élevée?».

Il en résulterait un angle plus large au niveau des électrons rétrodiffusés, avec une énergie plus élevée et donc avec moins de contrôle des dimensions. Il faut également considérer qu'à plus haute énergie la stabilité du faisceau et le contrôle de la température sont beaucoup plus difficiles à maintenir. Ce choix final à 50kV est donc le meilleur compromis vis-à-vis des phénomènes décrits.

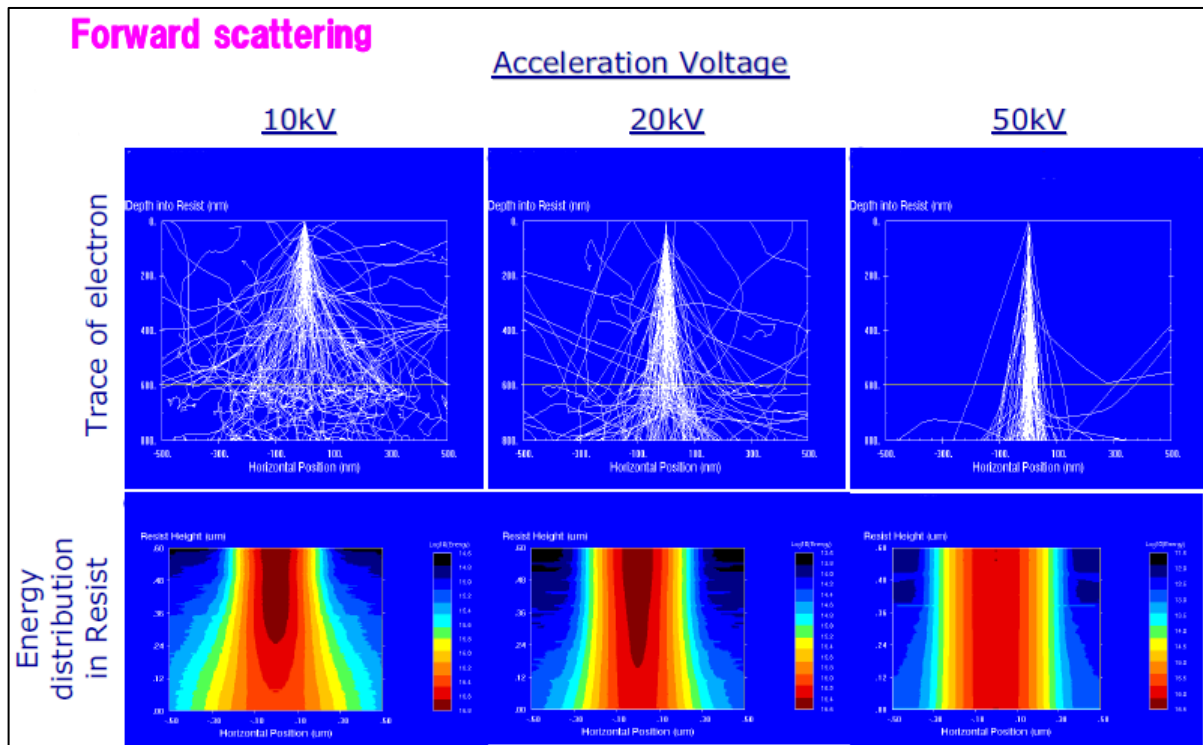


Figure 101 : influence de la tension d'accélération par rapport au phénomène d'électrons transmis. Influence de la tension d'accélération sur la distribution d'énergie dans la hauteur de résine.

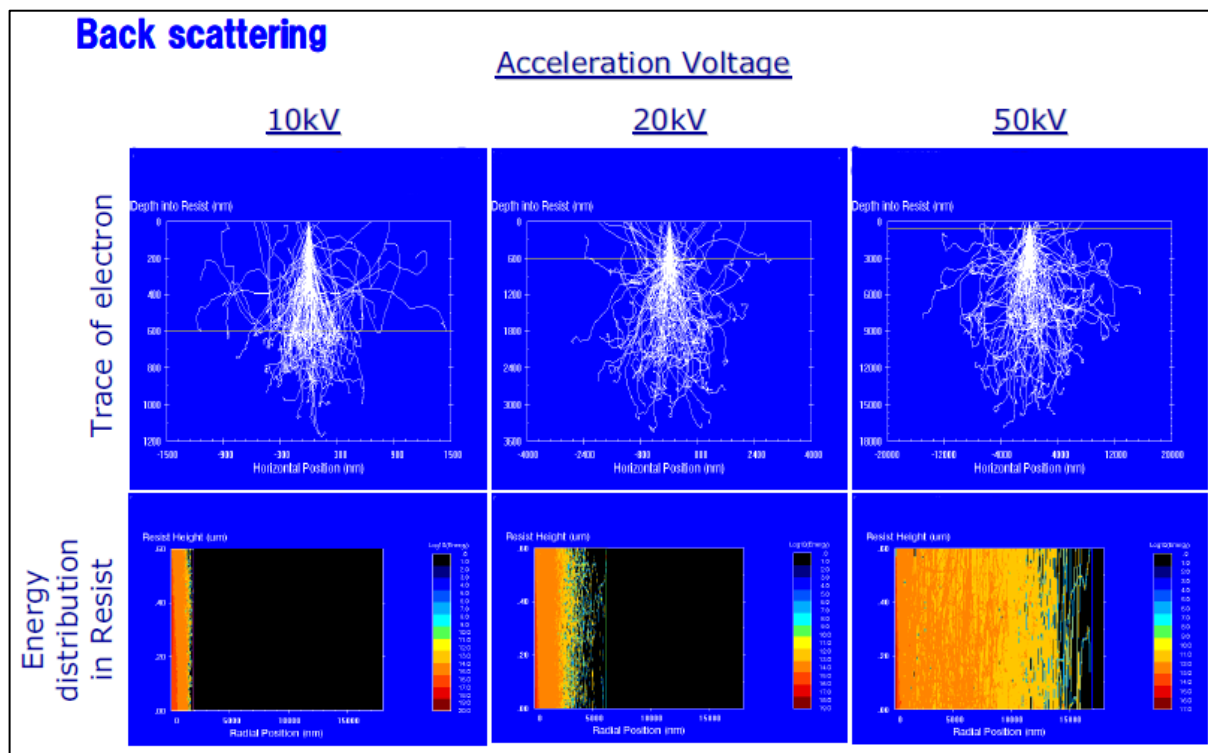


Figure 102 : influence de la tension d'accélération par rapport au phénomène d'électrons rétrodiffusés, obtenu via simulation basée sur la méthode de Monte-Carlo. Influence de la tension d'accélération sur la distribution d'énergie dans la hauteur de résine.



Parmi les autres interactions on retrouve les électrons secondaires et les électrons Auger, qui ont une énergie inférieure à celle des électrons rétrodiffusés. Ces interactions sont dites inélastiques et résultent de collisions entre le faisceau d'électrons incident et le matériau. Lorsque ces collisions se produisent, les électrons perdent une partie de leur énergie résultant en l'activation de la réaction chimique dans la résine. Les électrons Auger sont éjectés après ionisation et désexcitation des atomes. Les électrons secondaires eux sont des électrons de valence éjectés des atomes. La Figure 103 illustre les effets décrits.

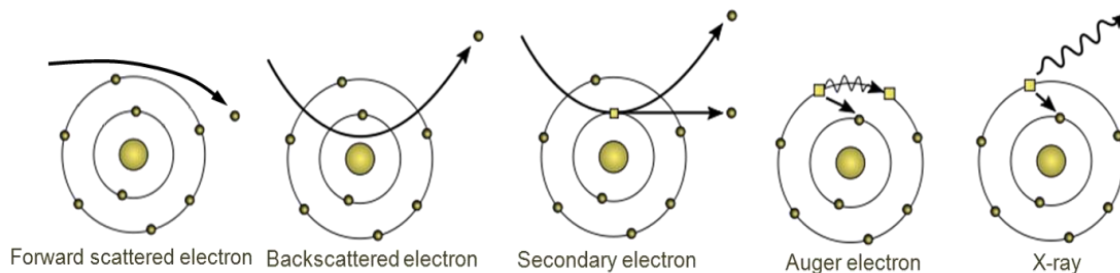


Figure 103 : Représentation des différents type d'interactions électrons / matière

Tous ces effets doivent être embarqués par notre modèle, cependant il est difficile de décorréler ces effets les uns des autres et il est impossible de créer un modèle physique permettant de simuler ces divers phénomènes. Cependant ils sont pris en compte en termes d'impact sur la dimension des motifs et corrigés en ajustant la dose d'exposition des différentes formes géométriques. Cette dose est ajustée en fonction du temps d'exposition sur la zone ciblée, pour une forme géométrique de base issue du module VSB.

### 3. La prise en compte des effets physiques lors de l'écriture sur réticule

Les Masks Shops corrigent les effets physiques liés aux phases d'écriture et de gravure en réalisant des modulations de dose. Ces corrections sont prises en compte non pas par rapport aux phénomènes physiques qui en sont la cause mais par les effets sur les dimensions des motifs à imprimer. D'un point de vue Mask Shop, on peut classer en trois catégories les corrections réalisées :

- Les corrections liées à la préparation de données
- Les corrections liées aux effets de la tension d'accélération du faisceau d'électrons primaire
- Les corrections liées aux effets de la technique de gravure.

Ces trois catégories sont détaillées dans les trois chapitres suivants.

#### a. Les effets liés à la préparation de données

On peut regrouper en deux sous catégories les effets liés à la préparation de données, le "Grid Snapping" et le "Scanfield Stitching". On retrouve ces deux effets sous leur appellation anglaise qui est à mon sens plus parlante que si on avait cherché à traduire ces termes.

##### i. Le "Grid Snapping" ou l'adaptation de la grille aux motifs

On retrouve l'effet "Grid Snapping" lors de la conversion des données du design au format MEBES, mais également lors de la conversion du format MEBES au format lié à la machine d'écriture. Comme décrit précédemment les motifs contenus dans le design sont un ensemble de polygones assemblés. Ces motifs sont définis sur une grille dont la taille du maillage est



très influente sur la qualité de la fracturation. Le respect de la taille des motifs lors de leur conversion en polygones est ce qui permettra de respecter l'uniformité CD et le bon placement de la structure vis-à-vis des motifs et polygones voisins. En effet, chaque polygone est défini par son centre, situé sur un point de la grille, et par une largeur de motifs, LM. La demi-valeur de la largeur du motif doit donc être un multiple du paramètre de maille afin que la largeur de part et d'autre du centre du polygone soit identique. Cette règle de placement est d'autant plus complexe à mettre en œuvre lorsque l'on considère les corrections apportées par l'OPC, ou encore lorsque les polygones contenus dans le design ne sont pas orthogonaux. La Figure 104 illustre la manière dont un polygone est défini sur une grille. Les erreurs vues lors de Grid Snapping concernent dans cet exemple les lignes non orthogonales définies à cheval sur certaines mailles de la grille.

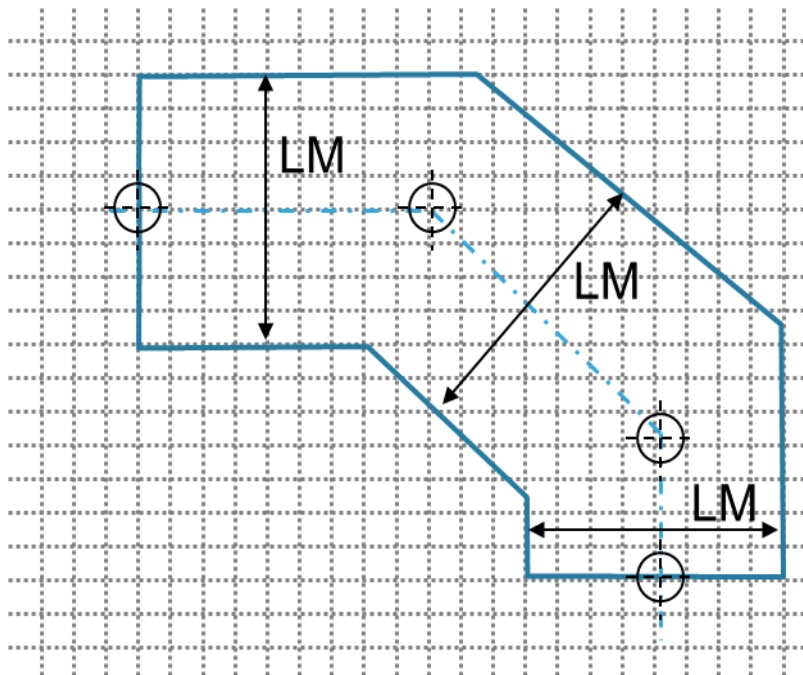


Figure 104 : Exemple de définition standard d'un polygone sur une grille via un set de coordonnées centrales et de largeurs de motifs LM

ii. Le "Scanfield Stitching" ou la superposition des motifs par rapport au champ d'exposition

La surface totale d'écriture est divisée en plusieurs zones que l'on appelle un champ. Le réticule est ensuite déplacé pour l'écriture d'un champ à l'autre et le faisceau dévié pour balayer toute la surface d'écriture du réticule qui contiendra le design. Le "Scanfield Stitching" diffère d'une machine d'écriture à l'autre. Cet effet intervient lors de la phase d'écriture avec le faisceau d'électron et dépend de la taille du champ d'exposition. Lorsque le design contenant les différents polygones est superposé à la cartographie contenant les différents champs, il est fréquent qu'un polygone se retrouve à cheval sur deux champs. Il existe alors différentes stratégies qui permettent dans ce genre de cas d'assurer à la fois l'écriture à la bonne dimension et le recoupement correct des motifs. Ces différentes stratégies sont établies en fonction de la capacité de la machine, de la qualité de la fracturation et de l'optimisation du temps d'écriture. Concernant la capacité de la machine d'écriture, les derniers modèles de machines, dont notamment celui concerné par notre étude, ont la capacité de modifier la taille du champ d'exposition en fonction des motifs qu'ils ont à écrire.

La machine doit également être capable de gérer le déplacement du réticule avec une très bonne précision afin que le polygone soit écrit en continuité d'un champ à l'autre. Enfin la dernière stratégie consiste à réaliser l'écriture du polygone à cheval sur deux champs d'exposition en deux temps. On étend ainsi un peu la zone du champ concerné sur le champ voisin puis on vient écrire le motif mais avec seulement 50% de la dose, les 50% de dose manquant étant réalisés lors de l'exposition du second champ (étendu également).

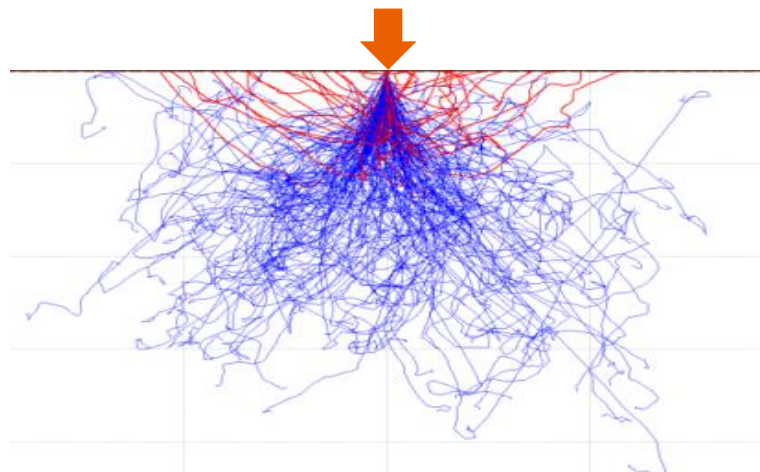
La première catégorie n'entre pas dans le cadre de notre étude et ne sera pas prise en compte dans notre modèle de réticule, dans la mesure où ce ne sont pas des effets que l'on peut corriger avec notre modèle de réticule au niveau IDM, mais corrigeable et corrigé par les Mask Shops. En revanche le Grid Snapping est un effet qui est présent lors de l'étape de fracturation réalisée à notre niveau lors de la conversion en format MEBES. Par ailleurs différents scripts permettent de vérifier que le Grid Snapping est évité, et il en est de même du côté des Mask Shops.

#### b. Les effets liés à la tension d'accélération du faisceau d'électrons primaires

La tension d'accélération retenue sur la plupart des machines d'écritures utilisant un faisceau d'électrons est de 50kV. Il reste cependant des effets sur la dimension des motifs inhérents à l'utilisation d'une telle technique d'écriture et que l'on doit corriger.

##### i. Les effets de proximité optique ou PEC

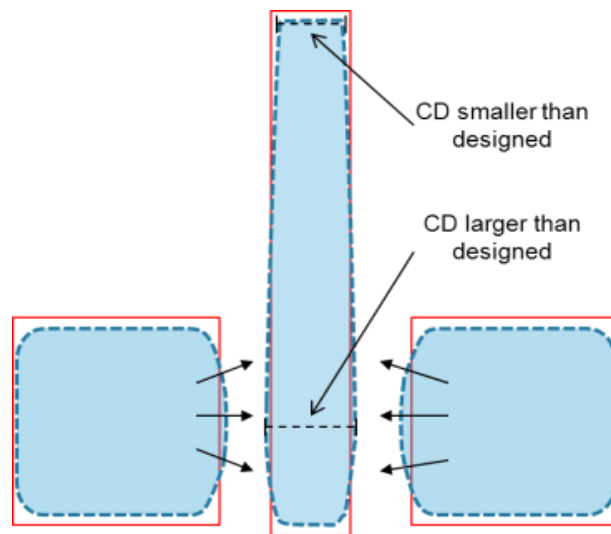
Les effets de proximité optique correspondent à la surexposition indésirable de motifs voisins lors de l'exposition d'un motif. La haute tension utilisée pour accélérer les électrons leur procure une énergie cinétique telle que, les électrons qui subissent une interaction élastique avec le noyau des atomes ont une trajectoire leur faisant prendre le sens opposé de leur direction initiale. La Figure 105 illustre la trajectoire des électrons lors de l'étape d'exposition utilisant une tension d'accélération de 50kV, via l'utilisation d'une simulation de MonteCarlo [44].



*Figure 105 : Illustration de la trajectoire des électrons lors de l'exposition utilisant une tension d'accélération de 50kV via l'utilisation d'une simulation de Monte-Carlo*

On retrouve en rouge la trajectoire des électrons dit rétrodiffusés et en bleu les électrons transmis. La distance d'interactions de ces électrons par rapport au point d'entrée est

directement lié à leur énergie cinétique et donc à la tension d'accélération, mais aussi fonction de la nature des matériaux qui composent le réticule. Ainsi plus le motif à écrire est dense, plus les effets de proximité sont importants. On retrouve Figure 106 l'effet sur la dimension des motifs que provoquent les effets de proximité.



*Figure 106 : Effets sur la dimension des motifs provoqués par les effets de proximité*

Les effets de proximité dépendent clairement de la densité des motifs à écrire sur le réticule et des caractéristiques du faisceau d'électrons. Pour corriger cet effet on réalise une convolution entre la cartographie représentant la densité de motifs et l'équation permettant de modéliser le comportement des électrons du faisceau. On utilise généralement la Fonction d'Étalement du Point ou PSF (acronyme anglais pour Point Spread Function) pour décrire la réponse d'un système optique à une source ponctuelle.

Pour les réticules à transmission optique (utilisés en lithographie UV profond) tels que celui utilisé pour notre étude, cette PSF est une combinaison de gaussiennes, dont chacune a pour objectif de modéliser un effet [45] [46]. On appellera ainsi 2G, 3G, ..., nG corrections la PSF que l'on utilisera pour réaliser la correction adaptée. En général on utilise une 2G ou 3G correction pour une machine d'écriture utilisant un faisceau d'électrons. La première gaussienne permet de modéliser le comportement des électrons diffusés, la deuxième et parfois la troisième sont utilisées pour décrire le comportement des électrons rétrodiffusés. Sur l'exemple de la Figure 107, on peut voir une PSF comportant trois gaussiennes, permettant de modéliser les différents comportements des électrons, en fonction de leurs distances au point d'impact du faisceau.

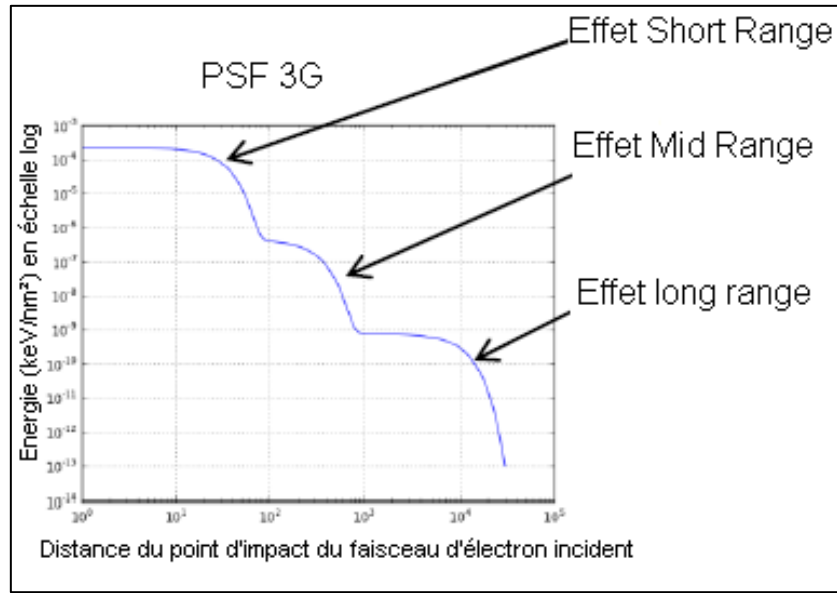


Figure 107 : Exemple de PSF comportant 3 Gaussiennes, permettant de prendre en compte le comportement des électrons à courte, moyenne et longue distance du point d'impact du faisceau d'électrons.

L'équation 37 permet de voir les différents paramètres à prendre en compte pour une modélisation utilisant une PSF-2G pour modéliser le comportement des électrons du faisceau incident (tel qu'il est réalisé en Mask Shop pour le type de réticule concerné par notre étude).

$$PSF(x) = \frac{1}{\pi(1+\eta)} \left( \frac{1}{\alpha^2} e^{-\frac{x^2}{\alpha^2}} + \frac{\eta}{\beta^2} e^{-\frac{x^2}{\beta^2}} \right) \quad \text{Equation 37}$$

Où :

- $\alpha$  la largeur du rayonnement direct
- $\beta$  la largeur de rétrodiffusion
- $\eta$  le ratio des intensités des rayonnements directs et rétrodiffusés
- $x$  est la position radiale d'un point à partir du point d'entrée du faisceau incident.

Pour une nG PSF l'équation 37 serait la suivante :

$$PSF(x) = \frac{1}{\pi(1+\sum \eta_i)} \left( \frac{1}{\alpha^2} e^{-\frac{x^2}{\alpha^2}} + \sum \frac{\eta_i}{\beta_i^2} e^{-\frac{x^2}{\beta_i^2}} \right) \quad \text{Equation 38}$$

Les valeurs des paramètres  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\eta$  sont déterminées expérimentalement pour un procédé donné (machine d'écriture et empilement utilisés). A titre d'information, pour notre étude la valeur respective des paramètres  $\alpha$ ,  $\beta$  est d'environ 0,05 $\mu\text{m}$  et 10 $\mu\text{m}$ . La proportion d'électrons rétrodiffusés qui contribue aux effets de proximité optique est donc 20 fois plus importante que pour les électrons transmis.



Une fois le comportement des électrons modélisé, il est maintenant possible d'effectuer la correction. Cette correction est réalisée en effectuant une modulation de dose et consiste à injecter plus ou moins d'électrons dans les motifs fortement soumis à des expositions parasites. C'est le cas des structures denses qui recevront moins d'électrons à l'inverse des structures isolées qui elles recevront une dose plus importante. Cette modulation de dose est réalisée non pas grâce à un changement de l'intensité du faisceau, mais par modification du temps d'exposition. En combinant la PSF qui contient le comportement des électrons à travers les coefficients  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\eta$  avec une cartographie de la densité de motifs que l'on souhaite graver, Figure 108 (a) et (b), on obtient par exemple les cartographies que l'on peut voir Figure 109.

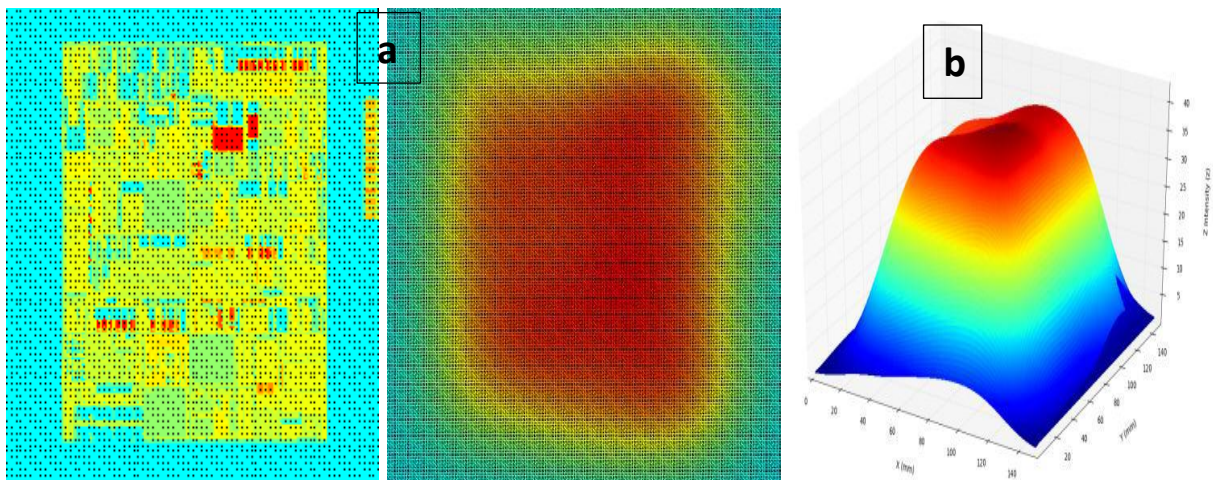


Figure 108 : Cartographie de densité de motif 2D(a) et 3D(b)

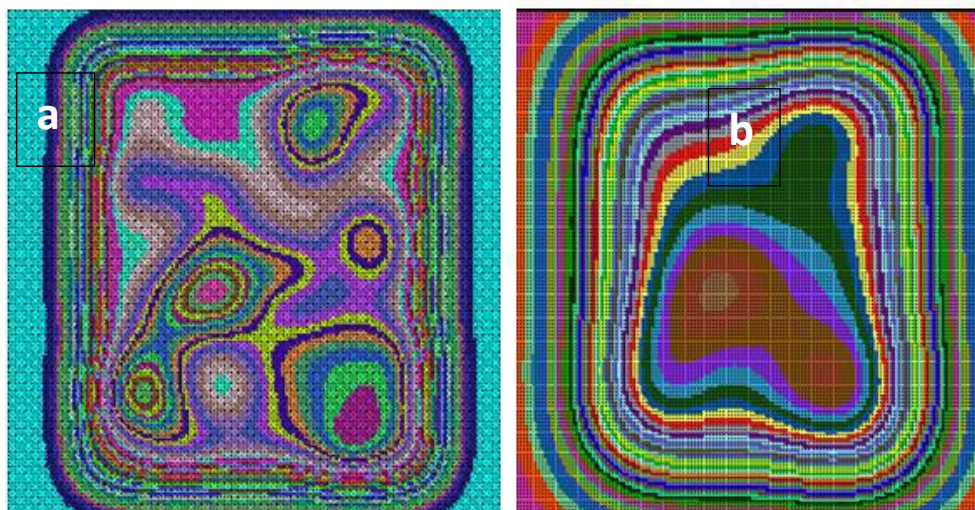
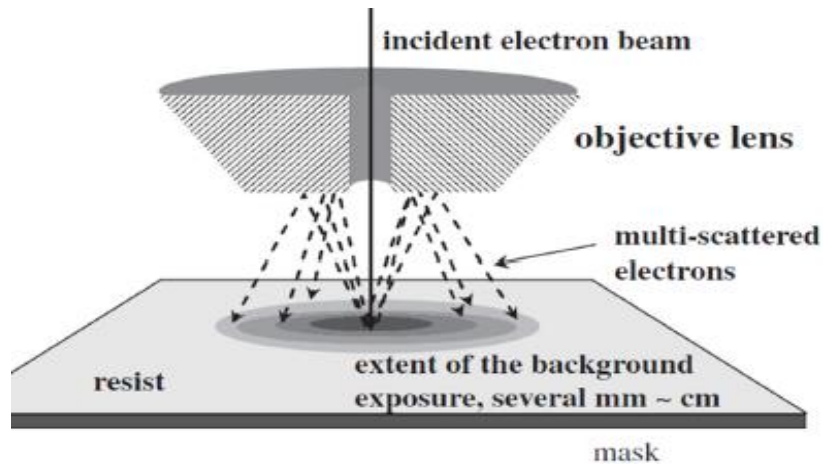


Figure 109 : Résultats de convolution entre une PSF et la cartographie de densité de motifs, permettant de visualiser la modulation de dose. Entre la figure a et b on a simplement réalisé un échantillonnage pour la cartographie de la densité des motifs moins agressifs.

La cartographie des zones iso-doses obtenues représente la correction des effets de proximité via modulation de dose à appliquer pour l'écriture des motifs dans la résine. Ce calcul est réalisé pendant l'écriture via le système EWS et le niveau de dose calculé s'applique pour une zone carré de  $2\mu\text{m}$  de côté.

## ii. Les effets de nuage électronique ou FEC

On retrouve dans la littérature la correction de l'effet de nuage électronique sous son appellation anglaise Fogging Effect Correction (FEC)[47]. Cet effet concerne les électrons qui pénètrent peu dans la résine, et ressortent pour entrer en collision avec l'objectif final de la colonne du faisceau d'électrons avant de rebondir et d'exposer des motifs situés à plusieurs millimètres voir quelques centimètres du point d'impact visé, comme l'illustre la Figure 110.



Source: T. Abe et al., Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 46, No. 6A (2007)

Figure 110 : Illustration du Fogging Effect ou nuage électronique lors de l'étape d'écriture du réticule

Plus la densité de motifs d'une zone est élevée, plus le faisceau s'attardera sur cette zone et d'autant plus d'électrons rebondiront de cette zone. Cet effet dépend donc lui aussi de la densité de motifs. Afin de limiter les effets de ces électrons, un disque anti réfléchit est placé sous la dernière lentille de l'objectif comme illustré Figure 111.

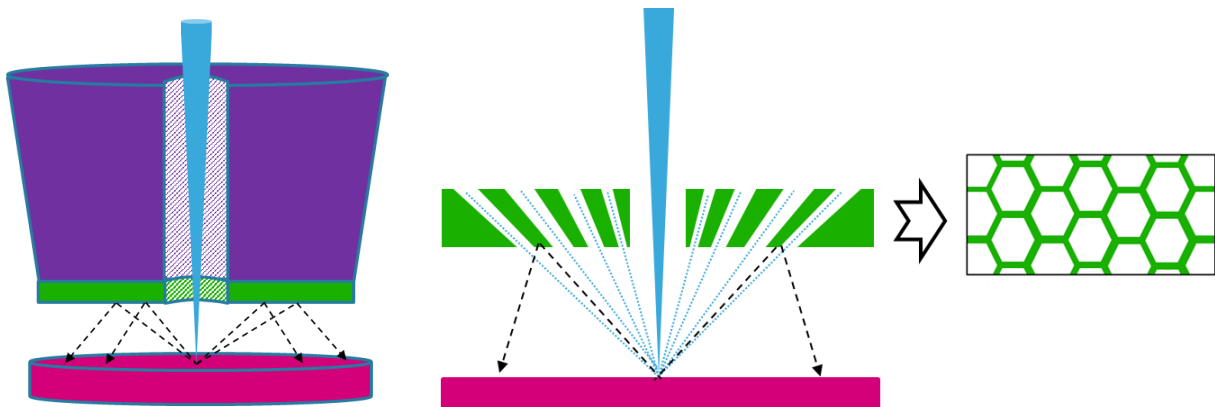


Figure 111 : Principe du dispositif anti-réfléctif placé sous la dernière lentille de l'objectif de la machine d'écriture

Le matériau utilisé pour l'élaboration du disque anti réfléchit peut être en Carbone ou en Béryllium [48], choisi pour leur faible numéro atomique et donc pour une faible interaction avec les électrons rétrodiffusés. De plus, la structure du disque est de type alvéolaire afin de limiter également l'effet fogging. Bien que l'ajout de ce disque antireflet limite l'effet fogging, on utilise également une correction via modulation de dose. Etant donné que l'effet fogging

dépend de la tension d'accélération et du blank utilisé, il est calibré une fois puis on réutilise la même cartographie iso-dose pour la correction lorsque l'on utilise la même machine d'écriture, le même blank et la même résine. L'effet Fogging est calibré avec une structure spécifique comme illustré Figure 112, réparti quatre fois à la surface du réticule et sur laquelle plusieurs points sont mesurés.

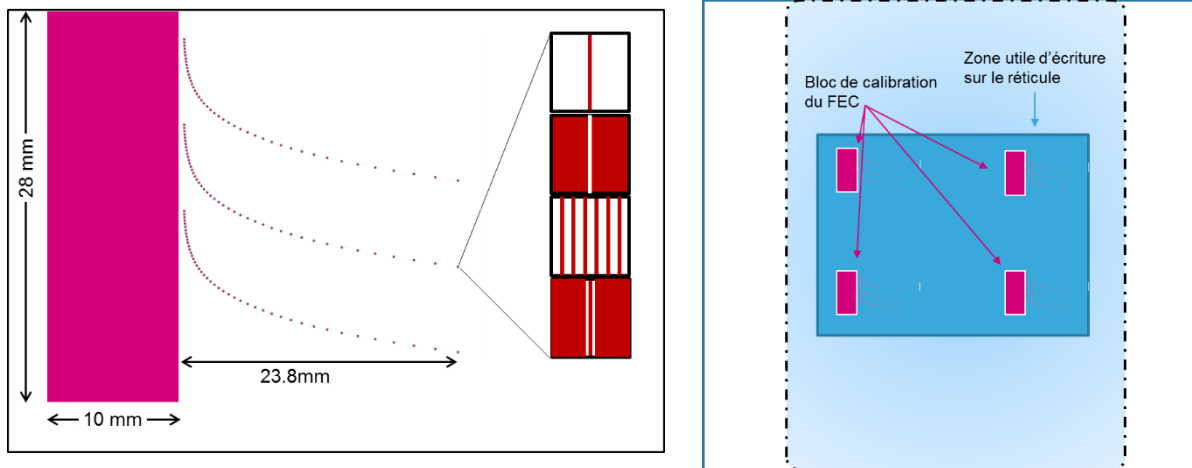


Figure 112 : Bloc de calibration contenant quatre structures de mesures réparties dans chaque coin de la zone utile sur réticule.

La cartographie des zones iso-dose est semblable à celle obtenue pour la correction des effets de proximité mais le niveau de dose calculé s'applique pour une zone carré de 1mm de côté pour le NUFLARE 8000 [49].

Les cartographies représentant les zones iso-dose pour la correction des effets de proximité optique et des effets de nuage électronique sont ensuite couplées pour obtenir la dose à appliquer à chaque pulse.

### iii. L'élargissement du faisceau incident ou Beam Blur

Lorsque les électrons sont émis par la source, leur charge respective provoque des forces de répulsions et d'attractions (interactions Coulombiennes) qui induisent un élargissement du faisceau incident. Cet élargissement est proportionnel à  $IL/V^{3/2}$ , où  $I$  est l'intensité du courant de la source,  $L$  la longueur du trajet optique et  $V$  la tension d'accélération. L'augmentation de l'intensité de courant permet une meilleure cadence de production mais conduit à augmenter l'effet d'élargissement du faisceau, et donc à diminuer la résolution. Etant donné que la phase d'écriture doit se faire à résolution constante, on travaille à intensité de courant constante. On retrouve dans la littérature cet effet sous sa dénomination anglaise "beam blur" [50] [51]. Ces effets ont un impact à courte distance et on retrouve une densité de distribution du faisceau d'électrons représenté par une gaussienne avec un  $\sigma$  caractéristique de 10nm, comme illustré sur la Figure 113.

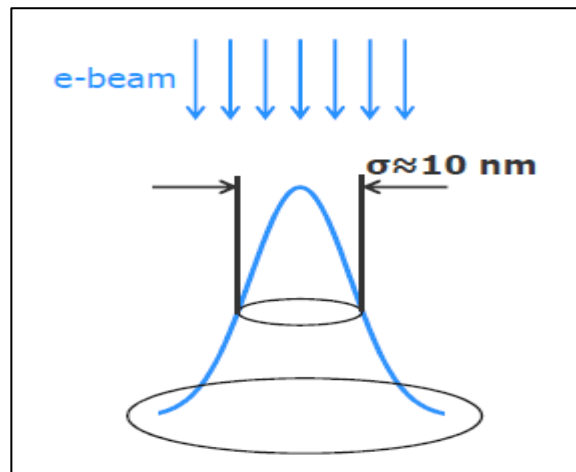


Figure 113 : Gaussienne représentative de la dispersion des électrons impliqués dans l'effet beam blur. On définit ainsi à 10nm l'influence du beam blur autour du point d'impact.

En utilisant le module VSB, les extrémités des polygones projetés sur la résine du réticule seront directement affectées par le beam blur. Cet impact se traduit par une variation de focus aux flancs de chaque polygone projeté sur la résine du réticule comme illustré à droite sur la Figure 114 ci-dessous:

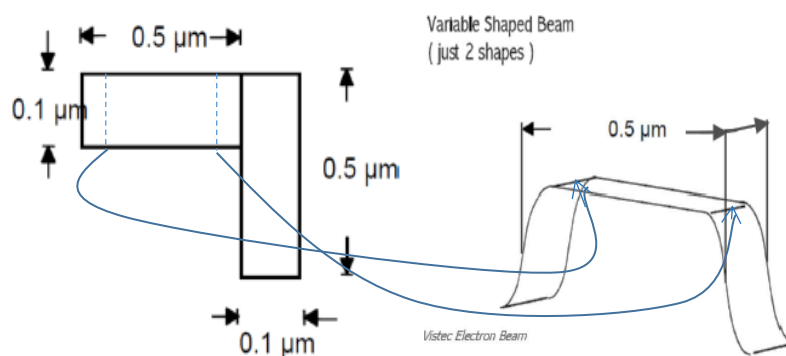


Figure 114 : A Gauche : exemple de polygones permettant d'obtenir une forme complexe. A droite, variation de focus aux extrémités d'un polygone. Source : Mentor Graphics

Cet effet n'est pas corrigé par la MaskShop et devra être pris en compte dans notre modèle. Le nombre de modulations de dose utilisable dépend en revanche de la machine d'écriture utilisée. Le NUFLARE 8000 [49], utilisé pour l'écriture de notre réticule dispose de 16 niveaux d'énergie différents.

### c. Les effets de charge liés à la phase d'écriture et à la technique de gravure.

Une fois les réticules exposés et développés, on passe à l'étape de gravure. La technique de gravure utilisée est celle par plasma. L'utilisation de cette technique de gravure induit un phénomène d'effets de charge, ou Loading Effect en anglais. Un plasma est composé d'électrons et d'ions. Les électrons et les ions sont ensuite accélérés pour entrer en collision



avec le matériau à graver. De ces collisions inélastiques résulte un arrachement de matière et donc la gravure recherchée. Or les électrons et les ions ne sont pas accélérés à la même vitesse, et dans la pratique la distribution en vitesse des électrons est isotrope alors que celle des ions est anisotrope. Les électrons n'atteignent donc pas le fond des motifs à graver et s'accumulent à la surface de la résine mais aussi sur les flancs des motifs transférés dans la résine. Les ions eux atteignent le fond des structures, qui va au fur et à mesure de la gravure se charger positivement. En résulte un champ électrique qui va repousser les ions et dévier leur trajectoire vers les parois du réacteur. C'est ce que l'on appelle un effet de charge. On retrouve également cet effet de charge lors de la phase d'écriture du réticule où les électrons vont rester piégés à la surface de la résine. De même, cela aura pour conséquence de dévier les ions de leurs trajectoires lors de la phase de gravure.

De ces effets de charges induits pendant les phases d'écriture et de gravure résulte une non-uniformité CD, corrigée également via une modulation de dose lors de la phase d'écriture sur le même principe que la correction des effets de proximité. Le modèle de correction est également calibré via l'utilisation d'un réticule dédié permettant de modéliser le comportement des électrons impliqués. En général on utilise les mêmes structures de calibrations que celles décrites Figure 112 pour la calibration du Loading Effect.

On réalise ensuite un produit de convolution entre la cartographie représentant la densité de motifs et la fonction mathématique qui modélise le comportement des électrons. On couple également la cartographie iso-dose obtenue avec celle des effets de proximité.

#### d. Conclusion

Parmi les effets impliqués lors des phases de préparations de données, d'écriture et de gravure d'un réticule, certaines sont prises en compte côté Mask Shops alors que d'autres le sont à notre niveau (IDM). Les effets induits lors de la préparation de données ne seront pas prises dans notre modèle dans la mesure où l'on ne peut simuler ces effets.

Concernant les effets physiques liés à la tension d'accélération du faisceau primaire incident et les effets liés à la phase de gravure, nous avons pu voir que certains d'entre eux sont corrigés et d'autres pas, comme notamment l'effet "Beam Blur".

On peut classer ces effets selon trois catégories, et on retrouve ainsi les effets longues distances ou "long range effects", les effets courtes distances ou "Short range effects" et les effets très courtes distances ou "very short range effects". On retrouve dans la Table 10 et la Figure 115 un résumé et une illustration des différents effets physiques évoqués dans cette partie C.I.3.

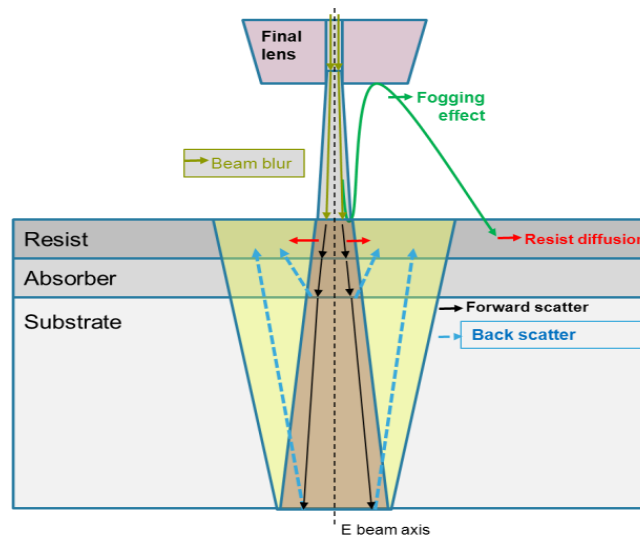


Figure 115 : Schéma représentatif de tous les effets impliqués lors des phases d'écriture et de gravure du réticule

Range	Effects	Interaction range	Potential CD change
Long Range	Fogging	mm to cm	10 to 40 nm
	Etch Loading	mm	20nm
	Develop Loading	mm	20nm
Short Range	Backscatter electron (substrate)	10 to 20 $\mu$ m	<50 nm
	Backscatter electron (absorber)	<5 $\mu$ m	
	Micro Loading	<2 $\mu$ m	20nm
Very Short Range	Diffusion in resist	<100nm	Resist type dependent
	Forward Scatter electron	<200nm	< 25 nm
	Ebeam blur	20-30nm	< 25 nm

Table 10 : Résumé des effets impliqués lors des phases d'écriture et de gravure, et leurs distances d'interaction respectives

Il est également important de noter que toutes les corrections apportées en Mask Shop ne sont réalisées que via modulation de dose. Etant donné que les niveaux avancés comportent des modifications OPC, il est difficile pour la Mask Shop de prendre le risque et la responsabilité de modifier les motifs contenus dans la design. On comprend bien qu'en cas de problèmes lors de l'exposition du réticule sur plaquette, il serait difficile de déterminer laquelle des corrections apportées est en cause. Cependant les Mask Shops réalisent ce qu'elles appellent un "Special Data Treatment " pour les SRAFs uniquement. Ce traitement spécifique consiste à modifier géométriquement coté Mask Shop les motifs impactés. Pour rappel les SRAFs sont des motifs diffractant d'aide à la résolution non résolus, il n'y aura donc peu de risque d'impression au niveau de la plaquette.

Cependant l'évolution des technologies tend vers une diminution des dimensions caractéristiques et on constate que la simple modulation de dose atteindra d'ici peu sa limite comme illustré sur la Figure 116.

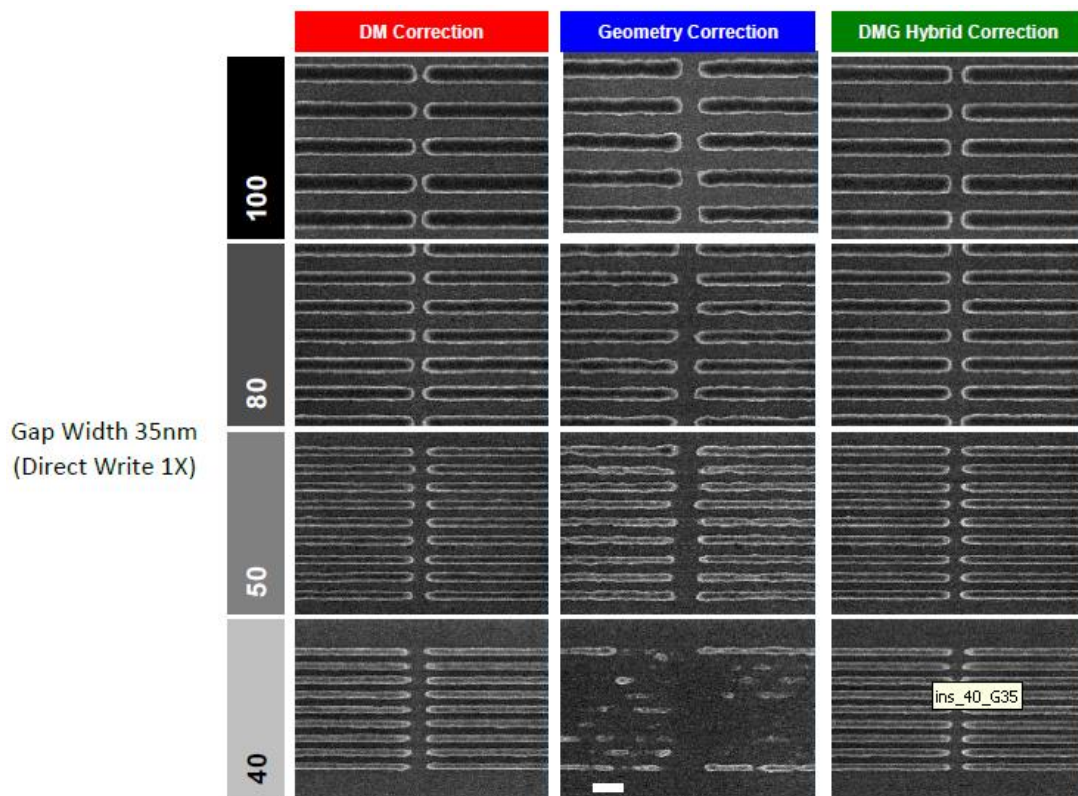


Figure 116 : Comparaison des différentes méthodes de corrections à partir d'images obtenues pour quatre structures de type Line-End to Line-End. A gauche les structures ayant subi une simple modulation de dose (DM), au centre les structures ayant subi correction géométrique seulement et à droite les structures ayant subi une modulation de dose et correction géométrique (DMG).

Il est clair que la simple correction basée sur des corrections géométriques n'est plus suffisante. La modulation de dose commence elle aussi à montrer ses limites en ce qui concerne les effets d'arrondissement de coin et de raccourcissement de fin de ligne. Afin de conserver la qualité d'écriture sur réticule nécessaire pour les nœuds technologiques avancés, il est alors nécessaire d'introduire une méthode de correction hybride mêlant à la fois modulation de dose et corrections géométriques. Le modèle de réticule que l'on se propose de créer et de tester doit précisément permettre de répondre à cette évolution et apporter les corrections géométriques nécessaires à l'amélioration de la résolution, en complément des corrections via modulations de doses apportées par la Mask Shop.

Dans la prochaine partie nous aborderons la calibration de notre modèle de réticule, qui prendra en compte de manière plus précise les effets "Very Short Range".

#### 4. La calibration du modèle de réticule

L'utilisation d'un modèle de réticule est donc le moyen qui permettra d'améliorer la résolution sur réticule [52] et donc la fidélité des motifs sur plaquette par rapport au design de départ. Aujourd'hui c'est dans le modèle résine que se retrouvent embarqués et corrigés de manière géométrique les effets des réticules [53]. Dans un premier temps nous allons d'abord calibrer les effets que l'on souhaite prendre en compte dans notre modèle. Ce travail de calibration sera scindé en trois étapes principales : le choix de nos structures de calibration, les protocoles spécifiques à notre étude mis en places pour les phases "d'écriture et gravure" et de

“mesure” et enfin, la création du modèle proprement dit. Pour cette partie nous avons travaillé en étroite collaboration avec MENTOR GRAPHICS, société spécialisée notamment dans les logiciels de corrections OPC.

#### a. Les structures de calibration

Chaque machine d’écriture possède sa propre signature qui dépend à la fois de sa plateforme logicielle et de ses caractéristiques techniques. On retrouvera également un comportement qui diffère selon la résine utilisée (positive ou négative) et selon le type de blank utilisé. Au final un modèle de réticule ne sera valable que pour un type de blank, un type de résine et une machine d’écriture en particulier. Si l’un de ces trois éléments venait à changer, le modèle de réticule calibré ne sera plus valable. Concernant notre étude, nous avons utilisé une résine à amplification chimique négative appelée SEBN, un réticule de type MBX fabriqué par HOYA et exposé sur le NUFLARE 8000 chez DNPJ. Notre modèle de réticule est développé pour un niveau de type GATE pour notre technologie FD-SOI 14nm. Les structures embarquées sont essentiellement des structures 2D permettant d’évaluer les distances entre bouts de lignes et entre bouts d’espace. Ainsi un réticule dédié pour cet exercice de calibration a été commandé.

Ce réticule dédié contient trois blocs. Le bloc principal est dédié à la calibration proprement dite. On retrouve Figure 117 une vue d’ensemble des motifs embarqués sur notre réticule.

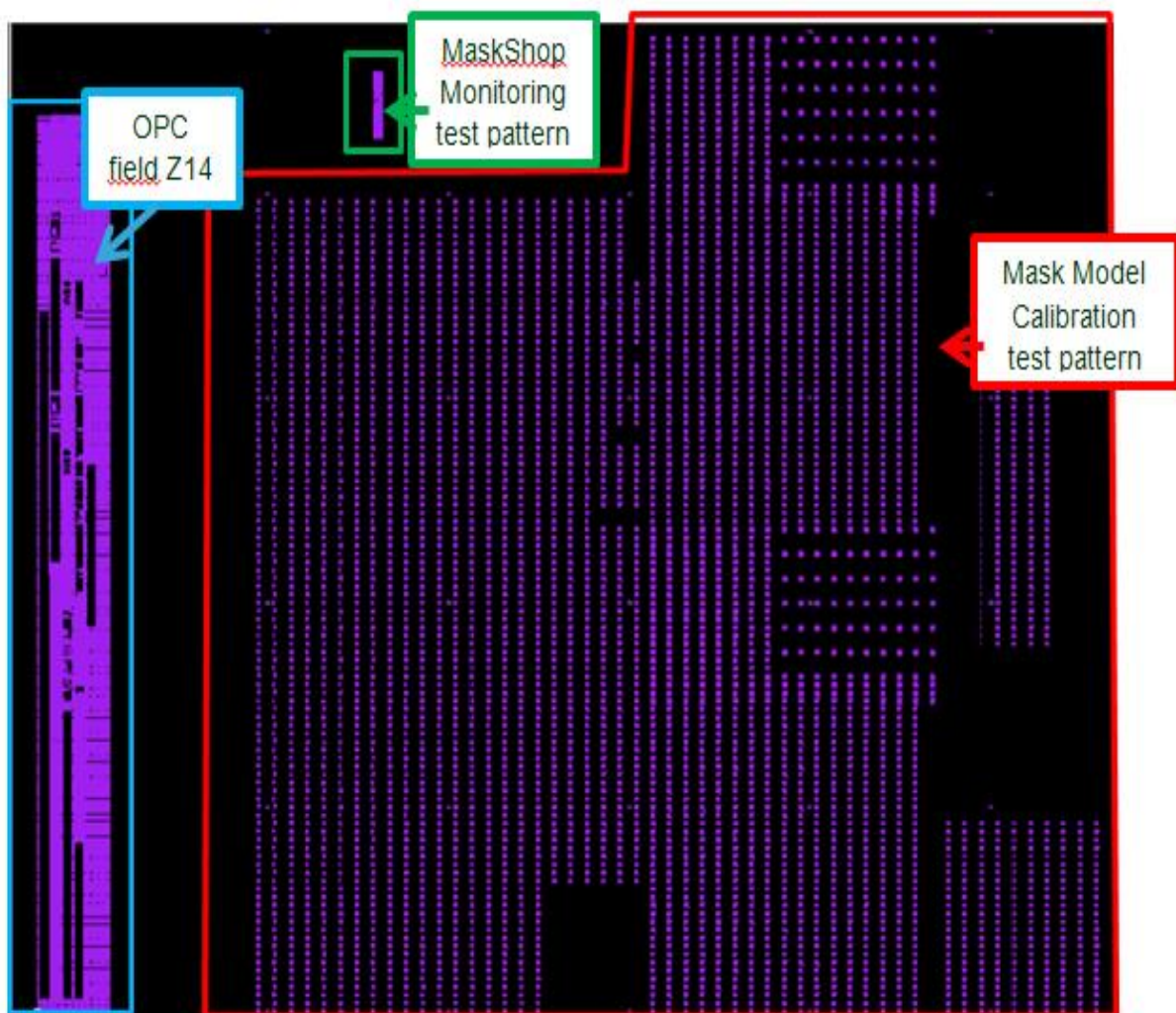


Figure 117 : Vue d’ensemble des trois blocs de motifs embarqués sur le réticule de calibration

Dans le bloc dédié à la calibration de notre modèle que l'on appelle "Mask Model Calibration Test Pattern" dans la figure précédente, on retrouve des structures de type "fin de ligne", "fin d'espace", "contact", "contact long" et "ligne & espace". On retrouve ces différentes structures Figure 118.

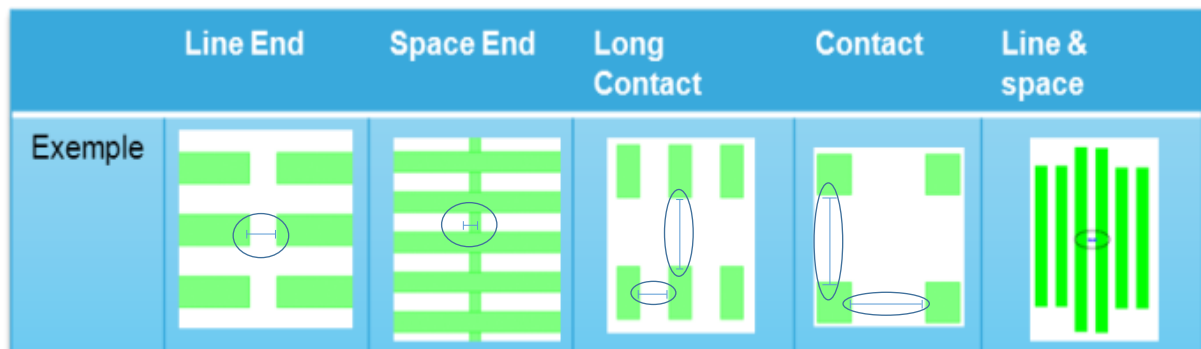


Figure 118 : Configuration des structures de calibrations contenues dans le bloc "Mask Model Calibration Test Pattern"

Ces structures ont été dessinées en faisant varier l'orientation (horizontale et verticale), le pas de réseau, la densité et la polarité (positive ou négative). Pour des considérations statistiques les structures ont été répétées quatre fois dans ce bloc. Ce sont au total plus de 2500 structures qui composent ce bloc dédié à la calibration.

Le second bloc, appelé "MaskShop Monitoring test pattern" a été développé spécifiquement pour s'assurer de la stabilité de la phase d'écriture en Mask Shop et aucune correction géométrique n'a été apportée sur ce bloc. Son objectif est d'apprécier la stabilité du Process d'écriture et de gravure de la Mask Shop. De ce fait il sera toujours embarqué quel que soit le modèle à calibrer et permettra de s'assurer qu'aucune modification majeure dans le Process de la Mask Shop n'est venue perturber son écriture, par rapport à une référence.

Le troisième bloc est ce que l'on appelle "l'OPC field", et comporte un ensemble de structures permettant de calibrer les modèles OPC. Celles-ci, bien connues et embarquées pour chaque niveau ayant besoin de correction des effets de proximité, nous permettent d'avoir la garantie d'avoir des motifs résolus pour la calibration d'un modèle OPC. Nous détaillerons au chapitre D.III les raisons pour lesquelles nous avons embarqué ce bloc.

Enfin un bloc permettant de vérifier l'uniformité CD sur réticule a été réparti et répété 30 fois, sur la base d'une grille de 6 x 6. L'uniformité CD sera contrôlée sur une structure de type ligne isolée et mesurée 150 fois. On retrouve Figure 119 le détail concernant ce bloc de structures.

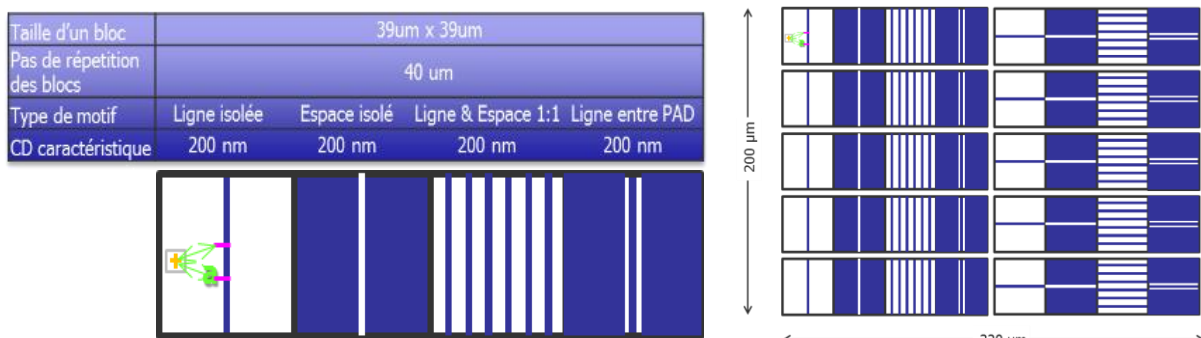


Figure 119 : Caractéristiques du bloc de structures permettant de vérifier l'uniformité CD à la surface du réticule.



### b. Le protocole d'écriture et de mesure

Notre design est ensuite fracturé et codé en format MEBES pour la transmission à la Mask Shop. Une image du réticule est présentée Figure 120. Nous avons ensuite transmis des consignes précises à la Mask Shop pour la fabrication de ce réticule, via deux protocoles dédiés respectivement aux phases "d'écriture et gravure" et de "mesures". Concernant la phase d'écriture et de gravure nous avons demandé à la Mask Shop d'activer toutes les corrections via modulations de dose (PEC, FEC, LEC) ainsi que la correction des erreurs de positionnements. En revanche toutes les corrections impliquant des corrections géométriques, tels que le "Special Data Treatment", ont été désactivées. En effet notre modèle de réticule devra être capable de réaliser ces corrections, et il ne sera possible de capter ces erreurs que si elles ne sont pas corrigées.

Concernant la phase de mesure, d'ordinaire seulement quelques points permettant de contrôler l'uniformité CD et la mesure du MESDIM sont mesurés.

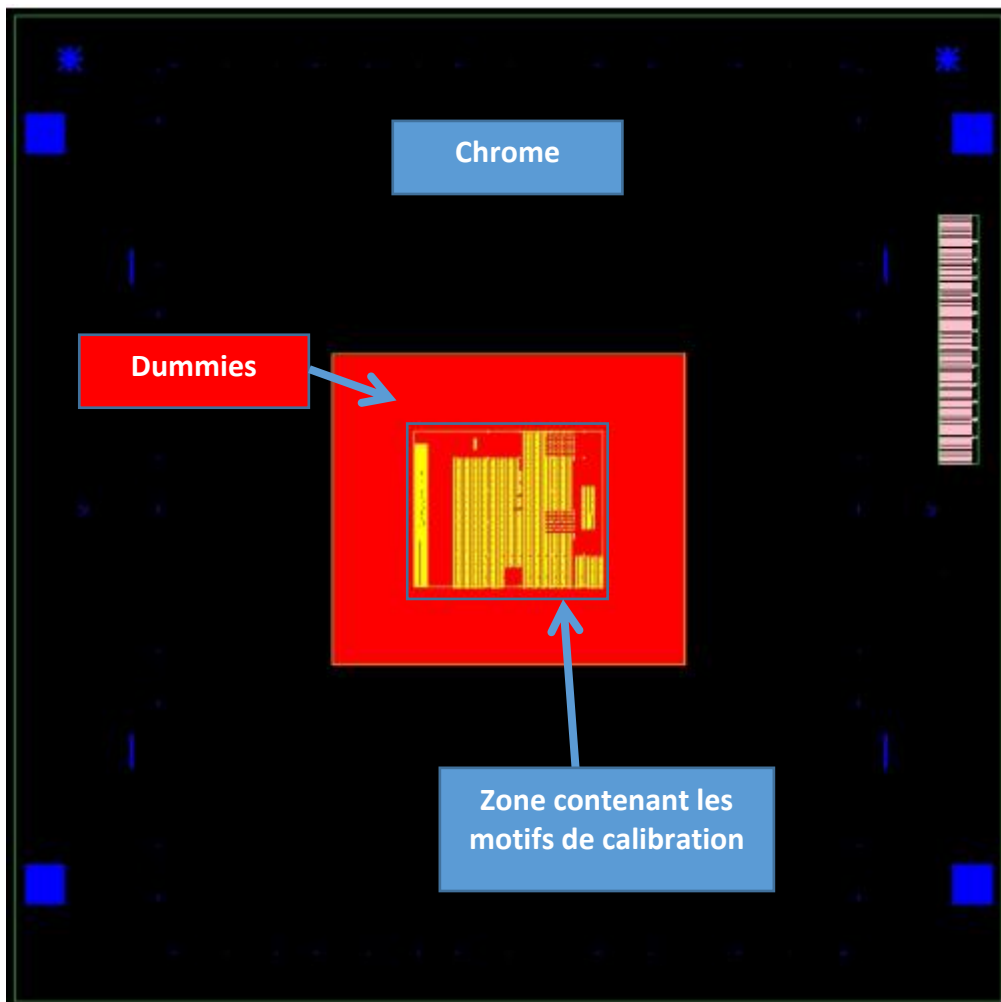


Figure 120 : Image du réticule final envoyé à la Mask Shop pour les phases d'écriture, de gravure et de mesure.

Un tableau contenant le nom de chaque structure, la valeur de la dimension nominale à mesurer, les coordonnées x et y du point de mesure, la direction de la mesure et la polarité ont été envoyées avec le design fracturé. On retrouve Figure 121 un extrait de ce tableau. Toutes

les valeurs sont spécifiées non pas à l'échelle du réticule mais à celle de la plaquette. Pour rappel les motifs sur le réticule sont écrits avec un facteur 4.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1		Nominal nm @1X	Center X nm @1X	Center Y nm @1X	Feature Polarity	Direction	Struct_Name	SEM Picture FOV at 2,5µm x 2,5µm @4X	SEM Picture FOV at 1.5 µm x 1.5µm @4X
2	1	49,3	1566425	17550	D	X	CDcontr_2_200_5000_1	x	x
3	2	49,325	1571425	17550	D	X	CDcontr_2_200_5000_2	x	
4	3	49,325	1576425	17550	D	X	CDcontr_2_200_5000_3	x	
5	4	49,3	1581425	17550	D	X	CDcontr_2_200_5000_4	x	
6	5	49,3	1586425	17550	D	X	CDcontr_2_200_5000_5	x	
7	6	49,325	2803925	17550	D	X	CDcontr_2_200_5000_6	x	
8	7	49,325	2808925	17550	D	X	CDcontr_2_200_5000_7	x	

Figure 121 : Extrait du tableau contenant les points de mesure réalisés par la MaskShop

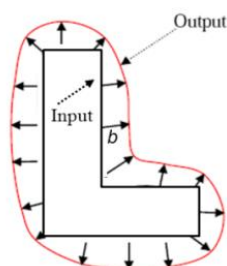
### c. La création du modèle et validation

Pour information, nous avons reçu le réticule et les mesures un mois après avoir envoyé les datas à la Mask Shop. Ce réticule a coûté un peu plus de 30 000 dollars étant donné qu'il était dédié à faire de la recherche. Un réticule de même type dédié à la production et fabriqué avec le même protocole coûte environ 170 000 dollars. Le logiciel utilisé pour la calibration de notre modèle de réticule est MPC Center (Mask Process Correction Center) que l'on retrouve sur la plateforme CalibreWorkbench de la société MENTOR GRAPHICS. Nous commencerons par décrire l'outil utilisé pour la calibration, ainsi que le processus de calibration dans une première partie. En seconde partie nous présenterons les résultats obtenus après avoir vérifié la qualité de la phase d'écriture. Enfin nous présenterons les résultats du modèle obtenu.

#### i. Description de l'outil de calibration MPC Center et du processus de calibration

Le modèle de réticule est composé de deux sous modèles, le modèle Ebeam et le modèle VEB (Variable Etch Bias) [54] [55]. Le modèle ebeam permet de modéliser les effets du faisceau d'électrons et utilise une fonction d'étalement du point basée sur l'utilisation d'une combinaison linéaire de gaussiennes [60]. Le modèle VEB est une extension du modèle résine utilisé pour la calibration de modèle OPC qui permet de modéliser les étapes de développement et/ou de gravure sur plaquette. Le modèle VEB repère les sommets des différents polygones puis calcule le biais  $b$  entre le polygone et le contour simulé en utilisant des convolutions de l'image aérienne avec des fonctions noyaux de type Gaussien (Gaussian Shifted Kernels) ou de formes semi-circulaires (Visible Kernels). On peut notamment considérer, pour la modélisation des phénomènes de diffusions, une ou plusieurs convolution(s) avec des fonctions noyaux d'écart-types différents.

Le biais varie selon le contour et est déterminé par une fonction polynômiale  $b$  tel que :



$$b = a_0 + \sum_{i=1}^M a_i D_i(s_i u_i; x, y) \quad \text{Equation 39}$$

Où :

- $b$  est le biais représentant l'écart entre le polygone et le contour simulé
- $a_i$  les coefficients issus de la calibration
- $D_i$  sont les produits de convolution entre l'image aérienne et les noyaux gaussiens et/ou visibles, exprimé en fonction de la distance de diffusion  $s_i$ , du vecteur de décalage du centre de la gaussienne par rapport au sommet, et des coordonnées  $(x, y)$  du point d'évaluation, comme illustré Figure 122.

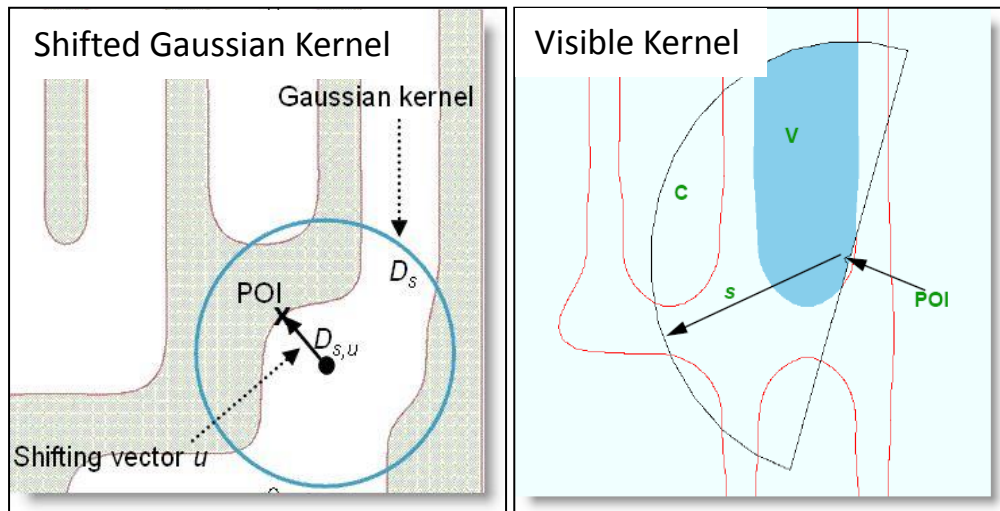


Figure 122 : Description des noyaux Gaussiens (à gauche) et Visible (à droite)

Les noyaux gaussiens permettent de prendre en compte les effets liés à la densité de motifs alors que les noyaux visibles permettent de prendre en compte les effets des motifs voisins sur le motif considéré, et permettent de traduire son comportement vis-à-vis de son environnement. Dans la pratique on utilise un seul noyau visible mais plusieurs noyaux gaussiens.

Ensuite un nombre d'itérations est fixé pour trouver les termes  $b$  associés à notre modèle.

Le processus de calibration peut se décomposer en quatre étapes principales comme décrit dans le diagramme Figure 123.



Figure 123 : Processus de calibration du modèle de réticule

La partie pré-analyse, permet de retirer les points pour lesquels la mesure a été mal prise par rapport aux images obtenues sur SEM, ainsi que les points à la limite du procédé d'écriture et de gravure. La partie "Filtrage des points de mesures" permet de remplacer les points de mesures répétés par leur moyenne arithmétique, et de retirer les points dont la dispersion est supérieure à trois fois l'écart-type. La partie Analyse permet de choisir le nombre de composantes initiales de chaque sous modèle et le type de ces sous modèles. Enfin l'étape de calibration permet de créer le modèle, d'en vérifier la précision en superposant les contours simulés avec les images SEM et d'en vérifier la prédictibilité en ajustant les composantes du modèle si besoin. Nous avons commencé la première itération en partant du modèle le plus



simple pour terminer par un modèle contenant pour le modèle ebeam deux composantes gaussiennes et pour le modèle VEB deux composantes gaussiennes et deux composantes visibles.

## ii. Analyse de la qualité de l'écriture sur réticule

Suite à la réception du réticule, nous avons analysé l'uniformité CD obtenue en représentant l'écart entre les valeurs mesurées et les valeurs nominales du design. La cartographie Figure 124 représente le résultat obtenu.

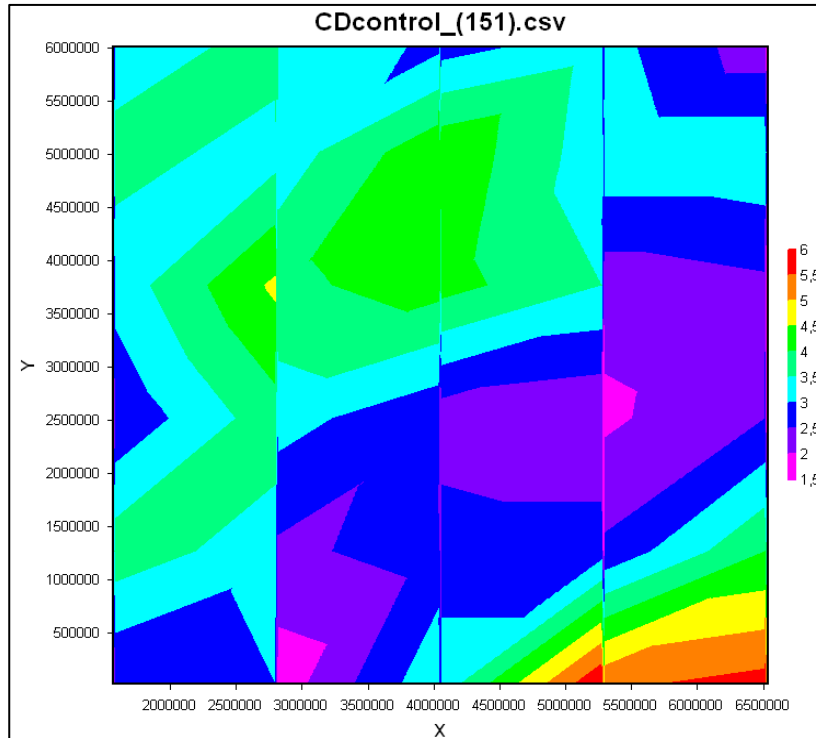


Figure 124 : Cartographie représentant l'uniformité CD du réticule MSKMODELS001

Concernant les structures de contrôle de l'uniformité CD, un écart maximum de 6,4nm est à noter sur l'extrémité en bas à gauche. Un tel écart CD couplé avec un MEEF de 5 (tel que l'on peut le voir sur des réticules utilisés pour un niveau GATE d'une technologie FDSOI de 14nm), revient à avoir un écart sur plaquette qui rend le contrôle du procédé lithographique difficile. Nos investigations nous ont permis de comprendre les raisons de ces erreurs. On sait que la fenêtre de correction des effets de proximité sur réticule est une fenêtre de  $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ . Hors nous avons placé des dummies (motif de remplissage pour combler l'espace vide) tout autour de notre puce afin que la zone d'écriture soit rempli. La densité au niveau des dummies est de l'ordre de 68%. En revanche il réside à l'intérieur de notre puce des zones de  $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$  où la densité est faible. La Figure 125 représente la densité de motif de notre puce hors dummies.

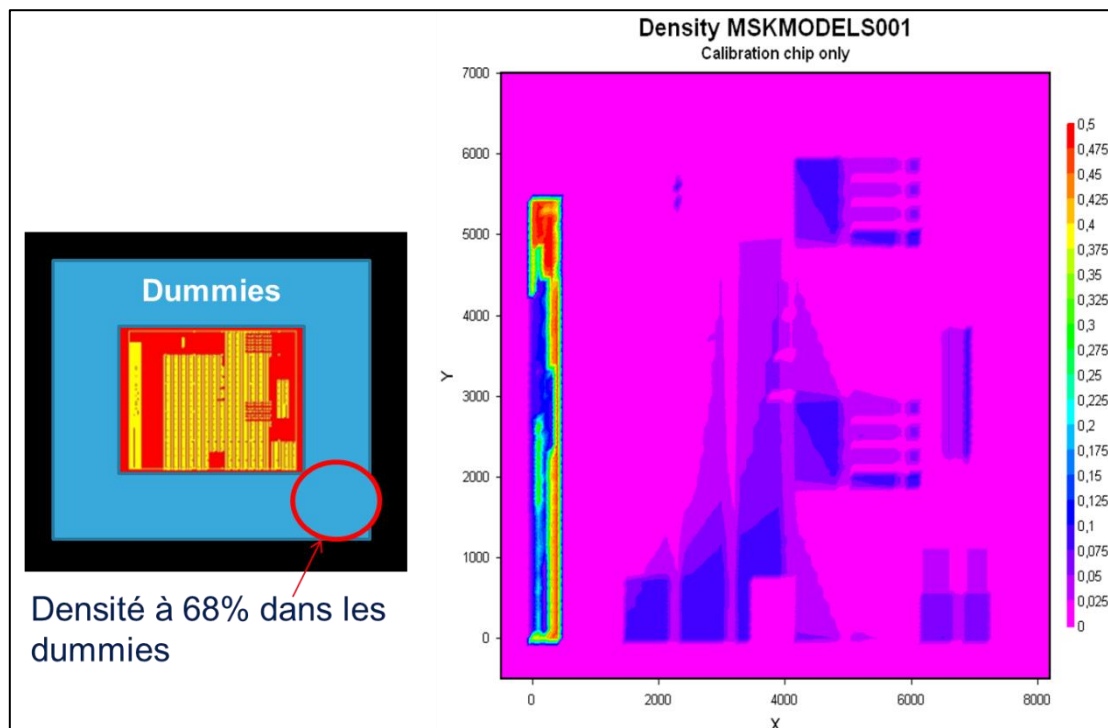


Figure 125 : Densité de motifs sur la zone utile du réticule de calibration MSKMODELS001

Au final, et sur l'ensemble des 2500 points mesurés nous avons une erreur moyenne de 1nm avec un écart type de 2.9nm. Nous avons donc un masque valide pour la calibration de notre modèle.

### iii. Le modèle de réticule retenu.

Comme explicité précédemment le modèle de réticule est composé d'un modèle ebeam et d'un modèle VEB dont les composantes et leurs paramètres sont décrits dans les extraits de fichier Figure 126 et Figure 127.

```
model_type ebeam
diff_length 0.031 0.3736
eta 0.876972 0.123028
kernel_type gaussian gaussian
sample_spacing 0.008
threshold 0.5
background 0
transmission 1
log_level 0
```

Figure 126 : extrait du fichier modèle ebeam contenant les paramètres du modèle. On retrouve un modèle contenant 2 gaussiennes.

```
modelType VEB
SKERNEL D1 type=gauss es=71.6086 u=-61.5987
SKERNEL D2 type=gauss es=1279.98 u=0
SKERNEL D3 type=visible es=158.795 u=10 looking=out
SKERNEL D4 type=visible es=361.501 u=10 looking=in
btermCount 9
BTERM 3.71972
BTERM 6.09474 D1^1
BTERM 5.52912 D2^1
BTERM -12.6951 D3^1
BTERM 8.13837 D4^1
BTERM -0.626373 D1^2
BTERM -3.22866 D2^2
BTERM 6.90152 D3^2
BTERM -7.44446 D4^2
regularization type = curve
```

Figure 127 : extrait du fichier modèle VEB contenant les paramètres du modèle. On retrouve un modèle contenant 2 noyaux gaussiens et 2 noyaux visibles.

Nous avons obtenu un modèle ayant une erreur quadratique moyenne de 1,38nm et une dispersion de l'erreur moyenne centrée à 0,034nm. On retrouve sur la Figure 128 le résumé des caractéristiques de notre modèle de réticule.

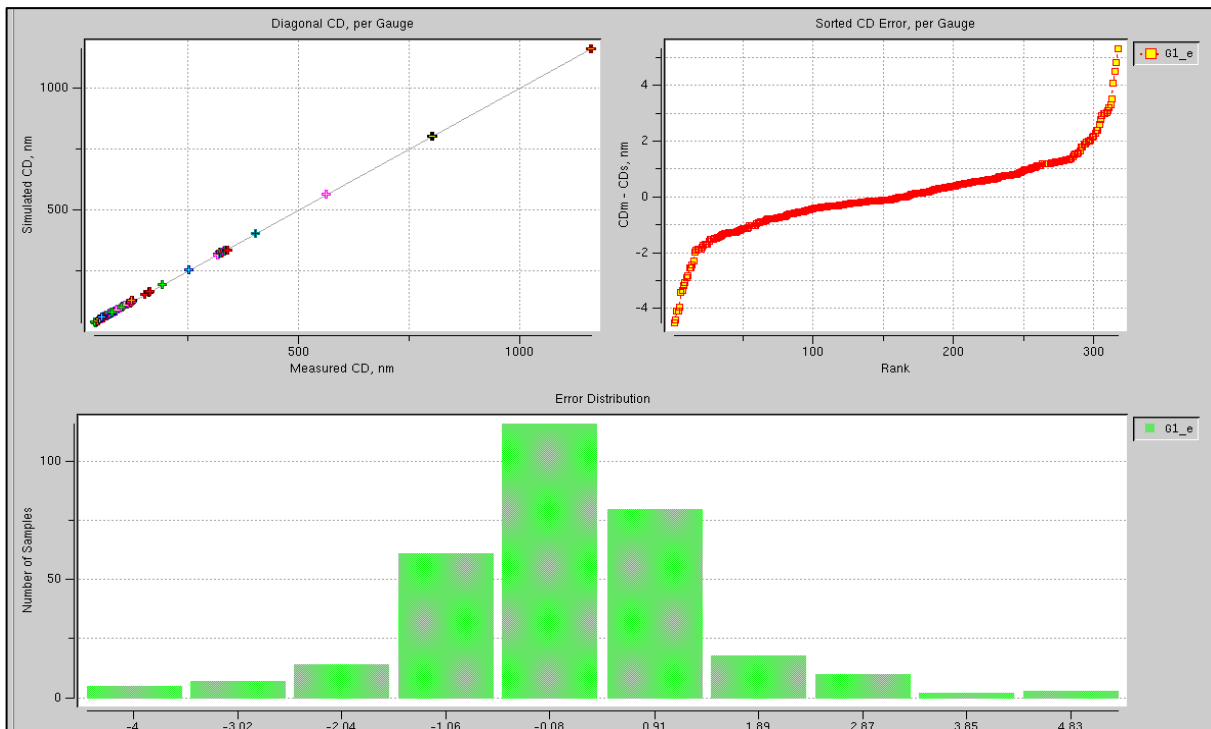


Figure 128 : Résumé du modèle de réticule obtenu. En haut à gauche: on retrouve un comportement linéaire du CD Simulé en fonction du CD mesuré ; En haut à droite : Dispersion de l'erreur CD en fonction du nombre de structures utilisées pour la calibration. On retrouve un centrage proche de 0 et une erreur absolue de 5,3nm maximum; En bas : Histogramme représentant la distribution de l'erreur CD par classe. On retrouve une erreur moyenne de 0.034 nm.

Nous avons utilisé le même modèle pour l'étape de vérification sur toutes les structures, exceptées celles pour lesquelles la mesure n'était pas en accord avec l'image SEM correspondante. Afin d'évaluer la qualité du modèle nous avons tracé l'erreur CD (mesurée–simulée) pour une structure de type "ligne & espace", où la ligne a un CD constant de 80nm et où l'on fait varier de la dimension de l'espace". On retrouve Figure 129 le résultat obtenu.

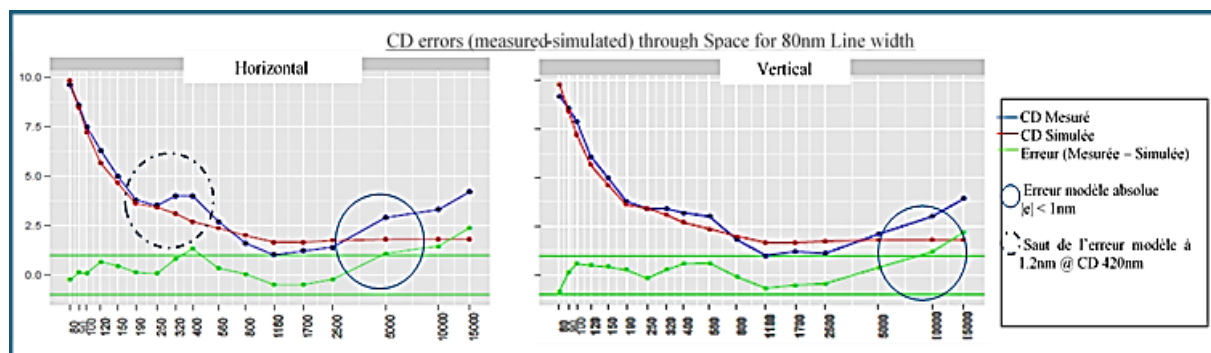


Figure 129 : Erreur CD (mesurée–simulée) pour une structure de type "Line & Space", où la ligne a un CD constant de 80nm, en fonction d'une variation de la dimension du Space"

Pour des lignes de 80nm sur réticule (qui représente la taille de la dimension de la grille sur plaquette) le modèle est prédictif avec une erreur inférieure à 1nm à l'échelle du réticule pour des espaces allant jusqu'à 5µm en orientation horizontale et 10µm en orientation verticale. Le modèle est donc moins prédictif sur des structures isolées ce qui est corrigeable en ajoutant au modèle VEB une composante gaussienne dont les paramètres de diffusion seraient plus étendus. Néanmoins pour notre étude nous n'aurons pas de structure aussi isolée dans un produit de type GATE en technologie FDSOI 14nm, et nous ne ferons pas cet ajustement. Nous pouvons également voir un saut de l'erreur à 1.2nm pour un espace de 420nm. Ce saut correspond à un point de procédé de fabrication du réticule où l'effet short range prend l'ascendant sur l'effet very short range, et traduit ainsi un comportement spécifique lié à l'orientation de la structure par rapport aux effets du procédé de fabrication.

Nous avons réalisé la même analyse pour une structure L&S ayant une dimension constante de la ligne de 320 nm (à l'échelle réticule) à travers une variation de la dimension de "l'espace". La Figure 130 représente les courbes obtenues.

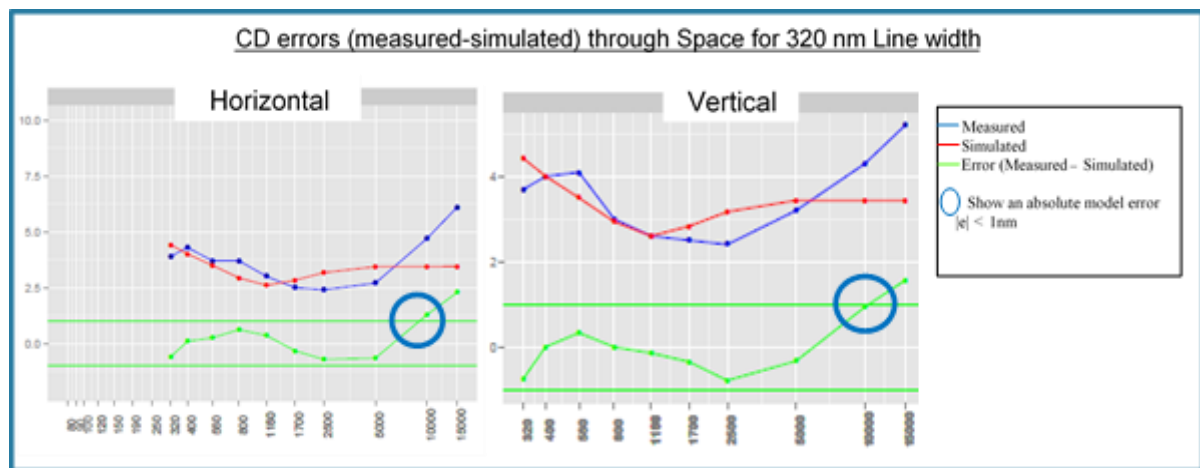


Figure 130 : Erreur CD (mesurée–simulée) pour une structure de type "Line & Space", où la ligne a un CD constant de 320nm, en fonction d'une variation de la dimension du Space"

L'erreur absolue du modèle est inférieure à 1nm pour des espaces allant ici aussi jusqu'à 10µm et ce pour des structures en orientations horizontales et verticales.

Concernant la prédictibilité pour les arrondissements de coins et les raccourcissements de fin de ligne, nous avons réalisé une superposition des contours obtenus avec le modèle et les images SEM. On retrouve Figure 131 une table présentant les résultats pour des structures de type "Line-End to Line-End" et "Space-End to Space-End" représentative d'un niveau "GATE" pour la technologie FDSOI 14nm.

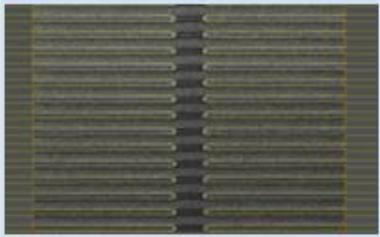
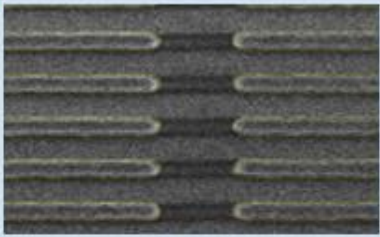

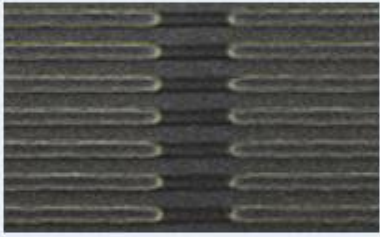
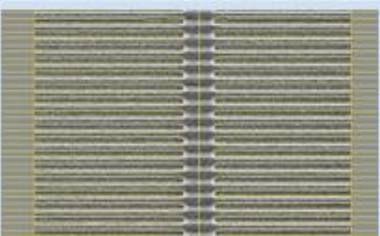
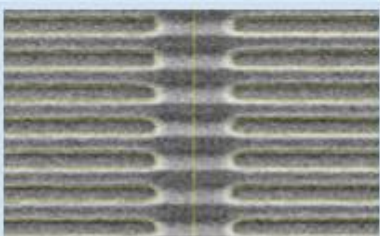
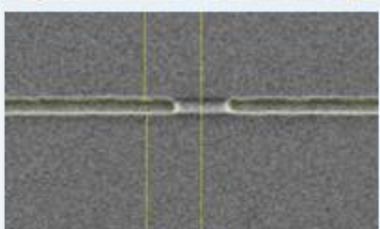
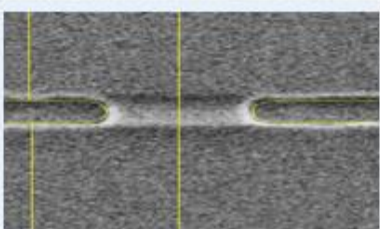
		CD-SEM picture superimposed with Simulated contours	Zoom-in view
Structures type : Line-end	Dense feature 80 nm lines, 120 nm spaces		
	Dense feature 80 nm lines, 90 nm spaces		
Structures type : Space-end	Dense feature 80 nm spaces, 90 nm lines		
	Isolated feature 320 nm space, 80nm line		

Figure 131 : Contours obtenus avec le modèle de réticule superposé à l'image SEM permettant d'apprécier la prédictibilité des arrondissements de coins et des raccourcissements de fin de ligne pour des structures issues d'un niveau "GATE" de la technologie FDSOI 14nm.

Notre modèle montre une prédictibilité correcte, d'un point de vue superposition visuelle, des arrondissements de coins et des raccourcissements de fin de lignes, bien que l'on retrouve un écart visible pour la structure isolée de "Space-End" dû à une résolution moins performante.

## 5. Conclusion

Après une étude approfondie du procédé de fabrication des réticules au niveau de la Mask Shop, et une mise en évidence des effets qui en limitent la résolution, nous avons construit un modèle de réticule pour le niveau le plus exigeant en termes de qualité de réticule pour un niveau de type GATE de la technologie FDSOI 14nm. Ce modèle dont l'erreur quadratique moyenne est de 1,38nm présente une prédictibilité inférieure à 1nm pour des structures 1D. Les analyses 2D mettant en évidence les phénomènes d'arrondissement de coins et de raccourcissement de fin de lignes montrent une prise en compte correcte. Ainsi l'hypothèse faite aujourd'hui avec les modèles OPC qui considère que les motifs présents sur le réticule sont ceux désirés n'est plus valide. L'exemple Figure 132 montre un écart de 10nm entre le contour réel et le design supposé sur réticule.

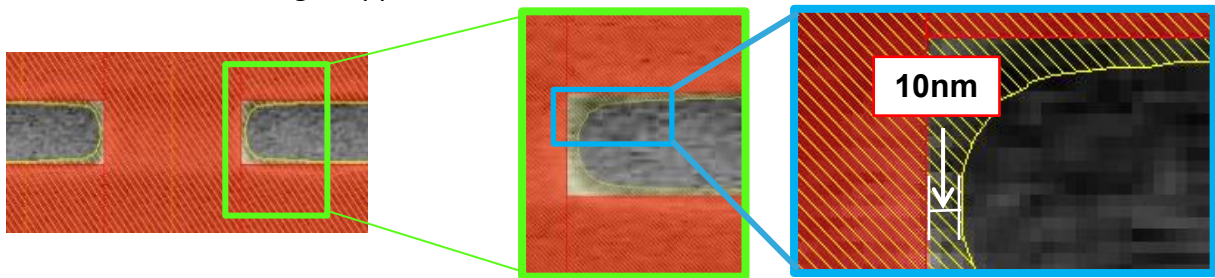


Figure 132 : Ecart entre le design supposé, le contour réel et le contour obtenu avec le modèle de réticule

Dans un contexte où chaque nanomètre compte, nous proposerons un flux de correction permettant de mieux prendre en compte les effets du procédé complet de fabrication des réticules lors de l'étape d'OPC au niveau IDM.

### III. Le flow de correction

Comme nous l'avons explicité dans la partie A.IV.5, un modèle OPC est composé d'un modèle optique physique et d'un modèle de résine empirique calibré à partir de mesure dédiée sur plaquette. Le modèle optique utilise plusieurs paramètres liés au scanner et au procédé tels que la longueur d'onde, l'ouverture numérique, le type de source, l'empilement de la plaquette et du réticule, etc... . L'objectif du modèle optique est de simuler l'intensité lumineuse diffractée par tous les motifs présents sur le réticule et le filtrage par le système de projection qui en résulte. Le modèle résine permet de modéliser le phénomène de photo activation et de diffusion dans la résine lors de l'étape d'exposition ainsi que l'étape de développement. L'objectif de cette partie est de calibrer deux modèles OPC dont l'un utilise notre modèle de réticule et l'autre basé sur la technique actuelle.

#### 1. Le modèle ORC

##### a. La prise en compte des effets de fabrication du réticule dans le modèle ORC

Le modèle OPC permet de simuler l'étape d'exposition du réticule et le développement sur plaquette. On retrouve ensuite l'étape de vérification des corrections qui permet de s'assurer que le modèle OPC a réalisé les corrections adéquates à un transfert correct des motifs sur plaquette, et ce pour une ou plusieurs conditions d'expositions (dose et focus). Il est donc possible de vérifier via cette étape que les motifs présents sur réticule seront résolus dans une fenêtre de procédé défini. Cette étape s'appelle l'ORC (de l'anglais Optical proximity



correction Rule Check). C'est à cette étape que nous souhaitons insérer notre modèle de réticule, puisque nous pouvons utiliser un modèle OPC différent de celui utilisé dans le flux de correction. Par abus de langage volontaire et dans un souci de simplification nous nommerons le modèle OPC utilisé dans l'étape d'ORC le modèle ORC. On retrouve Figure 133 un diagramme représentant l'insertion du modèle de réticule dans le flux de correction actuel.

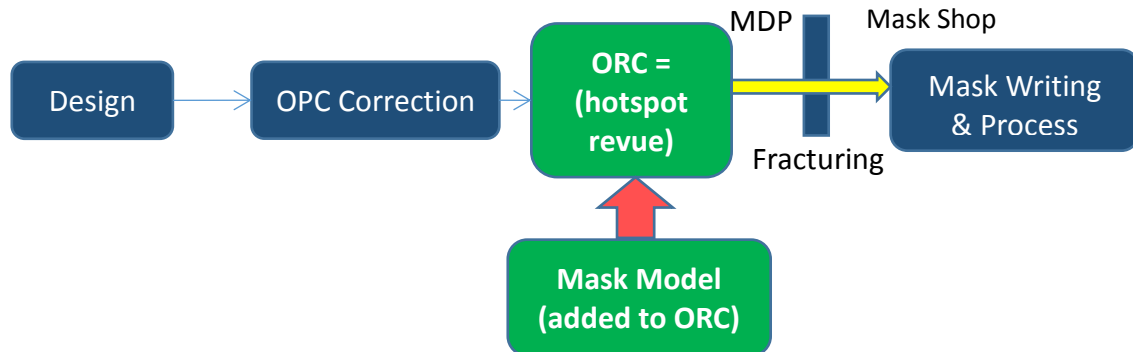


Figure 133 : Flux de correction simplifié permettant de réaliser les corrections OPC du design à l'écriture. Le Modèle de réticule est inséré lors de la revue ORC.

Or la partie résine du modèle OPC actuel embarque déjà les imprécisions liées au procédé de fabrication du réticule. On ne pourra pas appliquer notre modèle de réticule juste avant l'application du modèle ORC pour ne pas prendre en compte deux fois certains des effets embarqués dans le modèle de réticule. Nous devons donc calibrer un modèle OPC standard pour l'ORC et un modèle optique et résine "pure" pour pouvoir appliquer notre modèle de réticule à un produit, en amont du modèle OPC. On retrouve Figure 134 le détail des composantes de notre nouveau modèle ORC et ceux du modèle ORC standard.

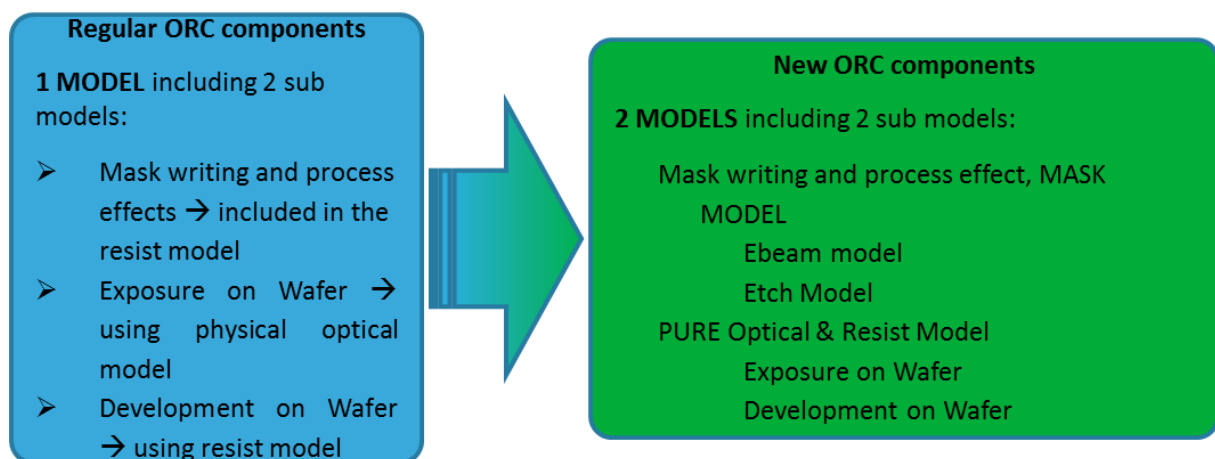


Figure 134 : A gauche : Description du modèle ORC standard contenant 2 sous modèles (modèle optique et modèle résine). A droite : Description du nouveau modèle ORC contenant 2 modèles incluant 2 sous modèles chacun (modèle de réticule composé du modèle ebeam et du modèle etch, modèle ORC "pure" contenant un modèle optique et un modèle résine)

Notre nouveau modèle ORC contiendra le modèle de réticule avec un sous modèle ebeam et un sous modèle VEB, ainsi qu'un modèle optique et résine que nous qualifierons de "modèle optique et résine pure" pour différenciation.

Afin de retirer les effets embarqués dans le modèle OPC actuel, nous allons commander un nouveau réticule sur lequel nous aurons apporté les corrections géométriques nécessaires pour corriger en avance de phase (et en complément de la modulation de dose réalisées en Mask Shop) les effets du procédé de fabrication du réticule. Nous pouvons résumer ce travail en quatre étapes principales :

1. La calibration du modèle de réticule que nous avons déjà réalisée sur le réticule A
2. L'étape d'exposition et développement sur plaquette avec le réticule A pour la création du modèle ORC standard.
3. La correction des motifs du réticule A à partir du modèle de réticule que nous avons créé, et la commande de ce nouveau réticule B.
4. L'étape d'exposition et de développement sur plaquette du réticule B sur lequel les effets du procédé de fabrication ont été corrigés, pour la création du modèle ORC pure

Ces deux modèles appliqués sur un produit nous permettront ensuite de comparer les signatures Hotspots obtenues et de justifier ou non l'utilisation d'un modèle de réticule rigoureux. Nous développerons ce point dans la partie IV qui suit. On retrouve Figure 135 un diagramme représentant l'exercice complet qui nous amènera à notre conclusion.

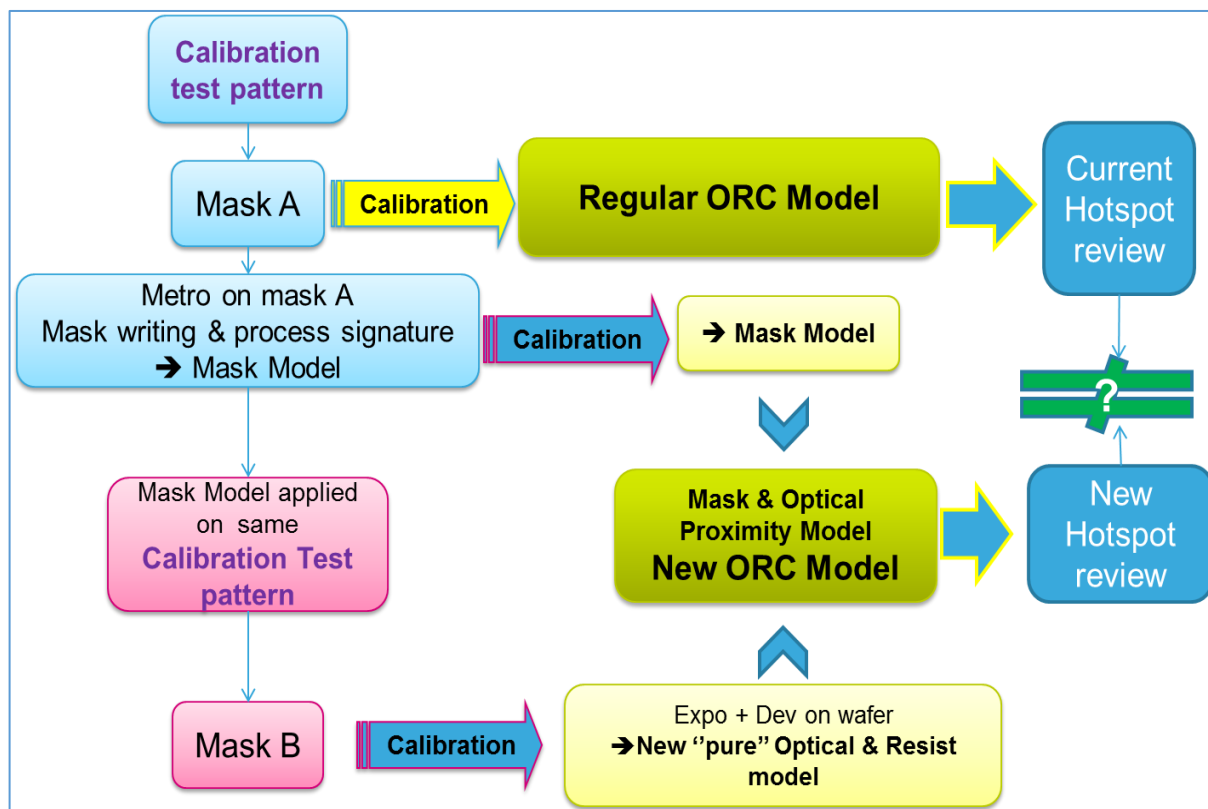


Figure 135 : Diagramme de résumé des 4 étapes de validation de l'apport de l'utilisation du modèle de réticule dans l'étape de revue ORC : 1° Calibration du modèle de réticule ; 2° Calibration du modèle ORC standard ; 3° Fabrication du réticule B ; 4° Calibration du nouveau modèle ORC

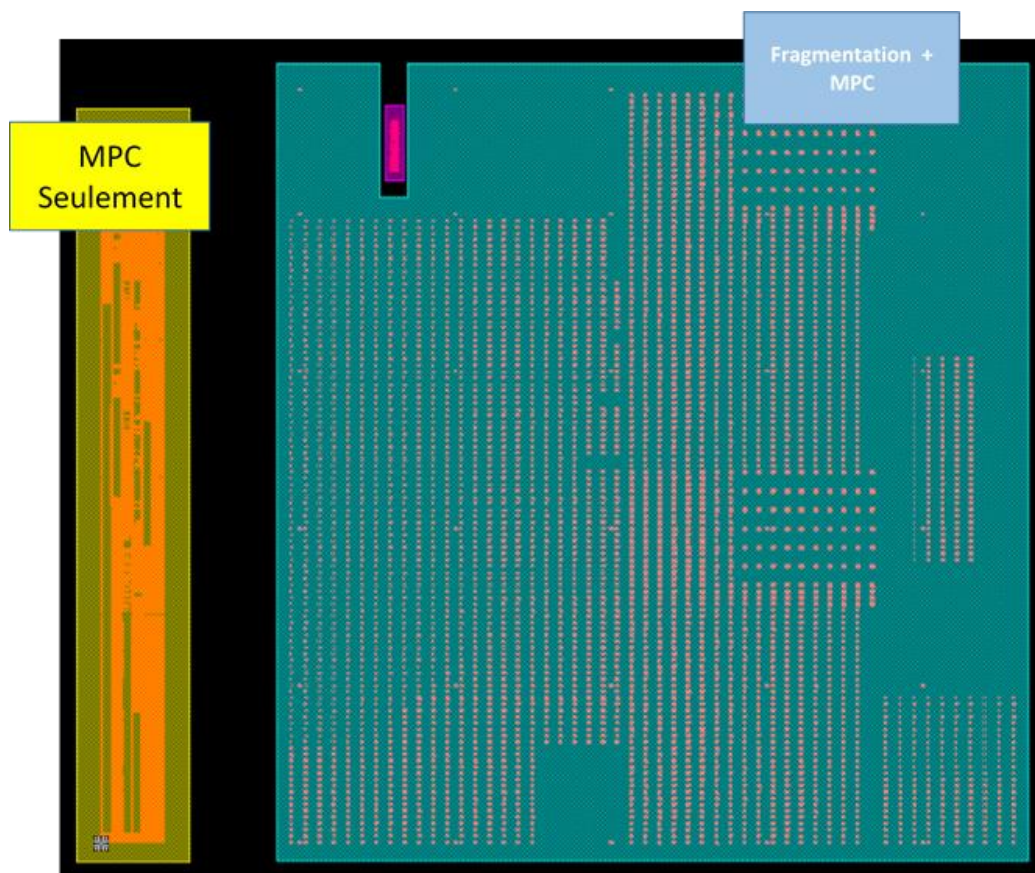


Nous utiliserons le Bloc OPC field, que nous avons embarqué pour la calibration des deux modèles ORC, à la différence près que le bloc OPC field du second masque sera corrigé via notre modèle de réticule. En effet le nouveau modèle ORC ne doit pas prendre en compte les effets du procédé de fabrication du réticule.

#### b. Le second réticule dédié à la calibration du nouveau modèle ORC

La correction géométrique des motifs du réticule A pour l'obtention du réticule B s'est faite via l'application de notre modèle de réticule. Nous n'avons pas appliqué le modèle de réticule sur le bloc "Mask Shop Monitoring" pour que nous puissions réaliser la comparaison avec le réticule A sur les mêmes structures. L'OPC field étant déjà fragmenté, nous avons utilisé les mêmes règles concernant la fragmentation pour le bloc MPC avant d'appliquer le modèle de réticule sur ces deux blocs.

Pour le second réticule B nous avons demandé à la Mask Shop d'appliquer les mêmes corrections que lors de la fabrication du réticule A en dépit de la répartition de la densité de motif mal adapté à la modulation de dose en Mask Shop. On retrouve Figure 136 une vue d'ensemble des motifs embarqués sur notre réticule B.



*Figure 136 : Vue d'ensemble des trois blocs de motifs embarqués sur le réticule B. L'OPC Field n'a subi que l'étape de correction utilisant le modèle de réticule. Le bloc Mask Shop Monitoring n'a subi aucune correction. Le reste du réticule a subi la fragmentation et l'étape de correction utilisant le modèle de réticule*

Le réticule B a été fabriqué avec une uniformité CD de 1nm et un écart type de 3nm.

La cartographie de l'uniformité CD du second réticule est représentée sur la Figure 137.

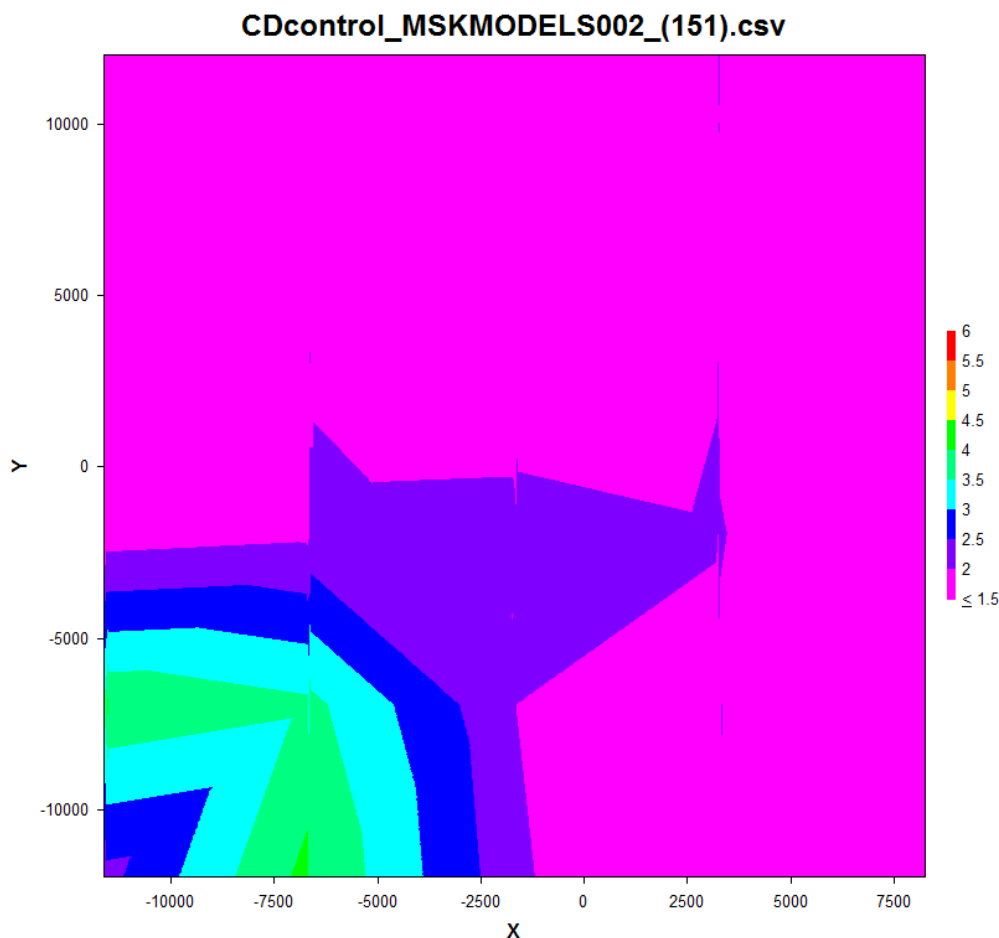


Figure 137 : Cartographie représentant l'uniformité CD du réticule MSKMODELS002

Nous pouvons donc utiliser le réticule B pour la calibration de notre nouveau modèle ORC.

## 2. Calibration des deux modèles ORC et comparaison

La calibration de nos modèles ORC est faite uniquement à partir du bloc OPC Field. Les dimensions et les types de structures embarquées résultent de configurations autorisées par les règles de dessin du niveau appartenant au nœud technologique que l'on souhaite fabriquer. Seule une partie du set de calibration est utilisée pour la calibration du modèle optique, essentiellement composé de structures 1D. Puis toutes les structures seront utilisées pour la calibration du modèle résine. Nous avons utilisé la plateforme CalibreWorkbench de Mentor Graphics pour la création de nos deux modèles ORC [56] [57]. Le filtrage des points de mesures a été réalisé avec un logiciel développé en interne à ST, de même que la méthode permettant d'obtenir un modèle de qualité. Nous ne développerons pas davantage cette méthodologie dans ce manuscrit.

Il est possible de calibrer un modèle en imprimant ces structures (de calibration) dans la résine à condition nominale ou encore en faisant une FEM. L'utilisation de FEM permet d'obtenir des modèles plus prédictifs sur toute la fenêtre de procédé et donc un modèle capable de supporter des variations du procédé lithographique. Nous utiliserons une FEM avec chacun des deux réticules pour la création de nos modèles ORC.

Nous commencerons par aborder la méthode utilisée pour la création des modèles optiques et résines avant de présenter les résultats obtenus pour chacun des modèles.

## a. Calibration du modèle optique et résine

### i. Le modèle optique

Sur la plateforme CalibreWorkbench la calibration du modèle optique a pour objectif d'ajuster les paramètres de focus nominal (BF de l'anglais Beam Focus) et de hauteur de mesure de l'image aérienne dans la résine lors de la simulation (AI de l'anglais Aerial Image). Ces paramètres sont décrits sur la Figure 138.

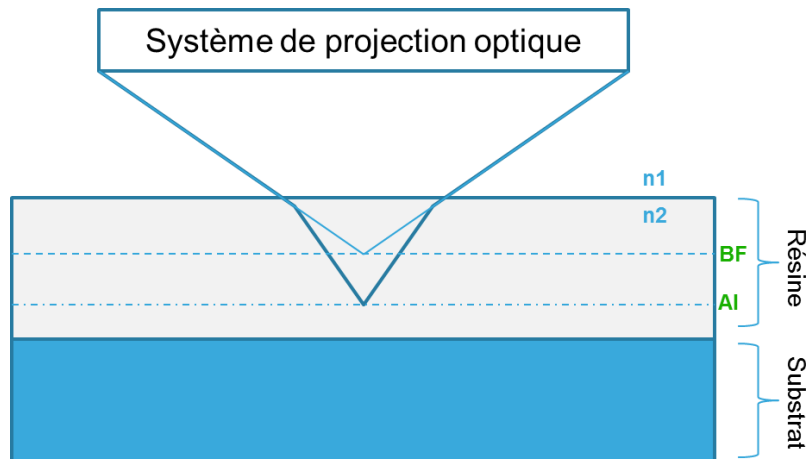


Figure 138 : Paramètres (AI, BF) ajustés dans le modèle optique

Le paramètre BF nous permet de trouver le plan image "idéal" en fonction des paramètres du système de projection optique (longueur d'onde de la source, type de source et sa polarisation, paramètres du scanner,...) et le paramètre AI permet de déterminer le plan image réel en tenant compte de la réflexion parasite (onde stationnaire) induite par l'empilement sous la résine. Pour la calibration des modèles optiques de chaque ORC nous avons utilisé les mêmes structures.

### ii. Le modèle résine

Le modèle résine permet de modéliser le phénomène de photo activation et de diffusion dans la résine lors de l'étape d'exposition ainsi que l'étape de développement. Il est calibré sur CalibreWorkbench en utilisant le modèle VT5 (Variable Threshold 5) [58] [59]. Il permet de déterminer un seuil d'impression variable en fonction de cinq paramètres extraits à partir de simulation de l'image aérienne. Ces paramètres sont :

- Le seuil de référence calibré à partir des mesures
- L'intensité maximale  $I_{max}$  de l'image aérienne la plus proche du bord du motif simulé
- l'intensité minimale  $I_{min}$  de l'image aérienne la plus proche du bord du motif simulé
- la pente  $Slope$  de l'image aérienne évaluée au seuil de référence de la résine
- le facteur de courbure  $C$  évalué au seuil de référence à partir de 3 points tangents au contour le long du motif.

Le seuil d'impression variable  $S$  est ensuite déterminé à partir de différentes fonctions polynomiales faisant intervenir des combinaisons linéaires des cinq paramètres cités selon l'équation :

$$S = a_0 + \sum_i a_i C_i \quad \text{Equation 40}$$

Avec :

$a_i$  les coefficients résultants du calibrage du modèle résine et  $C_i$  les combinaisons de paramètres utilisées (exemple :  $C_1=I_{max}$ ,  $C_2=I_{max}*I_{min}$ ,  $C_3=I_{min},...$ ).

Il existe plusieurs formulations des fonctions polynomiales, appelées "Model Form" disponibles sur la plateforme CalibreWorkbench. Nous avons utilisé celui qui fait intervenir les paramètres  $I_{min}$ ,  $I_{max}$ ,  $Slope$ , leurs carrés et leurs produits.

#### b. Résultats de la calibration des modèles

Plusieurs itérations sont nécessaires pour l'obtention du modèle ORC final. A chaque itération, l'erreur quadratique moyenne entre les CD mesurés et les CD simulés est calculée, puis un niveau filtrage des structures utilisées est réalisé via l'outil interne, jusqu'à obtention d'une erreur quadratique moyenne inférieure à 5nm. Notre modèle ORC standard a une erreur quadratique moyenne de 2,53nm et une erreur moyenne centrée à 0.07nm. Un résumé du résultat de la calibration du modèle standard est présenté Figure 139.

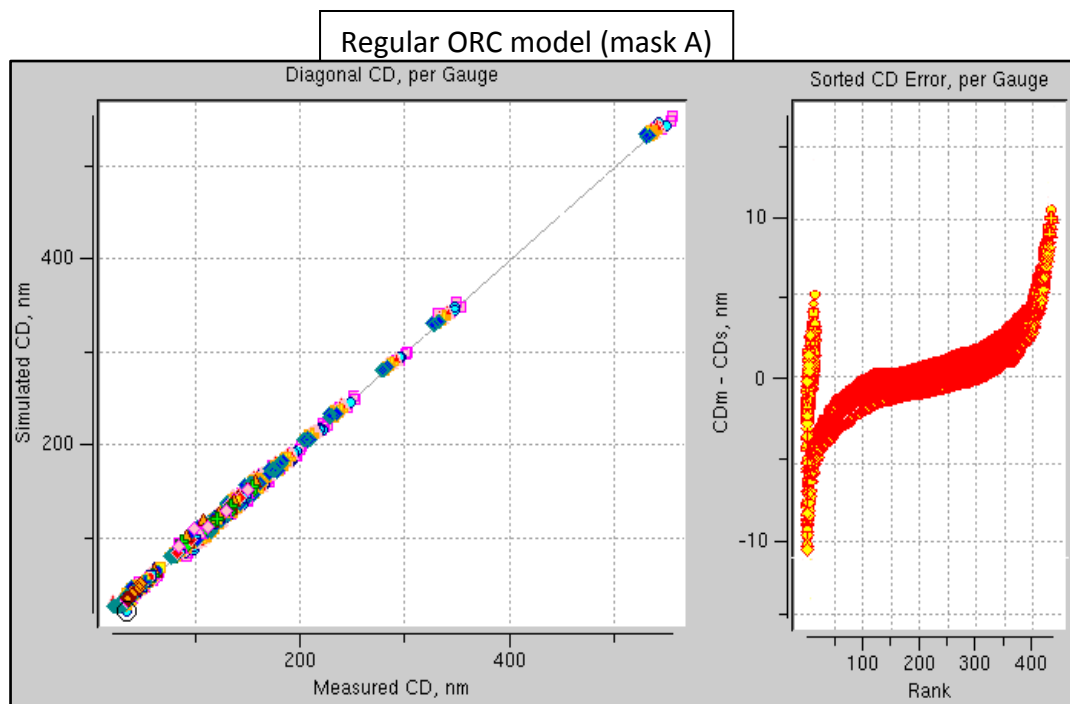


Figure 139 : Résultats de la calibration du modèle ORC standard (Regular) obtenu à partir de mesure après exposition du Mask A sur plaquette.

Le nouveau modèle ORC n'embarquant pas les effets du procédé de fabrication des réticules a été obtenu avec une erreur quadratique moyenne de 3,36nm et une erreur moyenne de 0,115nm. Un résumé du résultat de la calibration du nouveau modèle est présenté Figure 140.

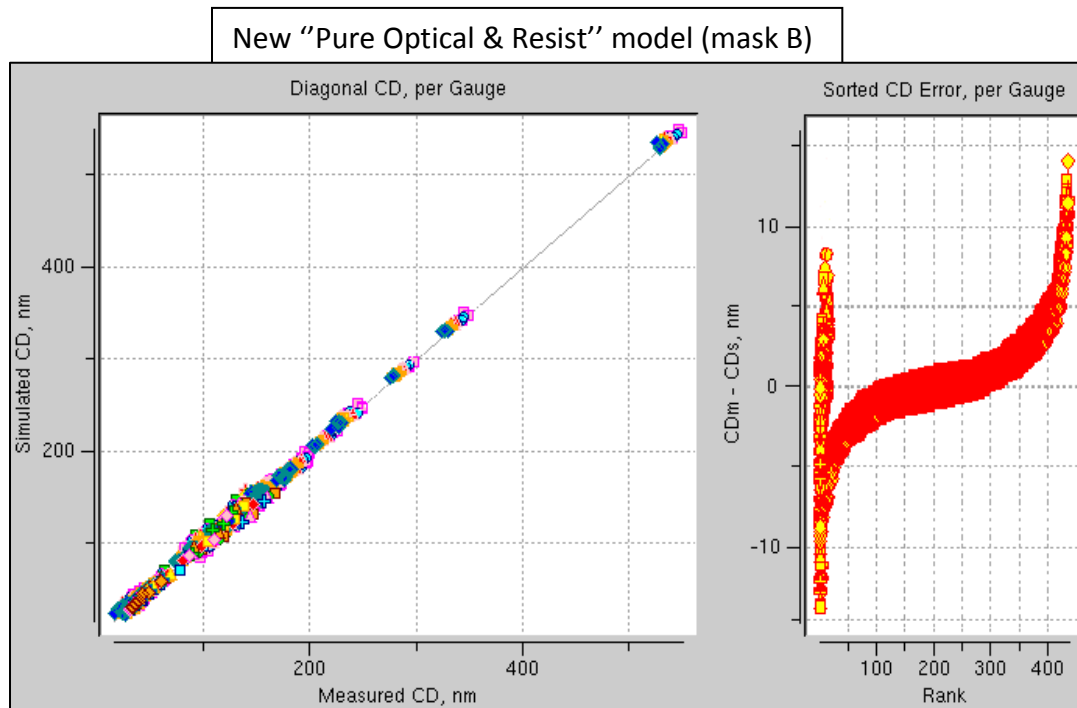


Figure 140 : Résultats de la calibration du nouveau modèle ORC appelé modèle "optique et résine pure" obtenu à partir de mesure après exposition du Mask B sur plaquette

L'erreur quadratique moyenne est plus élevée pour le nouveau modèle ORC par rapport au modèle ORC standard. On note un écart plus important entre les valeurs de CD simulé par rapport aux valeurs de CD mesuré principalement pour des motifs entre 100nm et 200nm. Les erreurs moyennes de nos modèles sont proches de zéro, ce qui indique que nos modèles sont bien centrés. Enfin la dispersion des erreurs du modèle standard est comprise entre -10nm et 10nm alors qu'elle est comprise entre -15 et +15nm pour le nouveau modèle ORC. Dans le chapitre suivant nous comparerons les modèles ORC entre eux afin de vérifier leur stabilité.

### c. Comparaison des modèles ORC entre eux

Nous commencerons par vérifier la précision des modèles à travers des variations de CD à pas de réseau constant puis des variations du pas de réseau à CD constant, à condition nominale. Nous évaluerons dans un second temps la stabilité du modèle à travers des variations du procédé lithographique.

#### i. Précision des modèles lors de variation de CD et de pas de réseau

Quatre pas de réseau à 88nm, 90nm, 100nm et 300nm autorisés par la règle de dessin ont été étudiés en faisant varier la densité de la structure, c'est-à-dire la valeur du CD. La Figure 141 montre les courbes d'erreur absolue en fonction de la variation de CD obtenus.

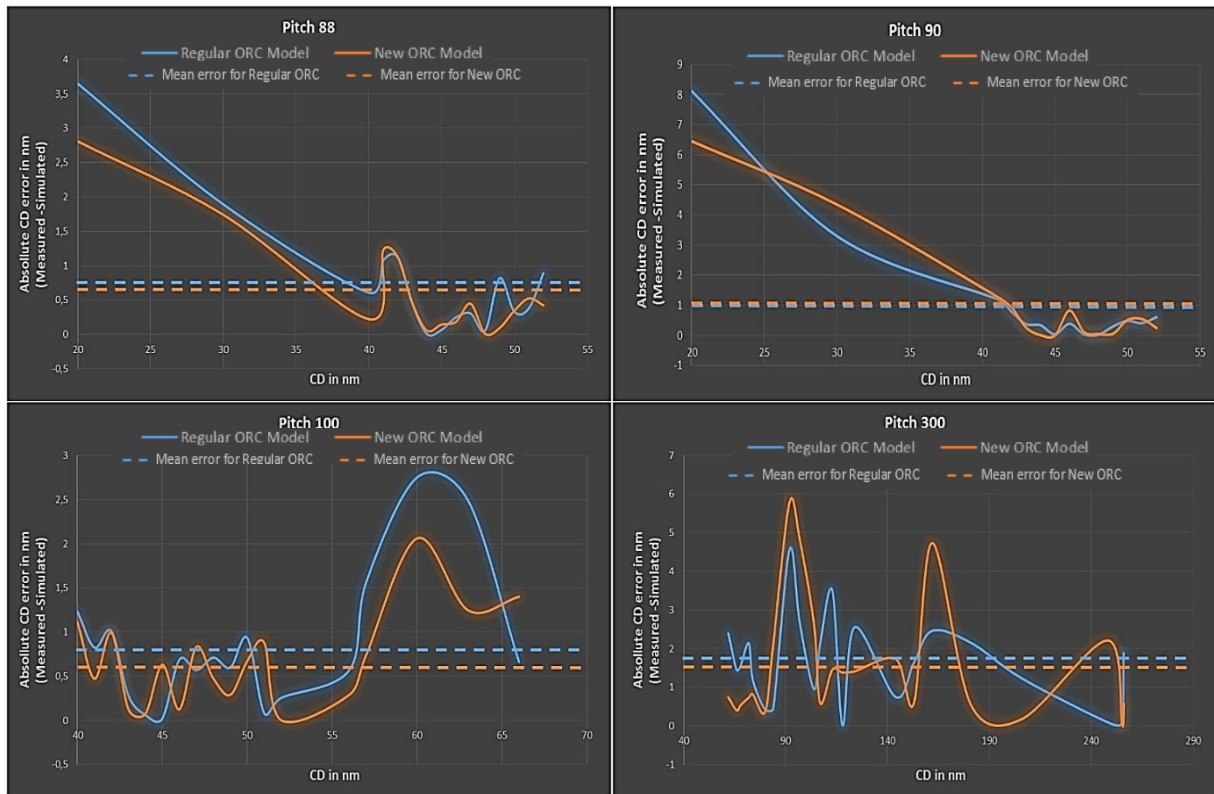


Figure 141 : Comparaison de l'erreur absolue en fonction de la variation de CD obtenus pour 4 pas de réseau fixés à 88nm, 90nm, 100nm et 300nm, entre les deux modèles.

Le comportement de nos deux modèles ORC est similaire lors de variation de CD à pas de réseau constant. L'erreur moyenne, représentée sur chaque courbe en trait pointillé pour chacun des deux modèles est quasi similaire pour les pas de réseau à 88nm et 90nm. Sachant que l'erreur de mesure du SEM est d'environ  $\pm 1\text{nm}$ , nos modèles sont prédictifs pour des valeurs de CD supérieurs à 40nm pour le pas de réseau à 88nm et également prédictifs pour des valeurs de CD supérieurs à 43nm pour le pas de réseau à 90nm. Pour le pas de réseau à 100nm nos modèles sont stables pour des valeurs de CD inférieure à 57nm. Même si pour le pas de réseau à 100nm l'erreur moyenne est inférieure avec le modèle standard comparée au nouveau modèle, les valeurs sont inférieures au 1nm d'incertitude du SEM. Le graphique pour le pas de réseau à 300nm montre une capacité de prédiction moindre vu l'erreur de mesure mais ramenée au pas de réseau l'erreur n'est pas significative. Les mêmes courbes ont été tracées à CD constant en faisant varier le pas de réseau, que l'on retrouve Figure 142.

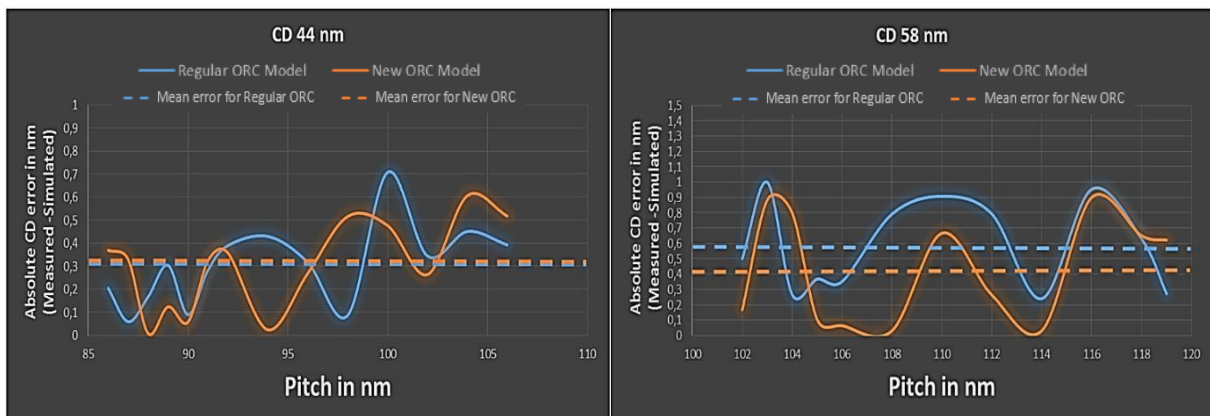


Figure 142 : Comparaison de l'erreur absolue en fonction de la variation du pas de réseau pour un CD fixe de 44nm et 58nm, entre les deux modèles



La valeur moyenne de l'erreur absolue est inférieure à 1nm pour des variations de réseau à CD constant.

Compte tenu de la variabilité de mesures du SEM, nous pouvons dire que nos deux modèles ORC sont stables pour des variations de CD à pas de réseau constant et vice versa, et ceux pour les configurations les plus critiques imposées par la règle de dessin.

## ii. Comportement des modèles ORC à travers la fenêtre de procédé

La vérification du comportement des modèles ORC à travers des variations de dose et focus a été faite pour la structure de référence utilisée pour le centrage du procédé lithographique sur plaquette. La Table 11 permet de voir les résultats obtenus pour une variation de dose de  $\pm 0,5\text{mJ}$  pour une plage de  $2\text{mJ}$  centrée autour de la dose nominale et pour une variation de focus de  $\pm 20\text{nm}$  sur une plage de  $120\text{nm}$  centrée autour du focus nominal. On présente ici l'erreur CD correspondant à l'écart entre le CD simulé et le CD mesuré.

Regular ORC model (mask A)						New "Pure Optical & Resist" model (mask B)					
DOSE DEFOCUS	CD error (Simulated- Measured) in nm					DOSE DEFOCUS	CD error (Simulated- Measured) in nm				
	-1mJ/cm <sup>2</sup>	-0.5mJ/cm <sup>2</sup>	0mJ/cm <sup>2</sup> (nominal)	+0.5mJ/cm <sup>2</sup>	+1mJ/cm <sup>2</sup>		-1mJ/cm <sup>2</sup>	-0.5mJ/cm <sup>2</sup>	0mJ/cm <sup>2</sup> (nominal)	+0.5mJ/cm <sup>2</sup>	+1mJ/cm <sup>2</sup>
-60nm	0.8	1.3	1.0	0.4	0.3	-60nm	2.3	1.2	1.5	1.6	1.8
-40nm	0.5	1.0	0.8	0.3	0.0	-40nm	1.7	0.6	0.3	0.7	0.5
-20nm	0.2	0.5	0.5	0.6	0.3	-20nm	0.4	0.8	0.8	0.1	0.1
Nominal Focus	0.3	0.8	0.3	0.6	1.4	Nominal Focus	0.7	0.2	0.3	0.2	0.4
+20nm	0.1	0.3	0.5	0.8	0.8	+20nm	0.7	0.1	0.1	0.1	0.3
40nm	0.2	0.4	0.1	0.2	0.6	40nm	1.2	0.2	0.3	0.2	0.0
+60nm	0.4	0.7	0.6	0.7	0.5	+60nm	0.3	0.6	0.5	1.0	1.1
Error ≤ 1   1 < error ≤ 1.5   Error > 1.5						Error ≤ 1   1 < error ≤ 1.5   Error > 1.5					

Table 11 : Erreur absolue (en nm) pour chacun des deux modèles ORC obtenus pour la structure de référence, à travers des variations de dose et de focus afin de tester la prédictibilité des modèles à travers une fenêtre de procédé donné.

Dans ce tableau nous avons mis en évidence les erreurs CD supérieures à 1nm. On remarque que le nouveau modèle ORC présente une erreur plus importante que le modèle standard pour un défocus de -60nm par rapport au focus nominal et ce quel que soit la dose. La Table 12 utilise les mêmes valeurs que la Table 11 mais utilise un code couleur différent pour la mise en évidence de l'erreur CD.

Regular ORC model (mask A)						New "Pure Optical & Resist" model (mask B)					
DOSE DEFOCUS	CD error (Simulated- Measured) in nm					DOSE DEFOCUS	CD error (Simulated- Measured) in nm				
	-1mJ/cm <sup>2</sup>	-0.5mJ/cm <sup>2</sup>	0mJ/cm <sup>2</sup> (nominal)	+0.5mJ/cm <sup>2</sup>	+1mJ/cm <sup>2</sup>		-1mJ/cm <sup>2</sup>	-0.5mJ/cm <sup>2</sup>	0mJ/cm <sup>2</sup> (nominal)	+0.5mJ/cm <sup>2</sup>	+1mJ/cm <sup>2</sup>
-60nm	0.8	1.3	1.0	0.4	0.3	-60nm	2.3	1.2	1.5	1.6	1.8
-40nm	0.5	1.0	0.8	0.3	0.0	-40nm	1.7	0.6	0.3	0.7	0.5
-20nm	0.2	0.5	0.5	0.6	0.3	-20nm	0.4	0.8	0.8	0.1	0.1
Nominal Focus	0.3	0.8	0.3	0.6	1.4	Nominal Focus	0.7	0.2	0.3	0.2	0.4
+20nm	0.1	0.3	0.5	0.8	0.8	+20nm	0.7	0.1	0.1	0.1	0.3
40nm	0.2	0.4	0.1	0.2	0.6	40nm	1.2	0.2	0.3	0.2	0.0
+60nm	0.4	0.7	0.6	0.7	0.5	+60nm	0.3	0.6	0.5	1.0	1.1

Table 12 : Erreur absolue (en nm) pour chacun des deux modèles ORC obtenus utilisant un code couleur différent pour la mise en évidence de l'erreur CD.

Le nouveau modèle montre clairement une dispersion de l'erreur CD supérieure à celle du modèle standard, ce qui révèle un meilleur comportement et une meilleure stabilité du modèle standard lors de variation du procédé lithographique. Cependant la portion de fenêtre de procédé où l'erreur est inférieure à 0,5nm est plus large avec le nouveau modèle ORC. De plus elle est centrée autour du point de fonctionnement nominal. Le nouveau modèle montre plutôt une dégradation constante à partir du point nominal jusqu'au bord de la fenêtre de procédé évalué. Compte tenu de l'incertitude de mesure du SEM de  $\pm 1\text{nm}$ , on peut considérer que nos modèles sont stables et peuvent supporter une variabilité de dose et focus acceptable. De plus la comparaison de contour pour l'évaluation de l'apport de notre nouveau modèle sur le produit se fera à condition nominale.

#### d. Conclusion

Nous avons calibré deux modèles ORC dont l'un ne contient pas d'effets du procédé de fabrication du réticule. Malgré une différence de 0.8nm sur l'erreur quadratique moyenne entre nos deux modèles, une prédictibilité quasi identique en termes d'erreur CD lors de variations de CD à pas de réseau constant et vice versa, et compte tenu du comportement sur la fenêtre de procédé nous pouvons considérer nos deux modèles ORC comme suffisamment prédictifs en vue de leur utilisation dans la partie suivante. Lors de l'évaluation du comportement des modèles sur la fenêtre de procédé, la stabilité du nouveau modèle autour du point de fonctionnement semble être plus stable que pour le modèle standard. Cette différence de comportement est certainement imputable au retrait des effets du procédé de fabrication des réticules du modèle résine. Ce dernier point reste néanmoins à confirmer lors de l'évaluation d'autres niveaux technologiques.



#### IV. Validation/rejet de la prise en compte rigoureuse des effets du procédé de fabrication des réticules

Nos modèles ORC étant calibrés, nous les avons utilisés pour simuler les contours obtenus sur des structures spécifiquement introduites dans un produit pour comparer les deux modèles.

##### 1. Méthodologie d'obtention des contours

Nous avons utilisé des structures 2D pour la comparaison des modèles. L'obtention du contour utilisant le modèle standard s'est faite en appliquant le modèle ORC sur le design d'un produit, ayant eu recours au préalable à une étape de correction OPC. Nous nommerons ce contour "contour standard" pour alléger la notation. Par analogie on appellera "nouveau contour" le contour obtenu avec le nouveau modèle ORC. L'obtention du "nouveau contour" se fait en deux étapes. On applique d'abord le modèle de réticule pour obtenir le contour simulé du réticule, puis on applique le nouveau modèle ORC au contour du réticule pour obtenir le nouveau contour. La Figure 143 résume la méthodologie d'obtention des contours.

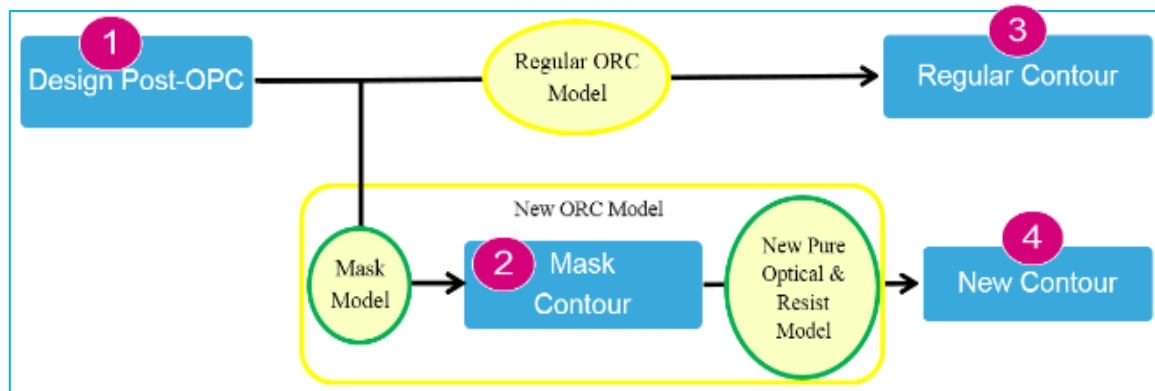


Figure 143 : Diagramme descriptif de la méthodologie permettant l'obtention des contours

La principale difficulté pour l'obtention du nouveau contour réside dans l'application du nouveau modèle ORC sur le contour du réticule et non pas sur un design composé de polygones. A titre d'information, l'obtention du nouveau contour nécessite un temps de simulation d'une semaine de plus et malgré l'utilisation de 200CPU.

##### 2. Comparaison des contours simulés par rapport aux images obtenues sur plaquettes

Dans cette partie nous allons superposer les contours obtenus avec chacun des deux modèles et les images SEM sur plaquette pour différentes structures.

La première structure évaluée est une structure en croix, présentée Figure 144. Elle permet de mettre en évidence les phénomènes de type "pont" sur plaquette.

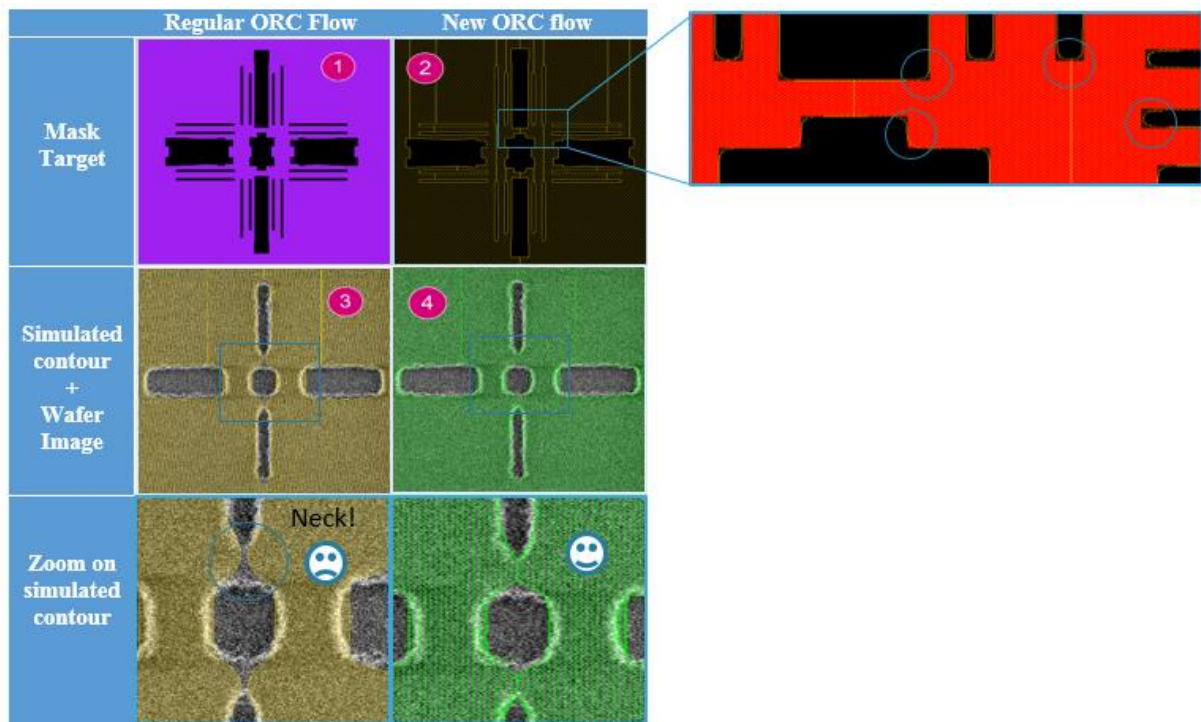


Figure 144 : Superposition des contours simulés avec chacun des deux modèles ORC et l'image SEM sur plaquette correspondante pour une structure en croix.

Le contour standard montre un manque de prédictibilité par rapport à l'image SEM, alors que le nouveau contour, se rapproche plus de l'image SEM obtenue. On voit sur la photo numérotée 2 que le phénomène d'arrondissement de coins et de raccourcissement de fin de ligne a été pris en compte pour l'obtention du nouveau contour. Afin de faciliter la compréhension des différentes images nous avons ajouté les 4 étapes de la Figure 143 sur chacune des photos.

La seconde structure est une structure de type "Double Peigne" dont les résultats sont présentés Figure 145.

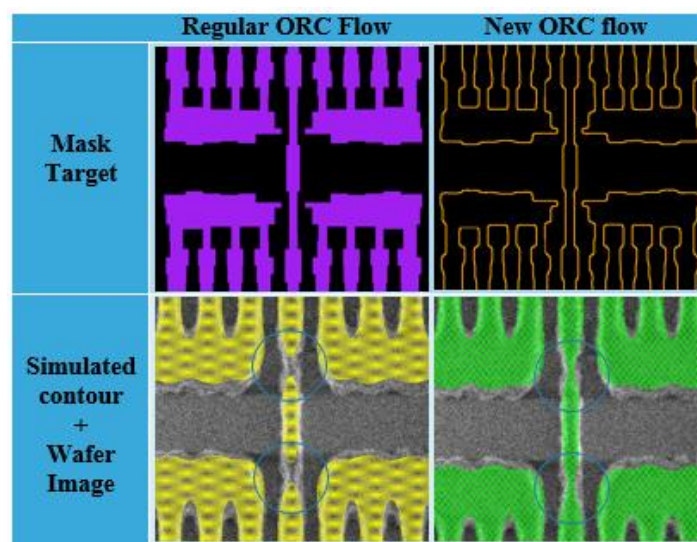


Figure 145 : Superposition des contours simulés avec chacun des deux modèles ORC et l'image SEM correspondante sur plaquette pour une structure de type double peigne

Cette structure a été implémentée pour la mise en évidence des phénomènes de cou dans la résine. Le nouveau contour concorde quasi exactement avec l'image SEM obtenue alors que le contour standard prévoit un "cou" que l'on ne voit pas sur plaquette. Le nouveau contour est donc ici plus prédictif pour la mise en évidence de phénomènes de type "cou".

La structure présentée Figure 146 est utilisée pour la vérification de la non-impression des motifs diffractants non résolus (SRAF).

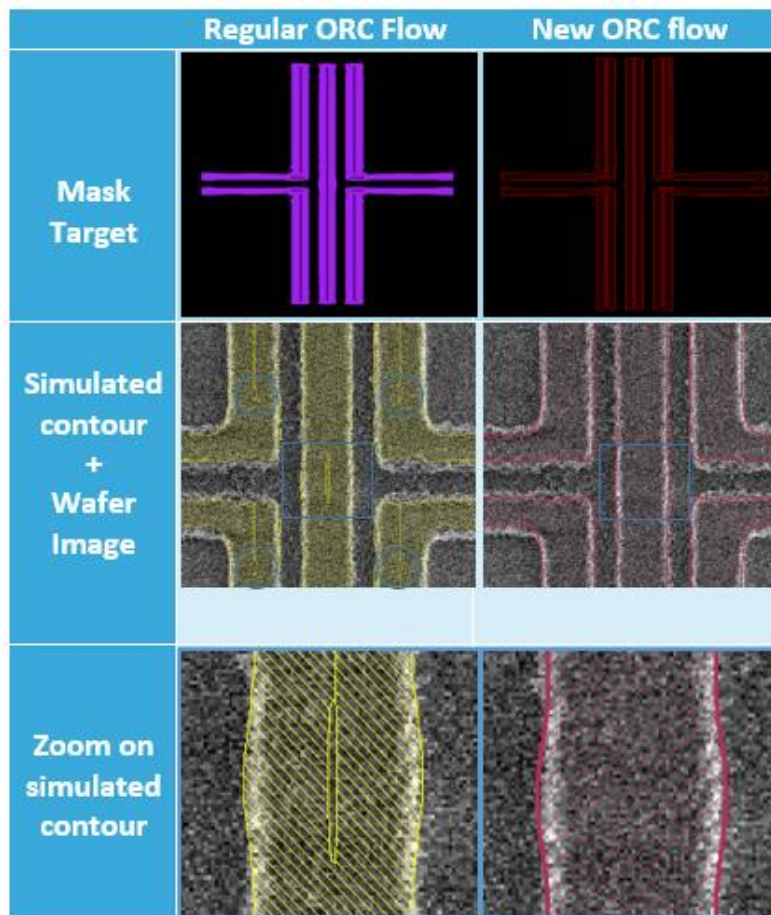


Figure 146 : Superposition des contours simulés avec chacun des deux modèles ORC et l'image SEM sur plaquette pour la vérification de la non résolution des SRAFs.

Pour cette structure en croix la taille du CD principale est la même pour les deux contours qui collent parfaitement à l'image SEM. En revanche sur le contour standard on remarque qu'une partie des SRAFs présente sur le design s'impriment dans la ligne, alors que ce n'est pas le cas. Ici aussi le nouveau contour montre une meilleure prédictibilité pour la vérification de la non résolution des SRAFs.

La structure suivante aussi utilisée pour la détection de l'impression des SRAFs est présentée Figure 147.



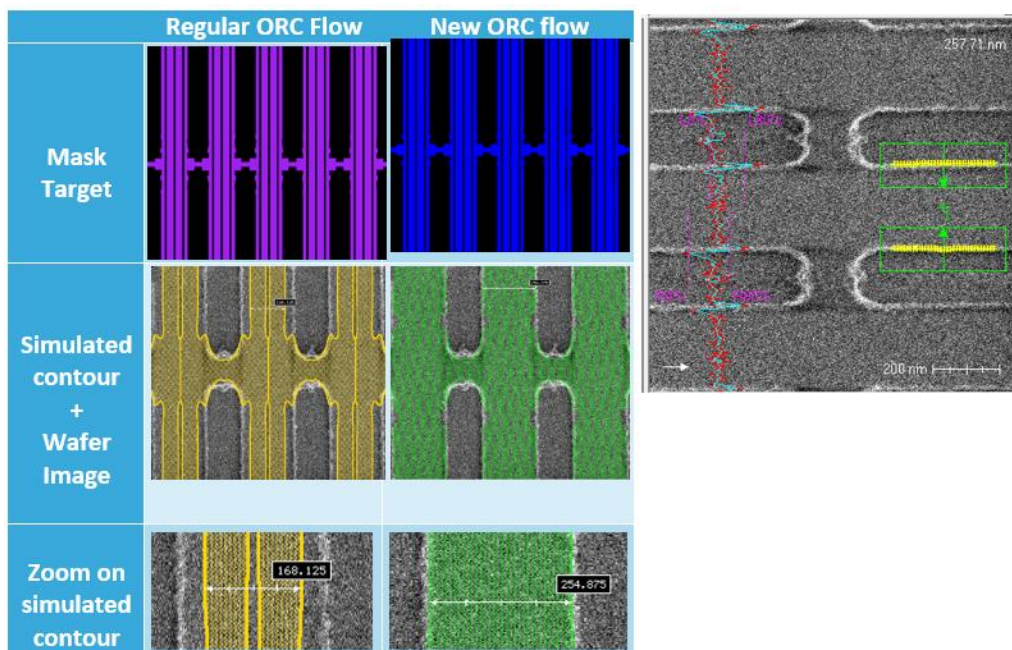


Figure 147 : Superposition des contours simulés avec chacun des deux modèles ORC et l'image SEM sur plaquette pour la vérification de la non résolution des SRAFs. A droite, l'image SEM permettant de voir que la prédiction du CD est meilleure avec le nouveau modèle ORC comparé au modèle ORC standard.

Cette structure démontre clairement un manque de précision du modèle standard lorsque l'on compare le contour simulé avec l'image SEM obtenue sur plaquette. On note à la fois une mauvaise prédiction du CD à 168nm au lieu des 257nm sur plaquette, l'impression de SRAF alors que l'image SEM n'en montre pas, et des contours de bouts de lignes imprécis.

Le nouveau contour est donc plus prédictif pour la mise en évidence des problèmes d'impression des SRAFs.

Enfin la dernière structure évaluée Figure 148 concerne la mise en évidence du phénomène de raccourcissement de fin de ligne. Nous avons ici superposés les deux contours (nouveau modèle en rouge et modèle standard en jaune) à une image SEM pour évaluer la précision de la simulation.

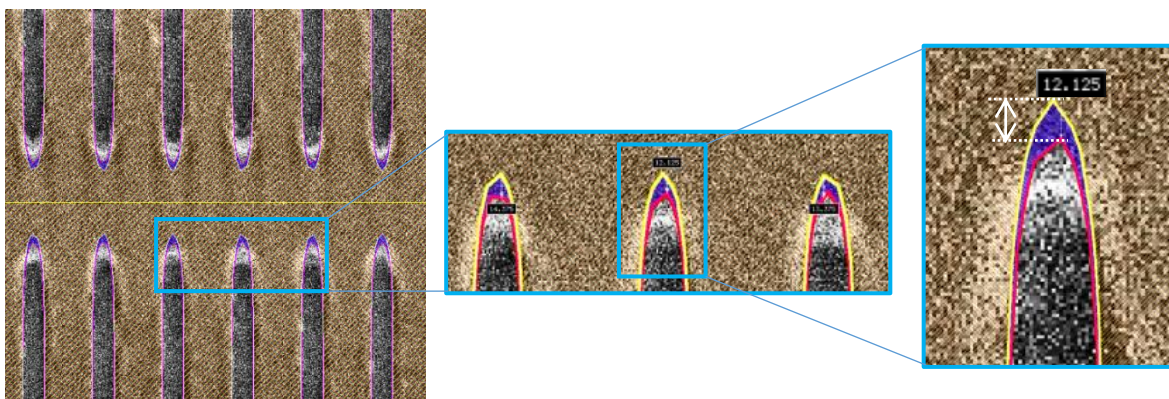


Figure 148 : Mise en évidence de prédictibilité du phénomène de raccourcissement de fin de ligne pour chacun des deux modèles vis-à-vis de l'image SEM obtenue sur plaquette. En rouge le contour obtenu avec le nouveau modèle ORC. En jaune le contour obtenu avec le modèle ORC standard.

Cette dernière structure montre également une meilleure prédictibilité du nouveau modèle par rapport au modèle standard pour la prédiction du raccourcissement de fin de ligne. On note un écart ici de 12nm sur plaquette entre nos deux contours.

### 3. Conclusion

Les structures que nous avons utilisées pour vérifier l'apport de notre modèle de réticule ont été spécialement introduites pour tester les limites de nos modèles ORC. Les structures permettant de mettre en évidence les phénomènes de "cou", "pont", "impression des SRAFs" et "raccourcissement de fin de ligne" montrent unanimement que le modèle ORC couplé au modèle de réticule est plus prédictif que le modèle ORC standard. D'autres détecteurs automatiques de défaut montrent sur la totalité du produit testé, 44% en moins de défaut de type "cou" et 88% en moins de défaut de type "pont".

## V. Conclusion et Ouverture

Après avoir passé en revue le procédé de fabrication des réticules avancés utilisant un faisceau d'électrons pour la phase d'écriture, nous avons créé un modèle de réticule permettant de prendre en compte les effets inhérents à leur fabrication. Nous avons mis en évidence la nécessité de coupler une modulation de dose, telle qu'elle est réalisée aujourd'hui, avec la modification géométrique des motifs qui composent le design présent sur réticule. Deux réticules dédiés à l'exercice ont été fabriqués pour mettre en évidence l'apport d'un modèle de réticule à l'échelle des Industriels et fabricants de puces électroniques. Le premier nous a permis de calibrer le modèle de réticule permettant de prendre en compte de manière plus précise les effets "very short range" peu voir mal corrigés lors de correction utilisant la modulation de dose uniquement. Le second réticule nous a permis d'extraire les effets du procédé de fabrication des réticules du modèle ORC standard, étant donné que les effets du procédé de fabrication des réticules sont embarqués et compensés en partie dans le sous modèle résine du modèle ORC. Nous avons ainsi proposé une méthodologie de calibration d'un modèle ORC basé sur l'utilisation du modèle de réticule. Les deux modèles ORC ont été calibrés et comparés entre eux pour en évaluer les performances en termes de prédictibilité, et valider leur utilisation pour vérification sur produit. Enfin l'étape de vérification sur plaquette nous a permis de valider l'apport d'un modèle de réticule pour un niveau de type GATE pour la technologie FDSOI 14nm.

L'étape logique qui vient après la validation de l'utilisation d'un modèle de réticule au niveau IDM serait son introduction lors des corrections faites durant l'OPC. Cependant nous sommes face à un dilemme car qui mieux que la Mask Shop pourrait corriger les effets induits lors des phases d'écriture et de gravure des réticules, sans compter que le moindre changement au niveau du procédé de fabrication entraînerait l'invalidation du modèle de réticule. D'un autre coté il est difficile pour la Mask Shop de prendre la risque de modifier le design envoyé par les industriels si un éventuel problème venait à être rencontré lors de l'exposition du réticule. Un moyen de contrôle tel qu'un ORC dédié à la phase de correction des effets de fabrication des réticules pourrait être la solution permettant aux Mask Shop de réaliser la correction géométrique des motifs qu'ils impriment sur réticule.

L'utilisation d'un modèle de réticule en avance de phase coté IDM permettrait également de mettre en évidence d'éventuels conflits lors de l'impression sur plaquettes. Cette utilisation permettrait également d'économiser les coûts de fabrication de réticules lors des itérations successives dans les phases de recherche et développement associées à l'introduction de nouveaux nœuds technologiques. Pour information, le cout d'un réticule tel que ceux que nous avons utilisés est de 170 000 Dollars.

Enfin une autre utilisation prometteuse et particulièrement intéressante, peut être faite avec un modèle de réticule. Elle concerne l'appariement entre des machines d'écritures provenant d'un même Mask Shop, ou de Mask Shop différentes. Ceci permettrait de qualifier des machines en secondes sources et d'optimiser ainsi les temps de cycles concernant la fabrication des réticules.

## **Conclusion Générale**



La première partie nous a permis de situer le contexte de notre étude, de définir les notions relatives à la microélectronique, à la fabrication de transistor et de circuits CMOS. Nous avons introduit le procédé de photolithographie optique, étape à la fois au cœur de la miniaturisation des composants mais aussi concernée par ce travail de thèse. Les bases de la lithographie ont été passées en revue ainsi que les principaux paramètres permettant de caractériser les performances associées à la lithographie. Nous avons également introduit un ensemble de généralités qui ont été utilisées dans les parties B et C de ce manuscrit. Enfin nous avons abouti à notre double problématique qui s'inscrit dans l'étape d'améliorations de la résolution.

La partie B de ce manuscrit nous a permis d'aborder la variation de Best Focus pour les multiples pas de réseaux embarqués sur un même réticule et autorisés par la règle de dessin. Notre étude a porté sur des niveaux denses de type "Métal" pour la technologie CMOS 28nm. Après avoir défini la notion de Best Focus Shift et l'importance de la prise en compte de l'épaisseur de l'absorbeur du réticule sur le trajet optique, nous avons validé l'apport d'un réticule à décalage de phase de type EaPSM, par rapport au réticule binaire avancé de type OMOG, standard actuel. Nous avons tout d'abord utilisé l'approche d'Hopkins pour comprendre l'importance des différents éléments physiques (Source, ouverture numérique, etc...) permettant de reconstituer l'image. Puis à travers l'utilisation de structures à une et deux dimensions, et via l'utilisation de simulations basées sur une méthode de résolution rigoureuse des équations de Maxwell, nous avons établi que le réticule de type EaPSM est clairement plus indiqué qu'un réticule de type OMOG.

Après validation des simulations, une vérification sur plaquette s'est imposée en ayant recours aux mêmes structures que celles utilisées pour la partie simulation. Pour les structures 1D, et via l'application de la méthodologie classique, le réticule de type EaPSM est plus indiqué que le réticule de type OMOG. On note un gain en termes de réduction des effets de focalisations pour le réticule EaPSM par rapport à l'OMOG avec une plage de dispersion en focus de 7nm pour le EaPSM et 18nm pour le réticule OMOG. Cet écart n'est pas vraiment problématique pour le réticule de type OMOG car chacun des Best Focus des structures 1D considérées est inclus dans la fenêtre de procédé globale 1D. Mais c'est surtout en termes de fenêtre de procédé que le gain est le plus significatif pour l'étude des structures 1D, avec une profondeur de champ de 120nm pour le EaPSM contre 90nm pour l'OMOG, soit 36% de plus.

Concernant les structures 2D, la méthodologie d'exploitation des résultats usuelle ne nous a pas permis d'identifier le best focus en se basant sur les courbes de Bossungs. Pour ces structures 2D le phénomène de "Bossung Tilt", alors peu observable sur les structures 1D, perturbe la détermination du best focus. Ce phénomène traduit une dépendance du Best Focus à la dose. Cette vérification a donné naissance à une nouvelle méthodologie d'exploitation des résultats plaquette pour des structures à deux dimensions, que nous avons appelée "Dose Sensitivity Methodology". Un script Matlab a été développé pour une détermination plus rapide des best focus de chaque structure 2D. Les résultats obtenus avec la méthodologie basée sur la sensibilité à la dose ont également mis en évidence une meilleure performance du réticule de type EaPSM par rapport au réticule de type OMOG. Le réticule de type EaPSM présente une plage de dispersion en Best Focus pour les structures 2D de 16nm environ, alors que pour le réticule de type OMOG, cette plage est d'environ 50nm. Nos structures 2D étant des hotspots, il est difficile de parler de fenêtre de procédé pour de telles structures. Cependant les fenêtres de procédé globales pour les structures 1D ayant été établies de manière précise pour chacun des deux réticules, nous avons étudié le

comportement de nos hotspots à l'intérieur de ces fenêtres de procédé 1D. Après avoir évalué les structures 2D en termes de criticité, le réticule de type EaPSM montre de meilleure performance pour les trois structures 2D évaluées. En effet, sur le réticule de type EaPSM les points de fonctionnements (dose et focus d'exposition) pour lesquels les structures 2D étaient résolues sont plus nombreux que pour le réticule de type OMOG. A travers la mise en place de cette nouvelle méthodologie d'exploitation nous avons donc pu pousser plus loin les investigations en comparant la réponse des deux réticules pour des structures 1D et 2D. Il apparaît ainsi d'un point de vue expérimental que l'utilisation d'un réticule de type EaPSM est plus indiquée que l'utilisation d'un réticule de type OMOG. L'EaPSM présente une fenêtre de procédé plus confortable pour les structures 1D et un best focus shift beaucoup moins important entre les différentes structures embarquées sur un niveau dense de type Métal. Le comportement de structures 2D de type Hotspot est également plus stable en termes de criticité pour le réticule EaPSM. Nous avons montré via des simulations le peu d'intérêts qu'il y avait à adopter un réticule EaPSM optimisé par rapport au réticule EaPSM standard utilisé à STMicroelectronics.

Nous avons donc répondu à notre première problématique, en validant l'utilisation d'un réticule de type EaPSM par rapport à un réticule de type OMOG, pour des niveaux denses de type "Métal" de la technologie CMOS-28nm. L'utilisation du réticule EaPSM permet à la fois d'améliorer la fenêtre de procédé globale et de réduire les écarts de focalisation sur plaquette entre les structures embarquées sur ce niveau.

A travers le caractère collaboratif lié au travail de cette partie, nous avons pu nous rendre compte à quel point les problématiques de chaque acteur industriel sont inconnues des autres acteurs. Nous avons pu ainsi avoir plus ample connaissance de part et d'autres de l'implication du réticule et de ces paramètres optiques dans la qualité finale du produit sur plaquette. Nous avons pris connaissance de manière plus précise, et pour la plupart des réticules avancés utilisés, des indices optiques et des épaisseurs des matériaux qui les composent. Ces renseignements sont essentiels dans la mesure où ils sont utilisés pour la calibration des modèles optiques M3D des modèles OPC avancés.

Malheureusement le niveau de maturité technologique du niveau étudié est tel qu'un changement de réticule implique de nombreux autres, tels que le développement d'un nouveau model OPC, un recentrage des étapes de lithographie et gravure associées, une mise en place de nouvelles cartographies de suivi, etc... . Ce que l'on appelle maturité technologique est l'échelle interne permettant d'évaluer le stade de développement d'une technologie. Le basculement est donc toujours en cours concernant le niveau Métal du CMOS 28nm. En revanche ce réticule a déjà été adopté pour des technologies (Métal C de la technologie FDSOI 14nm) pour lequel le degré de maturité n'était pas avancé.

Le travail de cette partie B a également permis de revenir sur les tolérances des différents paramètres contenus dans les certificats de conformité des réticules et d'en saisir leur importance, et ce pour les trois acteurs que nous avons identifié plus tôt, à savoir les Blank Provider, les Mask Shops et les Integrated Device Manufacturer. Il est ainsi fondamental que ces trois acteurs saisissent l'importance du réticule sur la faisabilité et la qualité finale d'une puce. Les technologies avancées tels que les technologies FDSOI 14nm impliqueront forcément une collaboration de plus en plus étroite entre ces trois acteurs et une prise de conscience plus importante du procédé total, de la fabrication du réticule à l'élaboration de la puce. Outre la possibilité de déterminer le Best Focus, la nouvelle méthodologie d'exploitation

des résultats plaquette, que nous avons appelée “Dose Sensitivity Methodology”, pourrait être utilisée pour établir des règles de dessin, afin de savoir si toutes les structures complexes à deux dimensions seront résolues dans une fenêtre de procédé viable sur plaquette.

Concernant la partie C de ce manuscrit, nous avons passé en revue le procédé de fabrication des réticules avancés utilisant un faisceau d'électrons pour la phase d'écriture. La nécessité de coupler une modulation de dose, en complément de la modification géométrique des motifs embarqués sur le réticule nous a conduits à créer un modèle de réticule capable de prendre en compte les effets inhérents à ceux-ci lors de leurs fabrications. Deux réticules ont été fabriqués pour mettre en évidence l'apport d'un modèle de réticule à l'échelle des Industriels et fabricants de puces électroniques. Un premier réticule nous a permis de créer le modèle de réticule pour prendre en compte les effets “very short range” peu voir mal corrigés, lors de correction utilisant la modulation de dose uniquement. Le second réticule a bénéficié des corrections apportées par ce modèle de réticule et nous a également permis de créer un modèle ORC “pure” pour l'exercice de comparaison de nos deux processus de correction (celui contenant le modèle de réticule et l'autre ne le contenant pas). En effet, les effets du procédé de fabrication des réticules sont embarqués et compensés en partie dans le sous modèle résine du modèle ORC standard. Nous avons ainsi proposé une première méthodologie de calibration d'un modèle ORC basé sur l'utilisation du modèle de réticule afin de la comparer à la méthodologie standard. Cette comparaison a permis d'évaluer les performances de chacun des deux modèles ORC en termes de prédictibilité, et d'en valider leur utilisation pour vérification sur produit. L'étape de vérification sur plaquette nous a permis de valider l'apport d'un modèle de réticule pour un niveau de type GATE pour la technologie FDSOI 14nm. Les structures utilisées pour vérifier l'apport de notre modèle de réticule ont été spécialement introduites pour tester les limites de nos modèles ORC. Ces structures permettant de mettre en évidence les phénomènes de “cou”, “pont”, “impression des SRAFs” et “raccourcissement de fin de ligne” montrent unanimement que le modèle ORC couplé au modèle de réticule est plus prédictif que le modèle ORC standard. De plus d'autres détecteurs automatiques de défaut montrent sur la totalité du produit testé 44% en moins de défaut de type “cou” et 88% en moins de défaut de type “pont”.

Nous retiendrons également la mise en place d'une méthodologie et d'un ensemble de motifs permettant de calibrer un modèle de réticule et d'en vérifier la qualité. Cependant le gain de l'utilisation d'un modèle de réticule sera plus conséquent sur les niveaux de technologies à venir de type 10nm ou 7nm, qui utilise un réticule en transmission. En effet, plus la taille des motifs à imprimer sur le réticule est petite, et plus les effets Very Short Range seront prépondérants et difficilement pris en compte dans nos modèles ORC standard.

L'étape suivante qui vient après la validation de l'utilisation d'un modèle de réticule telle que nous l'avons faite serait son introduction lors des corrections faites durant l'OPC. Or qui mieux que la Mask Shop pourrait corriger les effets induits lors des phases d'écriture et de gravure des réticules. De plus le moindre changement au niveau du procédé de fabrication entraînerait l'invalidation du modèle de réticule calibré. Il est également important de noter qu'il est difficile pour la Mask Shop de prendre le risque de modifier le design envoyé par les industriels si un éventuel problème venait à être rencontrer lors de l'exposition du réticule. Afin de lever ce verrou en termes de prise de responsabilité, il apparait que le seul moyen de contrôle serait un ORC dédié à la phase de correction des effets de fabrication des réticules.

Le modèle de réticule tel qu'il a été présenté dans cette thèse permettrait également de mettre en évidence d'éventuels conflits lors de l'impression sur plaquettes, et ce, en avance de phase, c'est-à-dire avant même que le réticule soit commandé. Cette utilisation permettrait donc d'économiser les coûts de fabrication de réticules lors des itérations successives dans les phases de recherche et développement associés à l'introduction de nouveaux nœuds technologiques. Pour information, le coût d'un réticule tels que ceux que nous avons utilisés est de l'ordre de 170 000 Dollars.

D'autres utilisations prometteuse et particulièrement intéressante, peuvent être faite avec un modèle de réticule. Elles concernent l'appariement entre des machines d'écritures provenant d'une même Mask Shop, ou de Mask Shop différentes. En effet les industriels (IDM) ont souvent pour stratégies d'avoir en tant que fournisseur une ou plusieurs secondes sources. Côté Mask Shop, lorsqu'une machine d'écriture est en maintenance il leur sera possible d'en utiliser une autre et d'optimiser ainsi les temps de cycles concernant la fabrication des réticules.

In fine, les réticules sont un élément clé de l'étape de lithographie et l'évaluation au sens large proposée dans cette thèse permet de s'en rendre compte. De leur procédé de fabrication à leur utilisation finale, de manière directe concernant la formation de l'image aérienne ou indirecte concernant leur utilisation dans la modélisation OPC, ils contribuent à la qualité des puces réalisées et, s'ils sont pris en compte, peuvent participer pour beaucoup à l'étape d'amélioration de la lithographie optique par projection-réduction.



# Bibliographie

- [1] N. Yoshioka, «Optical Masks : An overview,» chez *Handbook of photomask manufacturing technology*, Rizvi, Syed for CRC press Taylor & Francis Group, 2005
- [2] Harry Levinson. "Principles of Lithography". SPIE Press, 2001
- [3] Alfred Kwok-Kit Wong. "Optical Imaging in Projection Microlithography". SPIE Press, 2005.
- [4] Chris Mack. "Fundamental Principles of Optical Lithography". Wiley, 2007.
- [5] ASML, «NA/SIGMA OPTIMIZATION,» 16 Avril 2002.
- [6] S. Landis (2011). Nano-Lithography. Wiley-ISTE, New York
- [7] Levinson, H. Principles of lithography. Society of photo optical, 2005
- [8] Schellenberg, F. MEEF theory and practice. SPIE BACUS, 1999, Vol. 3873.
- [9] J. Gauthier J.L. Leray, J.C. Boudenot. "La Micro-Nanoélectronique Enjeux et Mutation". CNRS Editions, 2009.
- [10] Clovis Alleaume. "Etude de la modification de la source dans l'utilisation de la méthode de optimisation source masque en lithographie optique, mise en œuvre et applications". PhD thesis, Ecole doctorale Sciences Ingénierie Santé, Saint-Etienne, 2014.
- [11] K. a. D.B.Dove, «Thin film materials for the preparation of attenuating phase shift masks,» *Journal of Vacuum Science and Technology*, vol.B12, pp. 32-36, 1994.
- [12] M. R. W. D. P.PATEL, «Physical and optoelectronic characterization of reactively sputtered molybdenum-silicon-nitride alloy metal gate electrodes,» *Journal of applied physics* 105, 024517, 2009.
- [13] A. C.PIERRAT, «Phase shifting mask topography effect on lithographic image quality,» *International electron devices meeting*, pp. 53-56, 1992
- [14] G. R. H. K.TOH, «Chromeless phase shifting masks : a new approach to phase shifting mask,,» *Proc. SPIE*, 1990.
- [15] R. F. C. G. R. L. P.Garcia, «Thin Film for phase shift masks,» *Vacuum and Thin films*, pp. 14-21, sept. 1999
- [16] S.Moulis. "Lithographie par division de pas de réseau pour les circuits logiques avancés". PhD thesis. Instituts des Nano Technologies de Lyon, 2014.
- [17] K.Lucas et al., Implications of triple patterning for 14nm node design and Patterning. Proc. of SPIE Vol. 8327 832703-1, 2014
- [18] Jan Mulkens et al." Overlay and edge placement control strategies for the 7nm node using EUV and ArF lithography ", Proc. SPIE 9422, 94221Q (March 13, 2015)

- [19] B.Mortini, "Etude des resines photolithographiques positives 193 nm a amplification chimique et mise au point de leurs conditions de procede". PhD thesis, Grenoble : Université Joseph Fourier, 2001.
- [20] J.Michel, "Caractérisation et modélisation des effets d'empilement des couches minces sous la résine photosensible pendant le procédé de photolithographie optique". PhD thesis, Université de Saint-Etienne. 2014
- [21] Saied Mazen. "Etude de la stabilité et de la précision des modèles utilisés dans la correction des effets de proximité optique en photolithographie". PhD thesis, Ecole doctorale d'Electronique, Electrotechnique, Automatique et Traitement du signal, Grenoble, 2011.
- [22] M. Born, E. Wolf, and A. Bhatia, Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light. Cambridge Univ Pr, 2000.
- [23] H. H. Hopkins, "On the diffraction theory of optical images," Proc. Roy. Soc., vol. A, no. 217, pp 408–432, 1953. 22, 26
- [24] Pavel Nesladek." EUV mask process specifics and development challenges ", Proc. SPIE 9256, Photomask and Next-Generation Lithography Mask Technology XXI, 92560H (July 28, 2014);
- [25] Lieve Van Look et al." Experimental validation of novel mask technology to reduce mask 3D effects ", Proc. SPIE 9635, Photomask Technology 2015, 96350Z (October 23, 2015);
- [26] Aamod Shanker ; Martin Sczyrba ; Brid Connolly et al." Absorber topography dependence of phase edge effects ", Proc. SPIE 9635, Photomask Technology 2015, 96350G (November 9, 2015);
- [27] Frank Staals; Jo Finders, et al. "Advanced wavefront engineering for improved imaging and overlay applications on a 1.35 NA immersion scanner", Proc. SPIE 7973, Optical Microlithography XXIV, 79731G (March 22, 2011);
- [28] Terasawa, T. Theoretical calculation of mask error enhancement factor for periodic pattern imaging. 12B, Jpn, J. Appl. Phys, 2000, Vol. 39.
- [29] Kane S. Yee, "Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media"Lawrence Radiation Lab., University of California, Livermore. 28 January, 1966.
- [30] A. Taflove, Computational electrodynamics : The Finite-Difference Time-Domain Method. Artech House Publishers, 1995. p72
- [31] A. Taflove and S. C. Hagness, Computational Electrodynamics : The Finite-Difference Time-Domain Method, 3rd ed. Artech House Publishers, June 2005.
- [32] K. Kunz and R. Luebbers, The finite difference time domain method for electromagnetics, 1st ed.CRC-Press, July 1993. 72, 164
- [33] Eric Silberstein. Généralisation de la méthode modale de Fourier aux problèmes de diffraction en optique intégrée. Application aux convertisseurs modaux par ingénierie des modes de Bloch. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2002.



- [34] Thomas V. Pistor ; Andrew R. Neureuther and Robert J. Socha, "Modeling oblique incidence effects in photomasks", Proc. SPIE 4000, Optical Microlithography XIII, 228 (July 5, 2000)
- [35] Franklin M. Schellenberg and Chris A. Mack "MEEF in theory and practice", Proc. SPIE 3873, 19th Annual Symposium on Photomask Technology, 189 (December 30, 1999);
- [36] Johannes Ruoff ; Jens Timo Neumann ; Emil Schmitt-Weaver ; Eelco van Setten ; Nicolas le Masson, et al. "Polarization-induced astigmatism caused by topographic masks", Proc. SPIE 6730, Photomask Technology 2007, 67301T (October 30, 2007)
- [37] Aamod Shanker ; Martin Sczyrba ; Brid Connolly ; Franklin Kalk ; Andy Neureuther, et al. "Critical assessment of the transport of intensity equation as a phase recovery technique in optical lithography ", Proc. SPIE 9052, Optical Microlithography XXVII, 90521D (March 31, 2014)
- [38] J.XUE, Z.DENG, K.KOO, J.SHIELY, S.LEE, et al. "Integrated Mask and Optics Simulations for Mask Corner Rounding Effect in OPC Modeling" , Proc. SPIE. 7823, Photomask Technology 2010, 782341. (September 30, 2010)
- [39] M. R. W. D. P.PATEL, «Physical and optoelectronic characterization of reactively sputtered molybdenum-silicon-nitride alloy metal gate electrodes,» Journal of applied physics 105, 024517, 2009
- [40] J. j. BESSOT, «Dépôts par pulvérisation cathodique,» Techniques de l'ingénieur, 10/01/1995.
- [41] Syed Rizvi, Handbook of photomask manufacturing technology, CRC press Taylor & Francis Group, 2005
- [42] Y.NAGAWAKA, «Development of a Next-Generation E-beam lithography system, Vol.3546, 45-54,» chez Proc. of SPIE, 1998.
- [43] Nacer Zine El Abidine ; Frank Sundermann ; Emek Yesilada ; Vincent Farys ; Frederic Huguennet, et al. "Accurate mask model implementation in OPC model for 14nm nodes and beyond ", Proc. SPIE 9635, Photomask Technology 2015, 96350W (October 23, 2015);
- [44] N.Saitou, Monte Carlo simulation for the energy dissipation profiles of 5-20 keV electrons in layered structures, Journal of Applied Physics, 12(6), 941-942 (1983)
- [45] John Sturtevant ; Edita Tejnil ; Peter Buck ; Steffen Schulze ; Franklin Kalk, et al. "The impact of 14nm photomask variability and uncertainty on computational lithography solutions ", Proc. SPIE 8880, Photomask Technology 2013, 88800F (September 10, 2013)
- [46] Edita Tejnil ; Yuanfang Hu ; Emile Sahouria ; Steffen Schulze ; Ming Jing Tian, et al. "Advanced mask process modeling for 45-nm and 32-nm nodes", Proc. SPIE 6924, Optical Microlithography XXI, 69243H (March 07, 2008)
- [47] Seung-Hune Yang ; Yo-Han Choi ; Jong-Rak Park ; Yong-Hoon Kim ; Sung-Woon Choi, et al. "Fogging Effect Consideration in Mask Process at 50 KeV E-Beam Systems", Proc. SPIE 4889, 22nd Annual BACUS Symposium on Photomask Technology, 786 (December 24, 2002)
- [48] M. Ogasawara et al., Reduction of long range fogging effect in a high acceleration voltage electron beam mask writing system, Journal of Vacuum Science & Technology B:

Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena 1999 17:6, 2936-

[49] Shusuke Yoshitake; Takashi Kamikubo; Noriaki Nakayamada; Kiyoshi Hattori; Hiroyoshi Ando, et al. "EBM-8000: EB mask writer for product mask fabrication of 22nm half-pitch generation and beyond", Proc. SPIE 8166, Photomask Technology 2011, 81661D (October 13, 2011)

[50] Sanghee Lee ; Sungho Park ; Mihye Ahn ; Jonggul Doh ; Sungyoon Kim, et al. "Study of the beam blur and its effect on the future mask fabrication", Proc. SPIE 6349, Photomask Technology 2006, 63490X (October 20, 2006);

[51] Seung-Hune Yang ; Won-Tai Ki ; Seong-Yong Moon ; Tae Moon Jeong ; Seong-Woon Choi, et al. "Effect of beam blur in mask fabrication", Proc. SPIE 4186, 20th Annual BACUS Symposium on Photomask Technology, 468 (January 22, 2001)

[52] A.BARBERET; G.FANGET; P.BUCK; J.RICHOILLEY, et al. "Adjustment of optical proximity correction (OPC) software for mask process correction (MPC). Module 1: Optical mask writing tool simulation", Proc. SPIE4562, 21st Annual BACUS Symposium on Photomask Technology, 511. (March 11, 2002)

[53] A.BARBERET; G.FANGET; P.BUCK; J.RICHOILLEY, et al. "Adjustment of optical proximity correction (OPC) software for mask process correction (MPC); Module 2: Lithography simulation based on optical mask writing tool simulation", Proc. SPIE 4754, Photomask and Next-Generation Lithography Mask Technology IX, 460 (July 31, 2002)

[54] Timothy Lin ; Tom Donnelly and Steffen Schulze. "Model based mask process correction and verification for advanced process nodes", Proc. SPIE 7274, Optical Microlithography XXII, 72742A (March 16,2009)

[55] Timothy Lin ; Tom Donnelly ; Gordon Russell ; Sunwook Jung and Jiyoung Jeong "Application of mask process correction (MPC) to monitor and correct mask process drift", Proc. SPIE 7971, Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXV, 797107 (March 28, 2011)

[56] L.MELVIN III, T.SCHMOELLER, C.KALUS, J.LI, "Three Dimensional Mask Effects in OPC Process Model Development from First Principles Simulation" Proc. SPIE. 6792, 24th European Mask and Lithography Conference, 679207. (April 22, 2008)

[57] S.LEE; J.HWANG; D.BEALE; M.JOHN; R.LUGG; S.BAEK, et al. " Mask process effect aware OPC modeling" Proc. SPIE 7028, Photomask and Next-Generation Lithography Mask Technology XV, 70283E (19 May 2008)

[58] N. Cobb, Fast optical and process proximity correction algorithms for integrated circuit manufacturing. PhD thesis, Citeseer, 1998.

[59] N. B. Cobb, A. Zakhor, M. Reihani, F. Jahansooz, and V. N. Raghavan, Experimental results on optical proximity correction with variable-threshold resist model, 1997.

[60] Ingo Bork ; Peter Buck ; Sankaranarayanan Paninjath ; Kushlendra Mishra ; Christian Bürgel, et al." Mask model calibration for MPC applications utilizing shot dose assignment ", Proc. SPIE 9235, Photomask Technology 2014, 92350A (October 8, 2014)

# Conférences avec publications

Nacer Zine El Abidine ; Frank Sundermann ; Emek Yesilada ; El Hadji Omar Ndiaye ; Kushlendra Mishra, et al. "Accurate mask model for advanced nodes ", Proc. SPIE 9256, Photomask and Next-Generation Lithography Mask Technology XXI, 925603 (July 28, 2014);

Nacer Zine El Abidine; Frank Sundermann; Jo Finders et al. "Mask Blank Optimization through rigorous EMF approach from IDM perspective, for 28 nm node and beyond". Proc. SPIE 9256, Photomask and Next-Generation Lithography Mask Technology XXI, 925603 (July 28, 2014);

Nacer Zine El Abidine ; Frank Sundermann ; Emek Yesilada ; Vincent Farys ; Frederic Huguennet, et al. " Accurate mask model implementation in OPC model for 14nm nodes and beyond ", Proc. SPIE 9635, Photomask Technology 2015, 96350W (October 23, 2015);

## Publications

Nacer Zine El Abidine ; Frank Sundermann ; Emek Yesilada ; Vincent Farys ; Frederic Huguennet, et al. "Accurate mask model implementation in optical proximity correction model for 14-nm nodes and beyond", J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS. 15(2), 021011 (Apr 27, 2016).

# Résumé

Pour les technologies avancées, la lithographie optique par immersion utilisant des sources 193nm atteint ses limites en termes de résolutions. Les nouvelles techniques de lithographie telles que l'Extrême UV ou l'écriture à faisceaux multiples n'étant pas encore au point d'un point de vue industriel, un ensemble de techniques d'améliorations de la résolution (RET) en évolution constante permet de continuer à travailler avec les équipements à immersion. C'est dans ce contexte que s'inscrit cette thèse en se focalisant sur un des éléments principaux : le réticule.

La première partie regroupe l'état de l'art de la photolithographie optique et des techniques d'amélioration de la résolution, ainsi qu'un ensemble de notions utiles à la compréhension des parties B et C. La partie B concerne la réduction des effets de focalisation, plus connu sous l'appellation anglaise "Best focus shift mitigation", observés sur des niveaux denses de type "Metal" pour les technologies avancées. Cette partie permet de comprendre l'influence des organes physiques sur le trajet optique et propose comme solution au Best focus Shift un changement de réticule, validé d'abord via simulation puis par voie expérimentale sur plaquette. La partie C de ce manuscrit présente la prise en compte des effets inhérents à la fabrication des réticules dans l'étape de correction des effets de proximité optique, de la description des effets impliqués à la calibration et l'utilisation d'un modèle dédié.

Mots Clés : Effet de défocalisation, Modèle de réticule, MPC, OPC

# Abstract

For advanced technologies nodes, immersion optical lithography using 193nm sources reaches its limits in terms of resolutions. Since new lithography techniques such as Extreme UV or multi-beam writing are not yet ready from an industrial point of view, a continuous evolving set of tools known as Resolution Enhancement Techniques (RET) allows to continue working with immersion equipment, pushing the resolution limits as much as possible. With the increasing design complexity, this task is more and more challenging. Within this frame this dissertation is addressed to improve the lithographic process variability by focusing on one of the main elements: the reticles.

The first part brings together the state of the art of optical photolithography and resolution improvement techniques, as well as a set of concepts useful for parts B and C understanding. Part B deals with the reduction of focusing effects, better known as "Best focus shift mitigation", observed on dense levels such as "Metal" for advanced technologies. This part helps to understand the influence of the physical organs on the optical path and proposes as a solution to the Best focus Shift a reticle change, firstly validated via simulation and then experimentally at wafer level. Part C presents how the inherent effects of reticle fabrication can be taken into account in the Optical Proximity effects Corrections steps, from the description of the effects involved to the calibration and the use of a dedicated mask model.

Key words: Best Focus Shift, Mask Modeling, MPC, OPC



