



HAL
open science

Détermination simultanée de la mise au point et de la dose d'un équipement de micro-lithographie optique

Nicolas Spaziani

► **To cite this version:**

Nicolas Spaziani. Détermination simultanée de la mise au point et de la dose d'un équipement de micro-lithographie optique. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université de Grenoble, 2012. Français. NNT : 2012GRENT125 . tel-01688605

HAL Id: tel-01688605

<https://theses.hal.science/tel-01688605>

Submitted on 19 Jan 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.

THESE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Nanoélectronique et Nanotechnologies**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

présentée par

Nicolas SPAZIANI

Thèse dirigée par **René-Louis INGLEBERT** et
codirigée par **Jean MASSIN**

préparée au sein du **Laboratoire des Technologies de la Microélec-
tronique L.T.M, Commissariat à l'Energie Atomique C.E.A** et sur
le site de **STMicroelectronics (Crolles)**

dans le cadre de l'**École Doctorale Electronique, Electrotechnique,
Automatisme & Traitement du Signal**

Détermination simultanée de la mise au point et de la dose d'un équipe- ment de micro-lithographie optique

Thèse soutenue publiquement le **07/11/2012**,
devant le jury composé de :

Mr, Stéphane DAUZERE

Professeur - Ecole des Mines de Saint-Etienne, Président

Mr, Régis OROBTCHOUK

Maitre de conférence - INSA de Lyon, Rapporteur

Mr, François FLORY

Chargé de recherche - Ecole Centrale de Marseille, Rapporteur

Mr, Maxime BESACIER

Maitre de conférence - Université Joseph Fourier Grenoble, Examineur

Mr, René-Louis INGLEBERT

Professeur - Université Joseph Fourier Grenoble, Directeur de thèse

Mr, Jean MASSIN

Docteur - STMicroelectronics Crolles, Co-encadrant



*« Rien n'est plus stable que le changement »
Bob Dylan*

Remerciements

Mathématiquement parlant, les remerciements sont une famille $f(r_t)$, avec r qui représente les remerciements et t qui représente le type de remerciement, appartenant à H l'ensemble des humains. On a alors, quelque soit t appartenant au couple (*classique, original*), 2 types de remerciement. On associe également à $f(r_t)$ le trio (n, p, a_o) qui représente respectivement le nom, le pourquoi et l'anecdote optionnelle. Grâce à cette famille, le thésard a pu mener à bien ses travaux de recherche et survivre jusqu'à sa soutenance.

Dans ce manuscrit, on utilise l'équation 1 pour (r_t) appartenant à H :

$$f(r_{t=original}) = (n, p, a_o) \quad (1)$$

$f(r_{t=original})$ est donc une matrice à n éléments, ou n représente le nombre de personnes à remercier et donc le nombre de messages que l'on souhaite faire passer.

Artistiquement parlant, les remerciements sont une page blanche sur laquelle le thésard pourra, enfin, se libérer. Et alors que cette page blanche s'offre entièrement à moi comme une toile vierge, je m'appête à écrire des phrases que personne ne pourra reprendre et qui concluront en beauté ces trois années de thèse.

En premier lieu, je souhaite remercier Mr. Stéphane Dauzère, Professeur à l'Ecole des Mines de Saint-Etienne, d'avoir accepté la présidence de ce jury. J'adresse également mes remerciements à Mr. Régis Orobitchouk, Maître de conférence à l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon et à Mr. François Flory, Professeur des Universités à l'Ecole Nationale Supérieure de Physique de Marseille, d'avoir accepté de juger ce travail en tant que rapporteur. Merci pour vos remarques et vos conseils qui m'ont permis d'améliorer la qualité de mon manuscrit, et merci pour l'intérêt que vous avez porté à mes travaux. Mes remerciements vont aussi à Mr. Maxime Bezacier, Maître de conférence à l'Université Joseph Fourier de Grenoble, l'Examineur interne de ma thèse. Merci à tous de votre participation, et même si elle arrive temporellement à la fin de ces travaux, elle n'en est pas moins restée importante.

Je tiens à remercier mon directeur de thèse, Mr. René-Louis Inglebert, pour la confiance qu'il m'a accordée en acceptant d'encadrer ce travail doctoral, pour ses multiples conseils et pour toutes les heures qu'il a consacrées à diriger cette recherche. J'aimerais également lui dire à quel point j'ai apprécié sa grande disponibilité et son respect sans faille des délais serrés de relecture des documents que je lui ai adressés. Et même si nos premiers échanges étaient animés, je suis sûr qu'aujourd'hui, il ne regrette rien.... Enfin j'espère.

J'adresse mon plus grand merci à Mr. Jean Massin, mon co-encadrant STMicroelectronics, pour sa gentillesse, sa disponibilité, son aide et son expérience, dont il m'a fait bénéficier tout au long de ces travaux. L'autonomie qu'il m'a laissée et les responsabilités inhérentes à mon activité m'ont permis de progresser tant au niveau personnel que professionnel. J'ai été extrêmement sensible à ses qualités humaines d'écoute et de compréhension tout au long de ce travail doctoral. De ces 3 ans, je ne retiendrais qu'une seule question : "Mais au fait Jean, c'est quoi le focus ?"

En commençant ma thèse en février 2009, j'ai intégré l'atelier R&D de photolithographie chez STMicroelectronics à Crolles. Je profite d'ailleurs de ces lignes pour remercier Jean Galvier, directeur de l'area patterning et l'ensemble de son équipe. L'amitié et l'aide que m'a apportée cette area m'a permis de traverser plus sereinement cette période de thèse. Que ce soit au détour d'un couloir, en salle blanche ou en salle café, votre présence m'a été essentielle. J'espère vous avoir laissé quelques bons souvenirs. Dans mon cas, ces trois ans de thèse ont été aussi synonymes de bouleversements personnels, et votre soutien m'a permis de les rendre encore plus mémorable.

Je voudrais remercier par ordre alphabétique, Laurène Babaud, pour son aide et pour les conversations de thésards que nous avons eues. Je lui souhaite des moments de bonheur avec son bébé. Merci également à Fabrice Baron, le Zinédine et le pro du Barbeuc de la litho. Je lui souhaite également plein de bonnes choses avec sa petite fille. Merci également à Christophe Beral, nouvel IBMer Litho, pour toutes ces heures passées sur la ligue 1. Je lui souhaite de réaliser le plus beau mariage de l'année 2013. Merci à Daniel Boutin de m'avoir appris la manipulation et l'utilisation des pistes. Son inestimable expérience m'a aidé tout au long de ces années. Je n'oublie pas non plus Jean-Damien Chapon pour sa disponibilité et la confiance qu'il m'a accordée. Je lui souhaite beaucoup de bonheur dans son nouveau rôle de papa. Je tiens à mentionner Marianne Decaux pour ses nombreux renseignements et pour ces délicieux macarons. Et on continue avec Maxime Gatefait. Merci pour ta bonne humeur permanente et pour ton soutien sur les questions existentielles du focus. Je remercie également Pierre-Jérôme Goirand, responsable du groupe R&D Litho à

Crolles de m'avoir accueilli dans son groupe et de la confiance qu'il m'a accordée. Il y a aussi Karine Jullian à qui je souhaite beaucoup de bonheur dans sa nouvelle vie de "peut-être" thésarde. Merci d'avoir organisé les repas les plus chaleureux en Litho. On ne cite pas Karine sans citer Béber, Bertrand Le-Gratiet. Ces conseils précieux et ces compétences ont guidé la réalisation de mon projet. Merci également pour la visite guidée de San Francisco. Un grand merci à Michael May et à nos discussions secrètes surtout le jour où nous étions à la petite cafétéria et que ... Eh, c'est secret on a dit. Merci aussi à Cédric Monget pour m'avoir donné un coup de main sur les études de sensibilités des coefficients. Je remercie aussi Bastien Orlando pour ces conseils sur les variabilités des mesures. N'oublie pas Bastien que notre collaboration continue au niveau des implants. Alors merci pour les futures plaquettes que tu prépareras avec amour. Merci encore à Alain Ostrovsky pour ces fabuleux récits sur les océans et les voiliers. Je n'oublie pas Nicolas Thivolle pour ces discussions (de travail bien sûr) et pour sa sérénité. Un merci tout particulier à Arthur Winslow pour sa gentillesse. Je lui souhaite un bon retour aux Etats-Unis. Enfin, un grand merci à Raphaël Zekri, le benjamin de la Litho, avec qui on s'est toujours soutenu et motivé durant cette période.

Coté Litho Eng, j'adresse mes plus grands remerciements à Vincent Coutellier que vous retrouverez sur scènes avec son groupe MAGNETOSCOPIE, Jean De-Caunes le spécialiste du Run-2-Run, Auguste Lam le spécialiste des équipements scanner, Yohann Lebel le spécialiste piste et Alice Pelletier pour son aide précieuse lors de mes corrélations avec les résultats de production. Plus particulièrement, je remercie Stuart Gough pour son aide lors des traductions des papiers pour les différentes conférences. Un grand merci également à Félix Dufaye et à Franck Sundermann pour leurs disponibilités et pour leurs aides dans la réalisation du DAFT réticule. Franck, tu as été un super compadré tout au long de l'aventure ST Crolles. Merci encore.

J'aimerais aussi remercier les personnes de l'équipe métrologie comprenant Régis Bouyssou, Karen Dabertrand, Jean-Baptiste Dandonneau, Christophe Dezaudier et Patricia Gros pour leurs conseils avisés et l'intérêt qu'ils ont manifesté pour mon travail. Ces personnes, par la confiance qu'elles m'ont accordée, ont valorisé mon expérience dans l'entreprise.

J'adresse mes plus sincères remerciements aux personnes de l'équipe de gravure. Pascal Gouraud, François Leverd, Linda Parmigiani et Noredine Rassoul. Merci à vous pour l'aide que vous m'avez apporté lorsque mes plaquettes étaient à l'étape de gravure. Pendant toutes ces années, vous avez eu bon dos.

Merci également à l'équipe RET qui m'a accueilli 15 heures après la fin de mon contrat de thèse. Merci à Emek Yesilada, le manager RET, d'avoir organisé mon planning en fonction de l'état d'avancement de ma rédaction. Je lui souhaite beaucoup de bonheur dans son tout nouveau duplex à Grenoble. Je remercie aussi tout particulièrement les thésards RET, Clovis Alleaume, Jean-Christophe Michel, Sylvain Moulis, Anna Szucs et Nassima Zeggaoui pour leurs solidarités. Merci également à Charlotte Beylier et à sa performance aux fléchettes. Je remercie également Vincent Farys pour ses nombreuses formations sur les logiciels de simulation et ces magnifiques passément de jambes au jorky. On poursuit avec The RET Expert : Franck Foussadier pour ces petites phrases si délicates à mon attention ; The Gâteau Expert : Christian Gardin avec ces Charlottes aux goûts exceptionnels et enfin, The Pas De Chance Expert : Jean-Christophe Le-Denmat pour ces histoires impossibles et improbables. Un merci tout particulier à Elodie Sungauer, Loic Peraud et Guillaume Landie les futures parents de l'équipe. Je vous souhaite à tous les 3 de magnifiques moments pour vos familles. Je profite de ces quelques lignes pour dire qu'Alexandre Villaret vend une Clio noOPC qui rendra sûrement heureux n'importe quel étudiant qui possèdera un billet de 20 euros. Merci aussi à Catherine Martinelli pour ces conseils précieux sur les modèles OPC, Frédéric Robert pour sa disponibilité, son aide capitale et son casque pour téléphone. Je n'oublie pas bien sur les Bretons : Jonathan Planchot, pour la finesse de ces répliques, et Gurwan Kerien pour sa bonne humeur, sa jovialité, son enthousiasme, son tact sa joie de vivre sans aucune exagération bien sur. Je souhaite d'ailleurs à son nouveau voisin beaucoup de courage. Et enfin, merci au couple OPC Valérie Laroche et Jean-Noël Pena à qui je souhaite de réaliser le plus beau mariage sans défauts.

J'aimerais aussi remercier d'autres personnes de STMicroelectronics, Tony Mbuyi, Pierrick Millet, Morgane Delavant, Anthony Moreno, Cécile Robert, Sandra Fassetta d'avoir égayé mes journées un peu plus chaque jour. Merci à vous pour tous les moments de détente.

Je remercie également les TPP, les TPM ainsi que les TEC-P et les TEC-M pour leurs nombreuses informations (qui n'ont pas été superflues), pour l'aide qu'ils m'ont apporté ainsi que pour leurs sympathies.

Au cours de ces 3 années, j'ai partagé ma thèse avec le laboratoire LTM du CNRS. Je remercie vivement toutes les personnes qui m'ont aidé pendant cette thèse. Je pense plus particulièrement aux excellentes assistantes : Stéphanie Berger, Sylvaine Cetra, Leila Chappe et Marielle Clot. J'ai aussi une immense pensée pour les thésards, ex-thésards et post-docs du labo comme Romuald Blanc, Florian Chave, Alexandru Delamoreanu, Nader Jedidi, Céline Masclaux et bien sur, Auré-

lien Tavernier qui doit surement être en train de rédiger son manuscrit. Courage Aurélien c'est bientôt la fin!!!. Merci aussi à Cécile Gourgon et Erwine Pargon pour leur bonne humeur et leurs remarques constructives. Je n'oublie pas bien sur de remercier chaleureusement Jumana Boussey et Oliviert Joubert pour leur soutien et leur encouragement tout au long de ces années. Merci à vous de m'avoir accueillis au sein du CNRS et merci de m'avoir donné la possibilité de présenter mes travaux lors de conférences internationales.

Je tiens aussi à remercier toutes les personnes du LETI avec qui j'ai pu travailler sur ce sujet. Je pense notamment à Johann Foucher, Ludivine Dourthe, Pascal Faurie et Laurent Pain pour leurs implications dans ce sujet. Je pense aussi à Jérôme Belledent, Sébastien Berard et Jean-Luc Di-Maria mon dernier voisin de bureau avec qui nous avons partagé beaucoup de fous rires. Merci également aux infiltrés : Yohann Blancquert, Céline Lapeyre et Yorick Trouiller. Et bien sur, je n'oublie pas les compadrés de Montpellier Khatia Benotmane, Jullian Duchaine et Julien Brochet pour nos belles dernières années d'études et pour nos retrouvailles dans le grand Nord.

Je souhaiterais aussi exprimer ma gratitude aux équipementiers qui m'ont grandement aidé dans la compréhension de leurs procédés et de leurs équipements. Je pense bien sur à Jérôme Dépré et Anne Pastol d'ASML, à Stéphane Kremer de KLA-TENCOR, à Yamamoto Jirou, Yuki Tomita et Nishimura Toshiharu de DNP, à Laurent Dépré, Raphaël LaGreca et Nicolas Martin de Brion et à Ana-Marie Armeanu, Fahd Chaoui, Jorge Entradas, Clément Moyroud et Sergey Posnikiv de Mentor Graphics.

Je voudrai remercier les proches qui m'ont soutenu pendant toute cette période. Merci au nouveau gardois Yohann Dumas. Ah ah, j'ai hâte que tu mettes 30 sur la plaque d'immatriculation de ton scooter. Je pense aussi à Doc Vincent Testard mon grand collègue avec qui nous pourrons avoir des discussions que seules les docteurs comprendront. Merci aussi à Simon Ducros et sa grande famille. Beaucoup de bonheur pour vous dans votre nouvelle maison avec piscine. Je pense également à Frédéric Honno et surtout ces énormes soirées de rigolade. Je sais Fred, j'ai tout à fait d'accord. Et enfin, Bruno Odasso dit le Brunch qui donnerait encore aujourd'hui n'importe quoi pour pousser une BM avec un turbo cassé. Je pense aussi au couple de l'année, Fanny Galve et Cyril Bernardos. Je le réitère encore aujourd'hui mais ce fut un honneur d'être un témoin dans votre magnifique mariage. Merci également à Hubert Queyranne pour l'article qu'il a rédigé sur le Midi-Libre : "Laudun-L'ardoise Nicolas Spaziani, jeune physicien, désormais doctorant". Avec un titre comme ça, ma notoriété est assurée. Je ne peux pas oublier les Goretts : Luc Matin et ses histoires à

dormir dans les igloos, John Crattelet et ces fameuses décentes d'empoya, Guillaume Vincent pour ces déhanchés endiablés sur le dance-floor, Jérôme Azémar pour ces péripétie incroyables à travers le monde. Et bien sur, Florian Domengie qui a gagné, haut la main, le prix du meilleur accompagnateur de thèse. Ces compétences aux fléchettes, à la power-ball et au quizz musical rendraient jaloux n'importe qui.

Je me dois aussi de citer dans ce manuscrit des personnes chères à mes yeux. Je pense bien évidemment à Alain Bernard, Mireille Bernard, Audrey Laine, Pierre Laine, Jade Laine, Blandine Bernard, Emmanuel Dolat et Axel Dolat. Merci à vous tous pour votre accompagnement et nos innombrable rigolades.

Enfin je souhaite dédier ce travail à ma famille pour m'avoir donné les moyens d'arriver jusque-là. Merci à mes parents Adèle Spaziani et Sandro Spaziani et à mes soeurs Aurélie Spaziani et Stéphanie Spaziani pour leur amour. Votre compréhension et votre soutien quasi-quotidien m'ont été indispensables, surtout en période de grand stress. Merci aussi pour votre venue à ma soutenance, elle a contribué à rendre l'instant encore plus magique pour moi.

Et bien sur, je remercie celle qui a veillé sur moi dans tous les moments, celle qui m'a fait confiance, qui m'a soutenu sans faille dans tous mes projets et qui a accepté mes choix... Merci ma chérie Emilie Latouche!!! Ces trois ans ont vu aussi la concrétisation de notre famille. Tout mon amour à notre petit ange Rafaël.

Mathématiquement parlant, on définit enfin n_o les personnes qui n'auraient pas été nommés dans la famille $f(r_t)$ par oubli de ma part, et les prie de m'en excuser.

Table des matières

Remerciements	5
Table des acronymes	15
Table des symboles	19
Liste des figures	23
Liste des tableaux	35
Avant propos	37
Résumé	39
Summary	41
Introduction générale	43
1 Introduction au patterning	47
1.1 Introduction	47
1.2 Définition du patterning	47
1.3 Présentation de la photo-lithographie optique	48
1.4 Détermination du profil de la résine après gravure	59
1.5 Contrôle de la dimension critique	60
1.6 Conclusion	64
2 Détermination des paramètres dose/focus en photo-lithographie	67
2.1 Introduction	67
2.2 Détermination de l'énergie d'exposition	67
2.3 Détermination de la position du plan focal	71
2.4 Détermination simultanée du focus et de la dose	75

2.5	Conclusion	76
3	Méthodes de décorrélation Dose/Focus	79
3.1	Introduction	79
3.2	Présentation des méthodes expérimentées de détermination du focus	79
3.3	Présentation des méthodes développées durant cette thèse	86
3.4	Conclusion	98
4	Optimisation de la méthode FDO	99
4.1	Introduction	99
4.2	Formation des images en photo-lithographie	99
4.3	Optimisation de la méthode par les motifs	104
4.4	Conclusion	123
5	De la théorie à la pratique : Application au scanner	125
5.1	Introduction	125
5.2	Présentation du système Twinscan®	125
5.3	Méthode de calibration des paramètres photo-lithographiques du scanner	128
5.4	Méthode de calibration de la dose d'exposition d'un scanner	129
5.5	Méthode de calibration du plan focal d'un scanner	130
5.6	Correction des paramètres photo-lithographique	137
5.7	Conclusion	138
6	Validation de la méthode FDO	139
6.1	Introduction	139
6.2	Représentation de la dimension critique	139
6.3	Validation de la méthode sur Silicium	141
6.4	Quantification des effets liés à la dose d'exposition	143
6.5	Quantification des effets liés au focus	147
6.6	Caractérisation des nouveaux équipements	164
6.7	Compensation des erreurs en dose et en focus	169
6.8	Précision de la méthode FDO sur Silicium nu	170
6.9	Conclusion	171
7	Intégration de la méthode FDO dans une boucle de régulation	173
7.1	Introduction	173
7.2	Définition d'une boucle de régulation	173
7.3	Régulation du couple dose/focus	177

7.4	Intégration au système existant	177
7.5	Validation de la boucle de régulation sur silicium	183
7.6	Conclusion	187
	Conclusion générale et perspectives	189
	A Statistiques et types d'erreurs	193
A.1	Rappels de statistiques	193
A.2	Type d'erreur	195
A.3	Echantillonnage et points de mesure	195
	B Métrologie	197
B.1	Microscope à balayage électronique	197
B.2	Scattérométrie SCD	201
B.3	Le microscope à force atomique 3D	204
B.4	Conclusion	207
	C Technologie des réticules	209
C.1	Réticule d'amplitude ou réticule binaire	210
C.2	Réticule à décalage de phase	210
C.3	Réticules RIM	211
C.4	Réticules sans chrome	211
C.5	Facteur d'erreur du réticule	211
	Références bibliographiques	213
	Liste des publications	229
	Index	231

Table des acronymes

AFM	Atomic Force Microscopy / Microscopie à Force Atomique
AGILE	AirGauge Improved process LLeveling / Amélioration de la Détermination du Focus par Pression d'Air
AltPSM	Alternated Phase Shifting Mask / Réticule à décalage de phase alterné
AttPSM	Attenuated Phase Shifting Mask / Réticule à décalage de phase atténué
BARC	Bottom Anti-Reflective Coating / Couche inférieure d'Anti-Réfléctif
BCD	Bottom Critical Dimension / Dimension Critique au Pied [nm]
BCT	Barc Coater / Etalement du Barc
CD	Critical Dimension / Dimension Critique [nm]
CDSEM	CD Scanning Electron Microscopy / Microscopie Electronique à Balayage
CEA	Commissariat à l'Energie Atomique
CIFRE	Conventions Industrielles de Formation par la REcherche
CNRS	Centre National de Recherche Scientifique
CO	Condition Optimales d'exposition
COG	Chrome On Glass / Chrome sur Quartz
COT	Coater / Etalement de la résine
Cp	Capability Process / Capabilité du Procédé
CPHP	Chilling Precision Hot Plate / Plaque de réchauffement
CPk	Process Performance Index/ Indice de Performance du Procédé
CR	Corner Rounding / Effet de coin
CS	Chuck Spot / Zones Défocalisées
DAFT	Dose And Focus Technic / Réticule Décalage Local du Focus
DEV	Development / Développeur
DNP	Dai Nippon Printing / Fournisseur de réticule

DOF	Depth Of Focus / Profondeur De Champ [nm]
EL	Exposure Latitude [%] / Latitude en Energie [%]
ELM	End of Line Metrology / Metrologie de Fin de Ligne
ES	Energy Sensor / Capteur d'Energie
EUV	Extreme Ultra-Violet
FDO	Focus Dose Optimisation / Optimisation de la Dose et du Focus
FDP	Focus Dose Pattern / Motif Dose Focus
FEM	Focus Exposure Matrix / Matrice Dose Focus
FOCAL	FOCUS Calibration by using ALIGNMENT / Détermination du Focus par Mesure d'Alignement
FOUP	Front Opening Unified Pod
FRP	Focus Reference Plane / Plan de Référence du Focus
HCP	High Chill Plate / Plaque de refroidissement
HMDS	HexaMéthylDiSilazane ((CH ₃) ₃ Si – NH – Si(CH ₃) ₃)
IBM	International Business Machine
IH	Immersion Hood / Module d'Immersion
IPD	Image Plane Deviation / Déviation du Plan Image
ITRS	International Technology Roadmap for Semiconductors /Feuille de route in- ternationale des technologies des semi-conducteurs
LES	Line End Shortening / Bout de Ligne
LETI	Laboratoire d'Electronique et de Technologie de l'Information
LS	Level Sensor / Capteur de Niveau
LTM	Laboratoire des Technologies de la Micro-électronique
LVT	Leveling Verification Test / Test de Vérification du Niveau
MCD	Middle CD / CD à mi hauteur [nm]
MEEF	Mask Error Enhancement Function / Fonction d'erreur du réticule
MESDIM	Measure Dimension / Mesure dimensionnelle du produit
MoSi	Molybdenum and Silicon
MRP	Measurment Reference Plane / Plan de Référence de la Mesure
NA	Numerical Aperture / Ouverture Numérique
NPW Focus	Non Productive Wafer for Focus/ Plaquette de Suivi du Focus

OMOG Opaque MoSi on Glass / Réticule MoSi sur Quartz

OPC Optical Proximity Correction / Correction d'Effet de Proximité Optique

OPE Optical Proximity Effect / Effet de proximité optique

PAB Post Applied Bake / Recuit de la résine après étalement

PAG Photo Acid Generator / Photo Générateur d'Acide

PEB Post Exposure Bake / Recuit de la résine après Exposition

PGFM Phase Grating Focus Monitor / Suivi du Focus par Décalage du Motif

PIR Post Immersion Rinse / Rinçage après exposition

PMG Process Monitor Grating / Réseau de Suivi des Procédés

PSFM Phase Shift Focus Monitor / Suivi du Focus par Décalage de Phase

PSM Phase Shifting Mask / Réticule à décalage de phase

PW Process Windows / Fenêtre de procédé

R2R Run-To-Run / Boucle de régulation

r-PSG repeated Phase Shift Grating / Répétition du Motif à Décalage de Phase

RSC Réticule Shape Correction / Correction de Forme du Réticule

SB Scattering Bars / Lignes non Résolues

SCD Scatterometry for Critical Dimension / Scattérométrie pour Dimension Critique

SL Scribe Lines / Chemins de découpes

SS Spot Sensor / Capteur d'Intensité

STM Scanning Tunneling Microscope / Microscope a Effet Tunnel

TARC Top Anti-Reflective Coating / Couche supérieure d'Anti-Réfléctif

TCD Top Critical Dimension / Dimension Critique au Sommet [nm]

TIS Transmission Image Sensor / Capteur de Transmission d'Image

TMAH TétraMéthylAmmonium Hydroxide (CH₃)₄NOH

UV Ultra-Violet

Table des symboles

(ν, v)	Plan des fréquences spatiales
(ρ, Θ)	Coordonnées polaires dans la pupille circulaire
(x, y)	Espace direct
α	Angle maximum d'ouverture de l'objectif [°]
$\delta\lambda$	Variation de la longueur d'onde [nm]
δn	Variation de l'indice du milieu
δt	Variation de la température du milieu [°]
δx	Variation d'un paramètre machine
δy	Variation d'un paramètre mesurée
$\delta z_{\text{éléments}}$	Différence de planéité des éléments [nm]
\hat{Y}_t	Estimation de la sortie du procédé de régulation
λ	Longueur d'onde [nm]
$\pm F_i$	Pas de focus différents
$\pm F'_i$	Pas de focus différents
σ	Facteur de cohérence partielle
θ	Angle inférieur du motif de résine [°]
θ_d	Angle inférieur droit de la résine [°]
θ_g	Angle inférieur gauche de la résine [°]
ΔF	Erreur de position focale photo-lithographique [nm]
$a_{\text{DualTones}}$	Coefficients de sensibilité de la méthode Dual Tones
a_d, b_d, c_d	Coefficients moyens de sensibilité de la dose

a_f, b_f	Coefficients de sensibilité du focus
a_{ij}	Coefficients de sensibilité de la dose ou du focus
a_{NPW}	Sensibilité quadratique du focus pour le test NPW [$/nm$]
a_t	Ajustement de la recette
b_{NPW}	Sensibilité linéaire du focus pour le test NPW
c_{NPW}	Valeur du CD lorsque le focus est nul pour le test NPW [nm]
CD_d	CD du motif de droite [nm]
CD_g	CD du motif de gauche [nm]
CD_h	Mesure du CD d'un motif horizontal [nm]
CD_m	CD du motif du milieu [nm]
CD_v	Mesure du CD d'un motif vertical [nm]
$Cible$	Cible de la sortie du procédé de régulation
D	Dose d'exposition [$\frac{mJ}{cm^2}$]
$D_{optimale}$	Dose optimale d'exposition [$\frac{mJ}{cm^2}$]
d_t	Perturbation du procédé de régulation
E	Energie d'exposition [mJ]
$E_{DualTones}$	Energie déterminée par la méthode Dual Tones [mJ]
e_t	Erreur du procédé
F	Position focale photo-lithographique [nm]
$F(\nu)$	Spectre de fréquence spatiale
$f(x)$	Représentation graphique d'un réseau
$F_{aérien}$	Position focale aérienne [nm]
$F_{Baseliner}$	Focus déterminé par Baseline [®] [nm]
$F_{DualTones}$	Focus déterminé par la méthode Dual Tones [$/nm$]
F_h	Focus d'un motif horizontal [nm]
F_{image}	Foyer image
f_{image}	Distance focale image [nm]

F_{objet}	Foyer objet
f_{objet}	Distance focale objet [nm]
$F_{résine}$	Position focale dans la résine [nm]
$F_{simulé}$	Position focale simulée [nm]
F_v	Focus d'un motif vertical [nm]
Fh_{C_x}	Focus horizontal par support plaque [nm]
$focus_{NPW}$	Focus déterminé par le test NPW [nm]
Fv_{C_x}	Focus vertical par support plaque [nm]
H	Plan principal objet
H'	Plan principal image
HT	Hauteur de résine [nm]
HT_k	Hauteur de résine pour la position focale photo-lithographique [nm]
I	Intensité de l'image
I_x	Intensité lumineuse [cd]
$i_{éléments}$	Nombre d'éléments multiples du cluster
k_1	Constante photo-lithographique comprise entre 0, 2 et 0, 6
k_2	Constante dépendant des paramètres résines et de la cohérence partielle de l'illumination
l	largeur des fentes du réseau [nm]
$L_{DualTones}$	Distance entre les réseaux de lignes [nm]
M	Degré de précision en dose de la méthode
N	Degré de précision en focus de la méthode
n	Indice de réfraction du milieu
p	Pas du réseau [nm]
P_{min}	Résolution limite [nm]
R	Résolution [nm]
r	Rayon de la source circulaire
R^2	Coefficient de corrélation

R_H	Vitesse de gravure horizontale de la résine [$\frac{nm}{s^2}$]
R_V	Vitesse de gravure verticale de la résine [$\frac{nm}{s^2}$]
S	Surface d'exposition [cm^2]
S_{Dose}	Sensibilité de la dose [$\frac{nm}{mj}$]
$S_{DualTones}$	Longueur du motif de la cellule noire [nm]
S_{Focus}	Sensibilité du focus [$\frac{nmCD}{nmF}$]
$v_{Balayage}$	Vitesse de balayage du scanner [$\frac{mm}{s}$]
$W(\rho, \Theta)$	Front d'onde réel
x'	Coordonnées dans le plan de la plaque
x_{AFM3D}	Axe de balayage de l'AFM3D
X_t	Entrée du procédé de régulation
Xq	Concentration des constituants de la résine [$\frac{mol}{L}$]
Y_t	Sortie du procédé de régulation
z_{AFM3D}	Axe vertical de l'AFM3D
z_{AGILE}	Position sur l'axe optique de la topographie de la surface de la plaque déterminée pression d'air [nm]
z_{FOCAL}	Référence absolue de l'équipement du focus dans la résine [nm]
z_{FRP}	Position sur l'axe optique du plan de référence du focus [nm]
Z_j	Polynômes de Zernike
z_{LS}	Position sur l'axe optique de la topographie de la plaque [nm]
z_{LVT}	Correction de la déformation du support de la plaque [nm]
z_{MRP}	Position sur l'axe optique du plan de référence de la mesure [nm]
z_{TIS}	Référence mécanique du focus de l'équipement [nm]
Z_t	Mesure effectuée à une ou des étapes antérieures

Liste des figures

1.1	Représentation du patterning comprenant les étapes de dépôt, de photo-lithographie, de gravure et de retrait de résine. L'ensemble de ces étapes consiste à définir la dimension critique pour les futurs procédés.	48
1.2	Représentation d'un cluster composé d'un module piste, comprenant des chambres de couchage et de développement de la résine, et, d'un module d'exposition reliés entre eux par un module de liaison mécanique.	49
1.3	Représentation d'une piste et de ces chambres de procédés. Cette piste comporte un four, un module d'étalement et un développeur.	50
1.4	Illustration des ondes stationnaires obtenues lors d'une étape photolithographique (à gauche) et illustration des réflexions dans la résine et la couche d'anti-réfléctif (à droite).	52
1.5	Représentation d'un scanner à immersion avec ses différents éléments (La source, se situant au basement, n'est pas représentée sur le schéma).	54
1.6	Représentation interne d'un scanner. Dans ce système d'image, la cellule est exposée en scannant une fente à travers le réticule.	55
1.7	Représentation de la profondeur de champs en terme d'image (en haut) et en termes de dimension critique dans la résine (en bas). L'intensité et le CD dépendent de la position d'observation sur l'axe optique.	58
1.8	Surface en énergie et profondeur de champ permettant de respecter les spécifications ou non pour un motif et des conditions de procédé donnés. Cette courbe est définie pour la technologie C045 et pour le niveau grille.	59
1.9	Erosion d'une ligne de résine pendant la gravure. Le profil de gravure évolue suivant les vitesse de gravures R_H et R_V	60

1.10	Représentation de la corrélation des 3 équipements de métrologie. Cette corrélation a été effectuée sur une largeur d'une ligne de résine de $170nm$ exposée en utilisant les conditions de la technologie C040 et du niveau Grille.	65
2.1	Schématisation du module de la source. Le laser à excimère se situe au basement c'est-à-dire sous la salle blanche.	68
2.2	Impacte des variations de la dose sur la formation de l'image dans la résine. L'énergie d'exposition doit coïncider avec le seuil de la résine pour que l'image se forme.	69
2.3	Détermination de la sensibilité en dose pour plusieurs résines. La variation linéaire du CD en fonction de la variation en dose est différente suivant la résine utilisée. Résultats obtenus sur plaquette de silicium nu avec des conditions d'illumination identiques.	69
2.4	Intensité de la lumière en fonction de la direction du balayage. L'intensité est non uniforme dans la direction du balayage.	70
2.5	Simulation de l'image aérienne et du motif dans la résine pour deux doses d'exposition. Le CD dépend directement de la dose d'exposition.	71
2.6	Un objet AB éclairé placé à gauche d'une lentille convergente va donner une image réelle A'B' à droite de la lentille. On peut noter que cette image est inversée et de taille différente par rapport à l'objet initial.	72
2.7	Courbes de Bossung pour un motif donné. Cette courbe est le résultat de la matrice focus-dose FEM. Ces courbes sont utilisées pour déterminer la fenêtre des procédés.	74
2.8	Représentation de l'intensité de l'image et la pente de la résine en fonction du focus. L'intensité de l'image et la pente de la résine se dégradent si l'exposition est hors focus.	75
2.9	Qualification de l'impact de la dose sur la dimension critique. Le CD réagit linéairement en fonction de la dose. Résultats obtenus par simulation en technologie C040 et pour le niveau grille.	76
2.10	Qualification de l'impact du focus sur la dimension critique. Le CD réagit quadratiquement en fonction du focus. Résultats obtenus par simulation en technologie C040 et pour le niveau grille.	76
3.1	Objectif de la décorrélation dose/focus : Trouver le contributeur principal à partir des mesures effectuées sur un outil de métrologie. . . .	80

3.2	Principe de Baseline [®] . Le test est effectué en parallèle à la production pour ne pas arrêter l'équipement.	82
3.3	Représentation des motifs box-in-box sur réticule à fond clair et à fond sombre.	83
3.4	Présentation et principe du réticule PSFM. Ce réticule permet un décalage de l'image lors de l'exposition.	84
3.5	Simulation de l'image aérienne de 2 motifs placés sur une zone décalée et non décalée pour 3 valeurs de focus. L'image se décale en fonction de la défocalisation.	85
3.6	Représentation des motifs Dual Tones. Les motifs des cellules claires et des cellules noires sont complémentaires.	85
3.7	Représentation des 2 grille de Fresnel comprenant de multiples ouvertures. Ces multiples ouvertures vont permettre la diffraction des ondes incidentes.	87
3.8	Etude de la variation du focus sur la hauteur de la résine et sur le CD à mi-hauteur. A noter que les focus de ces 2 paramètres géométriques sont différents. Résultats obtenus en technologie C040 et sur le niveau grille.	88
3.9	Phénomène de variation de la hauteur de la résine en fonction du focus. le comportement de la hauteur de résine est différent suivant la défocalisation.	88
3.10	Représentation de l'erreur sur le focus en fonction de la hauteur de la résine. On obtient les meilleures précisions pour des hauteurs de résine \geq à 170nm. Résultats obtenus en technologie C040 et sur le niveau grille.	89
3.11	Cartographie de la dose et du focus réalisé sur une plaque de C045 grille. La cartographie du focus représente une signature due à la buse de dispense du développeur.	90
3.12	Description de la méthode de décalage des motifs sur plaque. Cette méthode permet de créer un décalage en focus directement sur plaque.	91
3.13	Enumération des techniques permettant de créer, sur le réticule, un décalage en focus. Ces 4 techniques ont été brevetées.	92
3.14	Résultat de la simulation du réticule à décalage local de focus. Les 2 dimensions critiques sont décalées en fonction du focus.	93
3.15	Représentation de la différence des 2 CD en fonction du focus. Le ΔCD est linéaire par rapport au focus.	93

3.16	Variations du CD en fonction du focus pour différentes valeurs d'épaisseurs de chrome. Résultat simulé utilisant un réticule OMOG.	94
3.17	Représentation du réticule DAFT comprenant les zones défocalisées. Ce réticule est aujourd'hui disponible en salle blanche pour expérimentation. Il dispose également de tous les motifs dessinés durant cette thèse.	94
3.18	Fondement de la décorrélation dose/focus. Le principe de cette technique est basé sur la différence de focus existante entre le BCD et le TCD.	95
3.19	Système d'équation de décorrélation dose focus. Ce système permet pour chaque double mesure de déterminer le couple dose/focus correspondant.	96
3.20	Etude de la variabilité des coefficients moyens de corrélation en utilisant 25 FEM exposées dans des modules de piste différent.	97
4.1	Schéma du phénomène de diffraction. La distribution des ordres de diffraction d'un réseau périodique de période p et de largeur de fente l sous une illumination cohérente ponctuelle et centrée.	101
4.2	Filtrage fréquentiel de la figure de diffraction par la pupille en supposant que $\frac{NA}{\lambda} < \frac{3}{p}$ sous une illumination cohérente ponctuelle et centrée.	102
4.3	Représentation de la formation de l'image $g(x')$ sur une plaque sous une illumination cohérente ponctuelle et centrée.	103
4.4	Figure de diffraction pour 3 pas de réseaux différents en lumière cohérente.	104
4.5	Figure de diffraction pour un motif isolé pour un réticule à fond sombre (à gauche) et pour un réticule à fond clair (à droite).	106
4.6	Courbes de Bossung représentant la variation du CD pour les motifs périodiques et les motifs isolés en fonction du focus. Résultat obtenus en technologie C040 et sur le niveau grille.	106
4.7	Variation de la dimension d'une ligne de $120nm$ sur la plaque en fonction du pas du réseau. Le CD visé étant de $120nm$	108
4.8	Différence de motif exposé en utilisant un réticule sans correction d'effets de proximité (à gauche) et avec correction d'effets de proximité (à droite).	109

4.9	Exemple de redimensionnement pour la correction des effets de proximités. Ces redimensionnement permettent une meilleure définition des motifs exposés.	109
4.10	Impact du positionnement des lignes non résolues sur la profondeur de champ pour un CD de $50nm$ et une ouverture numérique de 1.15.	110
4.11	Représentation du motif PMG. Sur la figure de droite, les ordres -2 et $+2$ sont à 0.	111
4.12	Représentation de l'image formée par un motif périodique, un motif de production et le motif PMG. Le motif PMG présente le contraste le plus faible.	111
4.13	Détermination de la profondeur de champs par simulation, par SEM et par scattérométrie des motifs $D1$ à $D10$. Résultats obtenus en technologie C040 et au niveau grille.	112
4.14	Représentation du réticule NOVACD incorporant les mires $D1$ à $D10$ horizontales et verticales.	113
4.15	Aperçu d'un motif de résine (en bleu) superposé sur le motif du réticule. La réduction des bouts lignes est causé par le focus.	114
4.16	Variations des bouts de ligne en fonction du focus. La pente de la résine dépend de la défocalisation.	114
4.17	Schématisation des motifs diamants utilisés pour déterminer le focus. Ce motif, une fois exposé, présente une forte contamination.	115
4.18	Représentation des mires asymétriques développées par IBM. Ces mires peuvent être mesurées en utilisant l'outil métrologique Yieldstar [®] S-200.	115
4.19	Représentation de l'image aérienne de la mire asymétrique et de son profil de résine associé.	116
4.20	Représentation de la génération de motifs à profil asymétriques dans la résine.	116
4.21	Définition de la zone de pas interdit. Cette zone est définie pour la profondeur de champ la plus faible.	117
4.22	Création du motif FDP. Ce motif utilise les lignes non résolues, les bouts de lignes et la technique du pas interdit.	118
4.23	Courbes de Bossung représentant la variation du CD pour les motifs de références, le motif PMG et le motif FDP en fonction du focus.	119
4.24	Détermination du focus pour les 4 motifs. La valeur du focus ne dépend pas de la géométrie du motif sur réticule.	119

4.25	Représentation de la profondeur de champ et de la sensibilité des motifs étudiés.	120
4.26	Représentation de l'angle inférieur de la résine du motif FDP sur silicium et sur le niveau grille. Les mesures ont été réalisées sur l'outil scattérométrique Q-SCD.	121
4.27	Représentation de l'angle inférieur de la résine du motif FDP sur silicium et sur le niveau grille. Les mesures ont été réalisées sur l'outil scattérométrique Yieldstar [®]	121
4.28	Concept de création de mire scattérométrique en prenant en compte les spécificités des outils et des calculs.	122
4.29	Exemple d'implantation des mires FDP sur les réticules C028 active et grille. Ces réticules ont été utilisés pour déterminer la dose et le focus sur lot de production.	123
5.1	Représentation schématique d'un système Twinscan [®] de la société ASML. Le système est composé de 2 supports de plaques bien distincts.	126
5.2	Séquence d'une plaque lors de l'exposition dans l'équipement de photolithographie.	127
5.3	Schématisation de la zone de métrologie permettant de déterminer l'assiette de la plaque.	128
5.4	Schématisation de la zone d'exposition. Le support de la plaque se trouve sous la lentille d'exposition.	129
5.5	Système d'ajustement de dose faisant intervenir le capteur d'intensité et le capteur d'énergie.	130
5.6	Détermination de la référence mécanique du focus en utilisant les capteurs de transmission d'image des supports des plaques.	131
5.7	Principe du test focal. Le focus est déterminé pour un écart d'alignement maximal entre le bloc et les lignes.	132
5.8	Représentation du capteur de niveau comprenant les modules optiques et les modules d'acquisition de données.	133
5.9	Mesures de la topographie de la plaque à l'aide du capteur de niveau. Ces données sont transférées au serveur informatique pour l'exposition.	134
5.10	Avantage de la détermination du focus par pression d'air par rapport au capteur de niveau.	135
5.11	Détermination de la position du plan focal dans la zone de métrologie et dans la zone d'exposition.	136

5.12	Représentation des zones défocalisées causés par la contamination particulière. Ces points causent des variations géométriques importantes sur les motifs.	137
6.1	Représentation intra-plaque du CD grille pour la technologie C040.	140
6.2	Représentation du CD grille dans le champ image pour la technologie C040.	140
6.3	Analyse de l'uniformité de la dimension critique. Les mesures de CD se divisent en 3 composantes.	141
6.4	Représentation de la plaque de validation sur silicium à gauche et du résultat de la corrélation à droite. CO ¹ représente les conditions d'expositions optimales et $\pm F_i$ représentent des pas de focus différents pour déterminer la sensibilité du CD au focus.	142
6.5	Corrélation entre d'une part le focus décorrélé et le focus déterminé par le test NPW, puis, d'autre part la dose décorrélée et la dose déterminée par le logiciel de régulation.	142
6.6	Impact du dérèglement du capteur d'énergie sur la dimension critique. Un effet 1 sur 2 est visible.	143
6.7	Mesure du CD et de la dose d'exposition après maintenance sur le capteur d'énergie. L'action sur le capteur a amélioré l'uniformité du CD.	144
6.8	Représentation de la dose sur une plaque de Silicium. L'effet «papillon» est caractéristique d'une non-uniformité de la température des fours de la piste.	145
6.9	Représentation de l'uniformité de la dose sur une plaque de Silicium. La non-uniformité de la dose est due à la variabilité de la température des fours de la piste.	146
6.10	Représentation de l'effet 1 sur 7 caractérisé par une température différente de la cible sur l'un des fours de la piste.	146
6.11	Représentation du ΔCD dans la fente. L'erreur en dose mesurée provient de la lumière parasite.	147
6.12	Comparaison en dose entre les valeurs du logiciel de régulation et les valeurs données par la méthode FDO en technologie C045.	148
6.13	Système optique idéal. Le front d'onde de la pupille de sortie est symétrique au front d'onde de la pupille d'entrée. L'image du point source est donc parfaitement reproduite dans le plan image.	149

1. Condition Optimales d'exposition

6.14	Système optique réel. Le front d'onde subit des distorsions dues aux aberrations optiques de la lentille. L'image n'est donc pas parfaitement reproduite.	150
6.15	Représentation de la distance algébrique définissant l'astigmatisme géométrique.	151
6.16	Représentation des mires utilisées pour mesurer l'astigmatisme en fonction de l'outil de mesure.	152
6.17	Représentation de l'astigmatisme par la méthode décorrélation, baseliner [®] et le test NPW.	153
6.18	Impact du dérèglement du capteur d'énergie sur la dimension critique. La diminution du focus est produite par l'échauffement de la lentille.	154
6.19	Représentation du focus avec et sans Aritm [®] . L'option activé permet un gain en variabilité focus de l'ordre de 31%.	154
6.20	Correction de l'impact sur le focus de l'échauffement de la lentille par la méthode FDO.	155
6.21	Planéité des réticules basé sur la mesure RSC du scanner. La différence de hauteur atteint ici 600nm.	156
6.22	Représentation de la déformation du support de la plaque en forme de bol qui peut atteindre 100nm.	157
6.23	Valeurs du focus sans correction du LVT (à gauche) et avec correction du LVT (à droite).	158
6.24	Représentation de l'effet du balayage sur une plaque. Le focus dépend du sens du balayage du scanner.	159
6.25	Effet du balayage vers le haut et vers le bas de la cellule sur le focus. La variabilité du focus s'élève en moyenne à 5,7nm. La signature en focus de la cellule dépend des phases d'accélération et de décélération.	159
6.26	Variation de l'indice du milieu en fonction de la longueur d'onde. L'indice de l'eau dépend de la longueur d'onde [J. A. Hoffnagle, 1999].	160
6.27	Variation de l'indice de l'eau en fonction de la température [B. Smith, 2004].	161
6.28	Analyse du focus intra-plaque. Les chutes de focus en bord de plaque sont à l'origine des baisses de rendements.	161
6.29	Comparaison entre les valeurs du logiciel de régulation et les valeurs données par la méthode FDO en technologie C045.	162
6.30	Comparaison du focus dans la cellule en utilisant les 3 méthodes de détermination du focus.	163

6.31	Comparaison des mesures du focus par la méthode de décorrélation à gauche et par le capteur de niveau à droite.	163
6.32	Corrélation entre le focus déterminé par la méthode FDO et le focus déterminé par le capteur de niveau.	164
6.33	Etude de la variabilité intra-plaque du CD, de la dose, et du focus pour le scanner 1950 <i>i</i> . Comparaison des valeurs mesurées et des valeurs spécifiées pour 2 générations de scanner dans les mêmes conditions d'illumination.	164
6.34	Etude de la variabilité intra-champ du CD, de la dose, et du focus pour le scanner 1950 <i>i</i> . Comparaison des valeurs mesurées et des valeurs spécifiées pour 2 générations de scanner dans les mêmes conditions d'illumination.	165
6.35	Comparaison des signatures du CD intra-plaque entre le scanner 1700 <i>i</i> et le scanner 1950 <i>i</i> . Comparaison des valeurs mesurées et des valeurs spécifiées pour 2 générations de scanner dans les mêmes conditions d'illumination.	166
6.36	Comparaison des signatures du focus intra-plaque entre le scanner 1700 <i>i</i> et le scanner 1950 <i>i</i> . Comparaison des valeurs mesurées et des valeurs spécifiées pour 2 générations de scanner dans les mêmes conditions d'illumination.	166
6.37	Comparaison des signatures en dose intra-plaque entre le scanner 1700 <i>i</i> et le scanner 1950 <i>i</i> . Comparaison des valeurs mesurées et des valeurs spécifiées pour 2 générations de scanner dans les mêmes conditions d'illumination.	167
6.38	Comparaison des signatures du CD intra-champ entre le scanner 1700 <i>i</i> et le scanner 1950 <i>i</i> . Comparaison des valeurs mesurées et des valeurs spécifiées pour 2 générations de scanner dans les mêmes conditions d'illumination.	167
6.39	Comparaison des signatures du focus intra-champ entre le scanner 1700 <i>i</i> et le scanner 1950 <i>i</i> . Comparaison des valeurs mesurées et des valeurs spécifiées pour 2 générations de scanner dans les mêmes conditions d'illumination.	168
6.40	Comparaison des signatures en dose intra-champ entre le scanner 1700 <i>i</i> et le scanner 1950 <i>i</i> . Comparaison des valeurs mesurées et des valeurs spécifiées pour 2 générations de scanner dans les mêmes conditions d'illumination.	168

6.41	Présentation de la boucle de régulation manuelle permettant d'activer la décorrélation dose/focus sur lot de test.	169
6.42	Résultat des variabilités de la géométrie de la résine sans correction et avec correction des paramètres photo-lithographiques. Résultats obtenus sur silicium nu en utilisant les condition d'illumination du niveau active en technologie C040.	170
7.1	Fonctionnement d'une boucle de régulation de type feedback.	175
7.2	Fonctionnement d'une boucle de régulation de type feedforward.	175
7.3	Système de régulation en dose, avant les travaux de la thèse, complété par le suivi du focus par le test NPW.	178
7.4	Suivi du focus par le test NPW. Ce test est réalisé avec les conditions d'illumination suivantes : $NA = 1,2$, $\sigma = 0,6$ et une épaisseur de résine de $170nm$	178
7.5	Suivi de la dose à l'aide du logiciel de régulation Symphony [®] pour le niveau Active en technologie C045.	179
7.6	Simulation de la nouvelle boucle de régulation utilisant le logiciel de régulation Symphony [®]	179
7.7	Mesure de la dimension critique en connaissant le couple dose/focus initial.	180
7.8	Procédé de mise en place d'une boucle de régulation utilisant la boucle de régulation actuelle, une simulation, une première correction sur lots R&D et la production.	181
7.9	Futur système de régulation dose/focus. Les 2 motifs présent sur plaque de production permettront un suivi du procédé et du produit.	182
7.10	Dispositif de contrôle total de l'atelier photo-lithographie. Chaque contributeur est corrigé par un système de régulation performant.	182
7.11	Détermination du gain sur la variabilité CD en activant tout d'abord la dose et ensuite le focus.	183
7.12	Représentation des niveaux d'empilement de la grille après photo-lithographie et après gravure pour la technologie C028.	184
7.13	Variation de l'angle de la résine avant et après correction. Comparaison des valeurs mesurées en technologie C028 et sur le niveau grille après photo-lithographie.	185
7.14	Variation de la dimension critique de la résine après photo-lithographie avant et après correction. Comparaison des valeurs mesurées en technologie C028 et sur le niveau grille après photo-lithographie.	185

7.15	Variation de la dimension critique de la résine après l'étape de gravure avant et après correction. Comparaison des valeurs mesurées en technologie C028 et sur le niveau grille après gravure.	186
7.16	Procédure de correction de la dose et du focus pour chaque cellule. Chaque cellule présente une compensation en dose et en focus. . . .	186
B.1	Schéma en coupe d'un Microscope Electronique à Balayage.	198
B.2	Schéma explicatif du concept de poire d'interactions.	199
B.3	Schéma de la poire d'interactions sur un relief de l'échantillon. . . .	200
B.4	Principe de fonctionnement de la scattérométrie. L'ellipsométrie est représenté à gauche et la réflectométrie à droite.	201
B.5	Ondes réfléchies selon différentes polarisations.	202
B.6	Contrôle dimensionnel d'un réseau de lignes.	203
B.7	Principe de fonctionnement du Microscope à Force Atomique.	204
B.8	Limitation de l'AFM standard : la pointe conique ne peut suivre le flanc de la structure ce qui dégrade la mesure de la dimension latérale et de l'angle des flancs. L'AFM3D, avec sa pointe évasée, permet de venir scanner les flancs des motifs.	206
C.1	Représentation d'un réticule composé de quartz et de chrome.	209
C.2	Représentation d'un réticule à décalage de phase. La phase dépend du profil en épaisseur du Quartz.	210
C.3	Evolution de la valeur du MEEF en fonction de la période de motifs denses dans le cas d'une ligne de $40nm$ et de $NA = 1,3$	212

Liste des tableaux

1.1	Récapitulatif des effets globaux impactant le CD. Chaque type d'effet peut être repéré par un type de mesure précise. Les effets intra-plaque et intra-cellule sont incorporés respectivement dans les effets plaque à plaque et cellule à cellule.	62
1.2	Composantes des variations de CD dans l'atelier patterning. Chaque entité impacte de manière différente le CD. En utilisant un algorithme de métrologie précis, il est possible d'adresser un type de variation de CD à un équipement.	63
1.3	Tableau récapitulatif des différences entre la scattérométrie, le microscope électronique à balayage et le microscope à force atomique. . .	64
2.1	Tableau récapitulatif des performances globales du système de dose d'exposition pour les scanners ASML 1700 <i>i</i> et ASML 1950 <i>i</i>	70
2.2	Tableau récapitulatif des performances globales du système de focus pour les scanners ASML 1700 <i>i</i> et ASML 1950 <i>i</i>	74
3.1	Dénomination des modules de la piste. Les variations des paramètres de chaque module peuvent impacter les coefficients de calibration de la décorrélacion dose/focus.	98
4.1	Dimensions des mires PMG.	112
4.2	Profondeur de champs des motifs $D1$ à $D10$ par simulation, par SEM et par scattérométrie.	113
4.3	Dimension des mires FDP pour les 5 niveaux de production en technologie C028.	122
6.1	Valeur moyenne et variabilité du CD et de la dose d'exposition avant et après maintenance du capteur d'énergie.	144
6.2	Spécification du fabricant sur l'astigmatisme géométrique pour 2 équipements de génération différente.	152

- 7.1 Impact de la correction cellule à cellule sur le Bottom CD, le Middle CD et l'angle inférieur de la résine. Un gain moyen de 50% est mesuré.187

Avant propos

Cette thèse a pu être réalisée grâce à une convention CIFRE² avec la participation industrielle de la société STMicroelectronics, du CEA³ LETI⁴ et du CNRS⁵ LTM⁶. Le sujet de thèse fait partie du projet de recherche NANO-2012. Le laboratoire CNRS-LTM apporte un soutien scientifique au niveau de la simulation, de la reconstruction d'image, de la sensibilité, de la variabilité et de la validation statistique. Le CEA-LETI prend en charge l'aspect plus fondamental de la thèse ou le doctorant a accès au code et à l'expertise qui permet de développer le simulateur. Les compétences du CEA-LETI en matière de métrologie ainsi que celles du CNRS-LTM dans l'expertise technique se sont complétées pour traiter ce sujet multi-disciplinaire. La société STMicroelectronics met à disposition les outils de dessins et l'infrastructure de la salle blanche pour les essais sur plaquette (scanner 193nm pour exposer les plaques, métrologie sur microscope électronique à balayage, scattéromètre ou autres).

2. Conventions Industrielles de Formation par la REcherche

3. Commissariat à l'Energie Atomique

4. Laboratoire d'Electronique et de Technologie de l'Information

5. Centre National de Recherche Scientifique

6. Laboratoire des Technologies de la Micro-électronique

Résumé

Les dimensions critiques des circuits intégrés diminuent continuellement au cours des ans selon la loi de Moore. Les valeurs typiques sont aujourd'hui de $28nm$, et seront de $22nm$ dans 18 mois. La photo-lithographie optique demeure encore la technique la plus économique pour la production de masse. L'ouverture numérique des objectifs atteint 1.30, grâce à l'introduction d'eau entre la lentille et la plaquette. La conséquence directe de ces grandes ouvertures est la réduction de la profondeur de champs de l'ordre d'une centaine de nanomètres. Le procédé photo-lithographique perdant de la latitude, le contrôle dimensionnel intra-cellule devient une nécessité. La variation dimensionnelle provient au premier ordre à la fois de la variation du plan focal dans le champ image, et aussi de la non uniformité de l'illumination du réticule. Pour contrôler cette variation, une boucle de régulation a été mise en place pour ajuster uniquement l'énergie des lots de production. On corrige ainsi de fait un mauvais focus par une compensation en énergie.

Pour ne pas altérer l'image dans la résine, il est important de pouvoir dissocier les deux effets et adresser les causes de dégradation de l'image séparément. Le sujet de cette thèse est précisément de trouver un moyen de décorrélérer les deux paramètres affectant l'uniformité de la dimension critique. L'idée principale est de trouver à la fois les motifs et les modèles théoriques pouvant conduire à discriminer des images selon leur sensibilité, soit au focus, soit à la dose.

Summary

Following the ITRS roadmap, the critical dimension of the circuits are continuously narrowing. Optical Lithography still remains the cheapest way for integrated circuits mass production. If the resists properties and the exposure wavelength reduction had an important contribution to this result, the lens numerical aperture increase had a decisive impact. The numerical aperture is currently reaching 1,30 thanks to the usage of water as immersion fluid between the lens and the wafer. Future lens are targeting in a near future a 1,70 numerical aperture with immersion fluids at higher refractive index. A direct consequence of these wider numerical aperture's is the reduction of the depth of focus to few tens of nanometers, reducing the process windows and then the integrated circuits manufacturability. In addition the pure numerical aperture effect on focus, off axis illumination is leading to amplify the reticle critical dimension variations, and the intrafield focus control becomes more and more crucial.

The last scanner generation provides some tools to adjust the intrafield energy. As the two effects appear to compensate each of them critical dimension variation, it becomes very important to be able to dissociate the effect of one from the other in order to select the most efficient mean to get the greater process windows. Moreover, the average value compensations must feed accurately the Run to Run feed back loop for the next exposed wafers.

The purpose of this thesis is to find a way to un-correlate the various parameters affecting the critical dimension uniformity. Some researchers tried to design specific features whose shape modifications due to focus offset could be detected as an overlay error measured by the appropriate tool, but the limitations seem to be actually reached. New tools, as scatterometers, could provide a more precise information. The desire output of this thesis would be to provide a methodology to allow an in line intrafield focus follow up for the future technologies at 20nm half pitch.

Introduction générale

L'industrie de la micro-électronique s'est focalisée depuis son origine sur la miniaturisation [1] des composants dans le but d'augmenter la performance des circuits intégrés et d'en réduire les coûts [2]. La dimension des composants, est passée de quelques micromètres dans les années 70 à quelques dizaines de nanomètres aujourd'hui. Les dispersions et les centrages des dimensions sont devenus, au fil des années, de plus en plus critiques [3]. Ces dispersions physiques, provoquées par les fluctuations des procédés de fabrication, produisent une variabilité des performances des circuits élémentaires à l'intérieur d'une même puce. Si les dimensions élémentaires s'éloignent trop de leur valeur optimale⁷, les puces électroniques ne respecteront plus les spécifications fixées par le cahier des charges. En conséquence, le rendement de la chaîne de production se dégradera et les coûts des fabricants de semi-conducteur augmenteront. Pour obtenir un rendement maximal, des méthodes de contrôle et de correction des équipements et des procédés portant sur un nombre croissant de critères, sont mis en place [4]. L'approche générale consiste à effectuer en premier lieu une mesure précise de la dimension de l'entité critique, puis à appliquer si nécessaire, les algorithmes de correction sur les paramètres appropriés des équipements.

L'étape qui limite la miniaturisation des circuits intégrés est depuis toujours la photo-lithographie [5]. Cette étape consiste à projeter sur une résine photosensible l'image d'un réticule correspondant aux motifs du circuit à l'aide d'une source monochromatique à UV⁸ profond. Cette projection, est réalisée à l'aide d'un objectif à grande ouverture numérique NA⁹ et avec un facteur de réduction généralement égal à 4. L'objectif lui-même est composé de 20 à 30 lentilles dioptriques et catadioptriques. Les géométries produites par l'outil de photo-lithographie sont voisines de la résolution limite de l'équipement. La dimension du plus petit motif ainsi imagé

7. Valeur pour laquelle les performances du circuit intégrés sont maximales

8. Ultra-Violet

9. Numerical Aperture / Ouverture Numérique

est appelé CD¹⁰.

Pour réduire continuellement la dimension critique, les photo-lithographes ont toujours cherché à augmenter la résolution [6]. Les principales évolutions passent par l'optimisation de la résine dans laquelle se forme l'image et par l'amélioration de l'équipement. Au niveau du système optique, les règles de diffraction n'offrent que 2 solutions : réduire la longueur d'onde ou augmenter l'ouverture numérique [7]. La solution choisie par les photo-lithographes pour augmenter la résolution d'un procédé était de diminuer la longueur d'onde plutôt que d'augmenter l'ouverture numérique afin de préserver la profondeur de champ. Ainsi, au cours du temps, la longueur d'onde est passée de $365nm$, à $248nm$ puis à $193nm$ [8]. Pour des raisons financières, la lithographie à $157nm$ a été abandonnée au profit de la lithographie $193nm$ à immersion. Cette technique permet d'atteindre des ouvertures numériques supérieures à 1 et donc, d'améliorer encore la résolution. En parallèle, plusieurs astuces furent développées pour améliorer la résolution. Par exemple, les méthodes d'illumination off-axis¹¹ [9] du réticule, la transmission du réticule non plus seulement en amplitude, mais aussi en phase¹² [10], ou encore la correction des motifs dessinés sur le réticule pour tenir compte des dégradations prévisibles de son image dues au filtrage spatial de l'objectif [11]. Pour la poursuite de la miniaturisation, la photo-lithographie à ultraviolet extrême EUV¹³ à longueur d'onde $13,5nm$ s'avère probablement être le futur outil **optique** pour les résolutions inférieures ou égales à $14nm$ [12].

Pour caractériser un procédé de photo-lithographie, on est amené à définir une fenêtre de procédé, PW¹⁴, qui dépend des paramètres photo-lithographiques utilisés. Cette fenêtre de procédé représente les plages de variation tolérées pour la dose¹⁵ et la position du plan focal¹⁶, pour lesquelles les motifs s'impriment dans la limite des spécifications, généralement fixées à $\pm 8\%$ de la valeur ciblée. Idéalement, cette fenêtre de procédé doit être la plus grande possible afin de minimiser la sensibilité du procédé à certaines instabilités liées au système d'irradiation ou de défauts comme la planéité de la plaque, la topographie présente sur la plaque, ou encore les variations locales d'épaisseur des différentes couches [13]. Or, depuis l'apparition des scanners à immersion, c'est-à-dire à ouverture numérique > 1 , la profondeur de champ s'est

10. Critical Dimension / Dimension Critique [nm]

11. Illumination décentré par rapport à l'axe optique

12. Réticule à décalage de phase

13. Extreme Ultra-Violet

14. Process Windows / Fenêtre de procédé

15. Energie nécessaire à l'exposition d'un motif

16. Plan sur lequel se forme l'image nette du sujet généralement perpendiculaire à l'axe optique de l'objectif.

largement réduite entraînant ainsi une sensibilité plus importante au focus [14]. Ainsi, la problématique principale est de continuer à maintenir les paramètres photo-lithographiques dans la fenêtre des procédés alors que les plages de variation sont de plus en plus faibles.

L'amélioration de la variabilité et du centrage de la dimension critique est donc une priorité pour tous les fabricants de semi-conducteur. Deux indices de capabilité et de performance, C_p ¹⁷ et CP_k ¹⁸ [15] sont d'ailleurs utilisés par les industriels en fabrication pour définir la qualité et les performances des procédés. Ces indices rendent compte de la dispersion et du centrage des réalisations d'un paramètre donné. Pour améliorer ces indices, les chaînes de fabrication se sont équipées de boucles de régulation [16]. Elles consistent à ajuster l'équipement photo-lithographique en fonction des mesures effectuées au préalable sur un paramètre critique. A STMicroelectronics l'énergie d'exposition est ainsi régulée afin de contrôler le centrage du CD [17]. Cependant, la dose n'est pas le seul contributeur. En effet, la mise au point de l'image joue également un rôle important sur la variabilité du CD notamment après l'étape de gravure [18]. Jusqu'à présent, il n'existait pas de méthode capable de distinguer les deux paramètres lithographiques pour un meilleur contrôle du CD. Il devient donc primordial de trouver un moyen de décorrélérer l'énergie d'exposition et la mise au point de l'image pour attribuer l'effet impacté par la dose et par le focus. Une nouvelle régulation, plus juste et plus précise comprenant à la fois la dose et le focus, pourra être mise en place afin de réduire la variabilité et le centrage du CD améliorant ainsi les rendements de la chaîne de production.

Dans ce travail de thèse, une nouvelle méthode de contrôle et de correction des paramètres photo-lithographiques a été développée en tenant compte des considérations précédentes [19]. Cette méthode permet une réduction de 20% de la dispersion en CD et un centrage de la dimension critique au nanomètre près. Cependant, les moyens actuels de mesure du CD par scattérométrie¹⁹ sont difficiles à mettre en place [20]. Leur amélioration permettra l'évolution de la boucle de régulation sur les niveaux critiques.

Dans le chapitre 1, nous présenterons l'atelier de photo-lithographie et discuterons des difficultés actuellement rencontrées par les photo-lithographes pour poursuivre la diminution des dimensions critiques. Dans ce contexte, de nouvelles techniques de photo-lithographie, voient le jour et se présentent comme des candi-

17. Capability Process / Capabilité du Procédé

18. Process Performance Index/ Indice de Performance du Procédé

19. Méthode de métrologie capable de mesurer les paramètres géométriques du motif imprimé de la résine.

dates potentielles pour adresser les prochains noeuds technologiques. Aujourd'hui, la photo-lithographie à immersion à $193nm$ se présente comme la technique industrielle pour répondre aux exigences qu'imposent les sociétés de la micro-électronique.

Le chapitre 2 sera consacré à l'étude de cette technique et plus particulièrement des paramètres importants impactant les dimensions critiques. Nous expliquerons comment le photo-lithographe détermine le focus et la dose pour obtenir un procédé optimal d'exposition. Nous discuterons également des difficultés rencontrés par les ingénieurs pour déterminer simultanément ces 2 paramètres.

Le chapitre 3 sera consacré à la présentation et à l'explication de la méthode de décorrélation de la dose et du focus. Dans un premier temps, nous détaillerons les méthodes existantes dans l'industrie et plus particulièrement chez STMicroelectronics. Dans un second temps, nous présenterons les méthodes créées pour déterminer les deux paramètres photo-lithographiques directement sur lot de production.

Dans le chapitre 4, la formation des images en photo-lithographie nous aidera à optimiser les méthodes créées dans le chapitre précédent. Ensuite, nous présenterons une méthode optimale capable de déterminer les deux paramètres photo-lithographiques avec une très grande précision. Cette méthode complète, nous permettra de mieux comprendre les phénomènes liés au focus et à la dose.

Le chapitre 5 sera principalement consacré au lien entre la formation des images théoriques et la formation des images pratiques. En effet, nous détaillerons le mode de fonctionnement de l'outil de photo-lithographie pour comprendre comment se forme l'image sur les plaques de silicium. Nous détaillerons également les différents tests de dose et de focus que propose la machine.

Le chapitre 6 permettra de valider expérimentalement tout le travail présenté dans les trois chapitres précédents. Nous présenterons les différents effets de la dose et du focus sur les plaques de silicium. Nous expliquerons aussi comment les différents éléments de l'outil de photo-lithographie peuvent impacter la dose et le focus et donc la dimension critique.

Enfin, le chapitre 7 sera consacré à l'intégration de la méthode de décorrélation dans la boucle de régulation actuelle. Cette nouvelle boucle de régulation nous permettra de suivre et de corriger les paramètres photo-lithographiques sur lot de production mais aussi de suivre les différents effets liés à l'équipement lui-même.

Chapitre 1

Introduction au patterning

1.1 Introduction

LA technologie des semi-conducteurs est basée sur un processus de fabrication complexe faisant intervenir de nombreuses étapes. Dans ce chapitre, quelques étapes élémentaires seront décrites. L'accent sera mis sur une famille d'opération communément adoptée pour la fabrication des circuits intégrés, à savoir le patterning. Dans la première partie de ce chapitre, les lois de réduction d'échelle, qui ont régi l'évolution de la micro-électronique, sont rappelées. Les limites à la poursuite de la miniaturisation sont ensuite passées en revue. Enfin, les phénomènes de variabilité dans les circuits intégrés, qui sont au coeur de la problématique de cette thèse, sont détaillés.

1.2 Définition du patterning

Dans la fabrication des composants semi-conducteurs, les technologies actuelles utilisent des procédés de fabrication qui consistent en quelques centaines d'étapes. La majorité de ces étapes de fabrication peuvent être regroupées en trois familles distinctes :

- Transfert des motifs d'un réticule sur la plaque de silicium.
- Ajout de matière par dépôt ou métallisation.
- Modification d'un matériau par implantation ionique.

Le patterning est le procédé qui consiste à transférer les motifs d'un réticule par photo-lithographie dans le matériau considéré. Le déroulement de ces étapes, représenté sur la figure 1.1, est contrôlé par des outils de métrologie afin de garantir que les valeurs critiques soient en adéquation avec les spécifications.

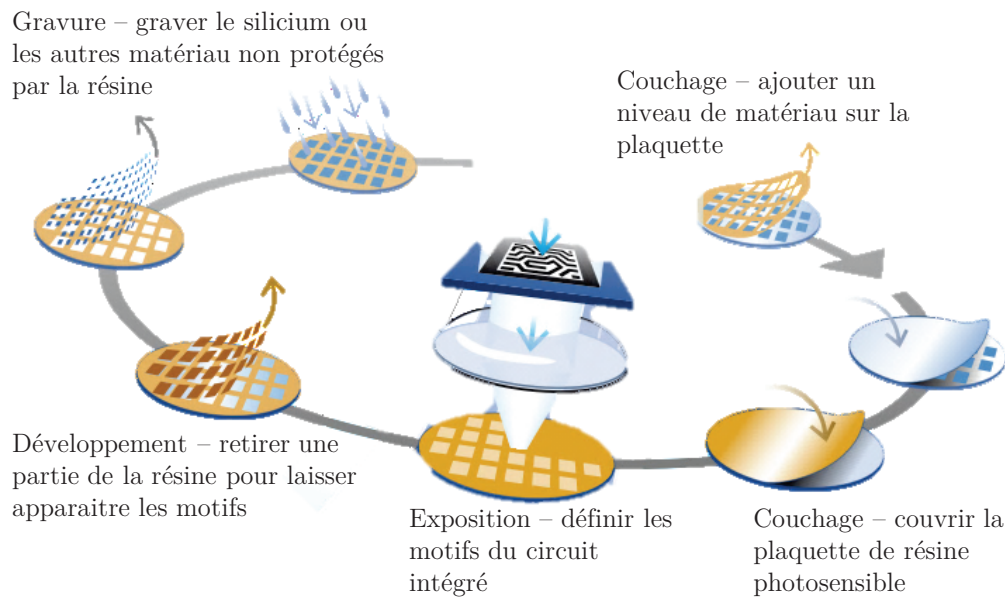


Figure 1.1 – Représentation du patterning comprenant les étapes de dépôt, de photo-lithographie, de gravure et de retrait de résine. L'ensemble de ces étapes consiste à définir la dimension critique pour les futurs procédés.

La métrologie permet de contrôler les paramètres les plus critiques du patterning à savoir :

- Le CD qui correspond au plus petit motif imprimé et gravé.
- L'alignement qui détermine les erreurs de position entre deux niveaux de photo-lithographie.
- La contamination qui est le taux d'impuretés mesuré sur les produits.

Cette thèse traite uniquement l'étude des dimensions critiques qui, à l'heure actuelle, sont des lignes de $40nm$ et de $28nm$ de largeur. Les autres paramètres sont volontairement omis et ne seront donc pas traités dans ce manuscrit.

1.3 Présentation de la photo-lithographie optique

La photo-lithographie permet de définir la dimension des dispositifs élémentaires pendant la fabrication des circuits intégrés. L'outil photo-lithographique, représenté sur la figure 1.2, consiste à insoler un film de matériau photosensible¹ au travers d'un réticule où est définie l'image du circuit.

Les zones exposées seront ensuite développées pour laisser apparaître les motifs qui délimitent les régions du substrat de silicium qui subiront un futur traitement. De

1. Sensibilité à une radiation

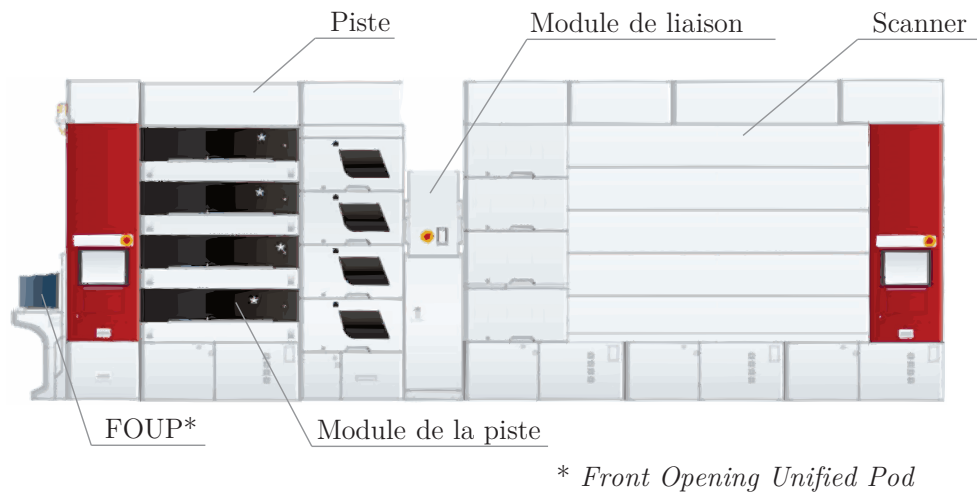


Figure 1.2 – Représentation d'un cluster composé d'un module piste, comprenant des chambres de couchage et de développement de la résine, et, d'un module d'exposition reliés entre eux par un module de liaison mécanique.

manière générale, l'outil de photo-lithographie peut être décomposé en deux parties élémentaires :

- la piste, qui permet de déposer et de développer le film de matériau photosensible.
- le scanner, qui insole les puces pour définir les zones du circuit.

Ces deux équipements, qui forment le cluster, sont reliés mécaniquement et informatiquement pour assurer le transfert des plaques dans les deux sens.

1.3.1 Définition des résines à amplification chimique

Une résine photo-lithographique doit permettre à la fois, le transfert des motifs du réticule dans le film de résine, et, protéger les zones du substrat qu'elle recouvre lors des traitements physico-chimique spécifiques tels que l'implantation ou la gravure[21]. Ces résines, doivent donc répondre aux critères suivants :

- Propriétés filmogènes². En effet, la résine doit avoir de bonne uniformité d'étalement sur toute la surface du substrat.
- Propriétés optiques adaptées à la longueur d'onde d'exposition λ . Une résine photosensible doit être à la fois suffisamment transparente à la longueur d'onde d'exposition pour autoriser un transfert de qualité des motifs du réticule dans toute l'épaisseur du film de résine et avoir une photosensibilité élevée[22].
- Propriétés physico-chimiques spécifiques. La résine doit répondre à la tenue

2. Capable de former un film

de la gravure plasma afin de protéger les zones recouvertes[23].

Les résines à amplifications chimiques sont composées[24] :

- d'un polymère qui forme la matrice de la résine et la compose à plus de 90% de la formulation. Le polymère de base de la résine est initialement soluble dans le développeur aqueux basique. On greffe donc sur ce squelette polymère des groupements chimiques inhibiteurs de dissolution, appelés groupements protecteurs clivables en présence d'acide.
- d'un PAG³ présent à environ 2% du poids de la formulation.
- de différents additifs comme les plastifiants ou les surfactants.

1.3.2 Présentation de la piste

La plaque de silicium qui arrive dans l'atelier de photo-lithographie nécessite plusieurs étapes de préparation afin d'obtenir une exposition optimale. L'instrument appelé piste représentée sur la figure 1.3, qui réalise ces étapes, est un outil complexe comprenant plusieurs chambres capable de réaliser des procédés différents[25]. L'analyse du rôle et du fonctionnement de ces chambres va nous permettre d'illustrer les nombreux critères que doit remplir une piste.



Figure 1.3 – Représentation d'une piste et de ces chambres de procédés. Cette piste comporte un four, un module d'étalement et un développeur.

1.3.2.1 Préparation du substrat

La contamination des surfaces peut affecter les futures étapes du procédé photolithographique. Les problèmes générés sont la diminution de l'adhésion et les inclusions des défauts[26]. Les agents les plus polluants au niveau des procédés photolithographiques sont les molécules d'amine qui, par réaction bloquent le développeur

3. Photo Acid Generator / Photo Générateur d'Acide

ment. L'atmosphère est donc contrôlée par des filtres à charbon actifs pour piéger ces molécules. Afin d'améliorer l'adhésion de la résine, la première chambre de la piste sert à traiter la surface du substrat à l'aide d'un promoteur d'adhérence. Le promoteur d'adhérence le plus utilisé est l' HMDS⁴. Il est appliqué par centrifugation à partir d'une solution diluée. Une partie de la molécule d'HMDS réagit avec la surface oxydée du substrat pour former des liaisons Silicium-Oxygène[27]. L'autre extrémité de la molécule va «attirer» les molécules de la résine afin de former un empilement substrat, HMDS, résine solide. Dans la plus part des cas, on dépose, entre la résine et le substrat, une couche d'anti-réfléctif dont on expliquera le rôle dans la section 1.4.

1.3.2.2 Couchage de la résine par centrifugation

Le procédé de couchage de la résine comprend trois étapes principales :

- Couchage de la résine sur la plaque : Une quantité précise de résine est déposée au centre de la plaque de silicium. Celle-ci est maintenue par aspiration sur un support animé d'une vitesse de rotation (typiquement 1500 tours par minute). Le but de cette étape est de produire un film liquide uniforme et d'éliminer le surplus de résine.
- Rotation à vitesse constante afin d'établir l'épaisseur de la résine souhaitée.
- Détourage : Cette étape consiste à venir détourner le bord de la plaque pour éviter les problèmes d'exposition en bord de plaque.

A l'issue de ce procédé, on obtient un film de résine dont l'uniformité de l'épaisseur sur la plaque est de $\pm 4\%$.

1.3.2.3 Recuit après couchage

Le PAB⁵ s'effectue généralement par zone sur une plaque chauffante de façon à évaporer les solvants[28]. La température est extrêmement bien contrôlée afin d'assurer une uniformité de la concentration des constituants Xq de la résine. Le principe de chauffage se décline en deux variantes :

- Par contact, ou la transmission de chaleur se fait par conduction.
- Par proximité ou convection, ou la plaque reste positionnée à faible distance (de l'ordre du millimètre) de la plaque chauffante.

4. HexaMéthylDiSilazane $((\text{CH}_3)_3\text{Si} - \text{NH} - \text{Si}(\text{CH}_3)_3)$

5. Post Applied Bake / Recuit de la résine après étalement

1.3.2.4 Exposition

L'étape d'exposition est une étape mettant en jeu certains phénomènes optiques comme l'apparition des ondes stationnaires. Ces ondes peuvent être générées dans le film de résine suite aux interférences résultant d'une interaction entre la lumière incidente et la lumière réfléchie par le substrat[29]. Les ondes stationnaires induites correspondent à une distribution périodique de l'intensité lumineuse dans l'épaisseur du film de résine.

La réflectivité du silicium dans l'ultraviolet est forte. Aussi, la lumière qui traverse la résine pendant l'insolation est réfléchie et va interférer avec la lumière incidente créant ainsi des ondes stationnaires dans l'épaisseur de résine qui vont dégrader le profil des motifs. Le profil des motifs peut, à ce moment-là, présenter une forte rugosité.

Si la période des ondes incidentes est de $\frac{\lambda}{n}$, avec n l'indice de réfraction du milieu, la période des ondes stationnaires sera de $\frac{\lambda}{2n}$. Ce phénomène peut être corrigé par la présence de couches complémentaires anti-réfléctives au sommet de la résine, couche désignée sous le terme TARC⁶[30], ou entre le substrat et la résine, couche appelée BARC⁷[31]. Cette couche anti-reflet, est le plus souvent un polymère organique qui a pour but de minimiser la réflectivité de l'empilement sous-jacent comme le montre la figure 1.4.

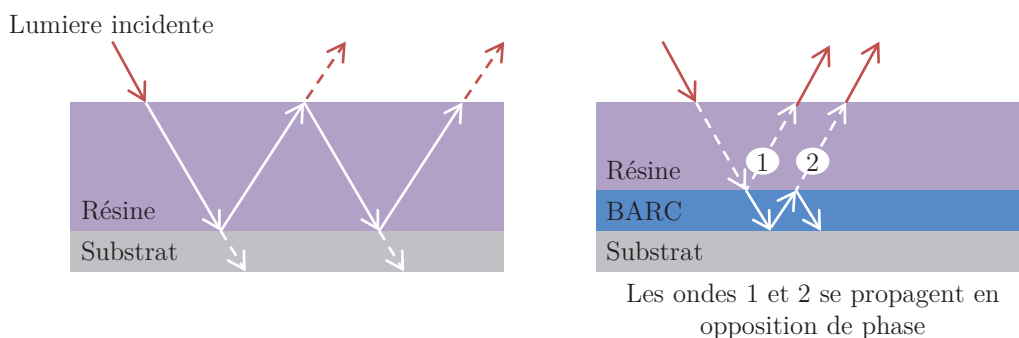


Figure 1.4 – Illustration des ondes stationnaires obtenues lors d'une étape photo-lithographique (à gauche) et illustration des réflexions dans la résine et la couche d'anti-réfléctif (à droite).

6. Top Anti-Reflective Coating / Couche supérieure d'Anti-Réfléctif

7. Bottom Anti-Reflective Coating / Couche inférieure d'Anti-Réfléctif

1.3.2.5 Recuit après exposition

Le recuit après exposition PEB⁸ est une étape essentielle pour les résines à amplification chimique. Suite à la création d'image latente, le recuit de la plaque permet d'activer les espèces catalytiques générées par le PAG et d'amorcer la réaction de déprotection de la matrice polymère, qui permettra le changement de la solubilité de la résine. Ce recuit est également nécessaire pour permettre la diffusion des molécules acides, ce qui améliore leur réactivité et, par conséquent, l'efficacité de la déprotection dans toute épaisseur de la résine de la zone sélectionnée. Une température adaptée de recuit permet le contrôle de la diffusion latérale de l'acide dans les zones non exposées. Le choix de cette température dépend des résultats des mesures de la dimension des motifs, en fonction de la température de recuit après exposition[32]. De plus, la réaction de déprotection génère un excès de volume libre dans le film de résine, ce qui modifie les conditions de diffusion des molécules au fur et à mesure que la réaction progresse. C'est pourquoi les paramètres de ce recuit doivent être adaptés pour contrôler à la fois les mécanismes de diffusion dans le film et sa densification, en fonction de l'avancement de la réaction chimique. Le recuit après exposition doit être effectué rapidement après irradiation pour limiter les problèmes de contamination et éviter que l'acide du PAG ne diffuse au-delà des zones exposées, ce qui provoquerait un élargissement des tranchées imprimées. A la fin du recuit, la réaction de déprotection est arrêtée par mise en contact de la plaque avec une surface froide. Ainsi, la température et le temps de recuit sont des paramètres clés dans le contrôle des dimensions des motifs imprimés.

1.3.2.6 Développement de la résine

Une fois la plaque exposée, celle-ci doit être développée afin de produire l'image tri-dimensionnelle du réticule dans la résine. Le développeur aqueux basique TMAH⁹ est le plus couramment utilisé en photo-lithographie[33]. Le développement se fait plaque par plaque suivant une technique de mouillage. Une petite quantité¹⁰ de développeur est versée sur la plaque afin de la recouvrir et former un ménisque. Le développement a lieu jusqu'à ce que le développeur soit évacué par centrifugation au bout d'un laps de temps qui varie de quelques dizaines de secondes à quelques minutes. La plaque est ensuite rincée à l'eau déionisée et séchée par centrifugation. La plaque est donc prête à être gravée ou implantée.

8. Post Exposure Bake / Recuit de la résine après Exposition

9. Tétraméthylammonium Hydroxide $(\text{CH}_3)_4\text{NOH}$

10. jusqu'à 10mL

1.3.2.7 Retrait de la résine

L'ultime étape consiste à éliminer la résine une fois qu'elle a rempli son rôle de protection. En règle générale, l'élimination de la résine se fait en deux temps :

- Un retrait sec, par procédé plasma.
- Un retrait humide, par attaque chimique.

1.3.3 Présentation d'un scanner

Un outil de photo-lithographie optique par projection, représenté sur la figure 1.5, est composé :

- d'un système d'illumination composé d'une source laser utilisant une longueur d'onde de $248nm$ ou $193nm$ et d'un condenseur. Dans ce système, la géométrie de la source peut être sélectionnée afin d'améliorer les performances d'imagerie. C'est le concept de cohérence spatiale et partielle, très utilisé en photo-lithographie, qui rentre dans le processus de formation d'image.
- d'un système de lentilles. Seule une portion réduite de l'optique est utilisée lors du balayage ce qui permet de travailler avec de grand champ d'exposition.
- de 2 tables haute précision permettant un contrôle de l'alignement à $2.5nm$ près.



Figure 1.5 – Représentation d'un scanner à immersion avec ses différents éléments (La source, se situant au basement, n'est pas représentée sur le schéma).

A STmicroelectronics, il existe 2 techniques de photo-lithographie :

- La photo-lithographie sèche, qui consiste à irradier un film de matériau photosensible, au travers d'un réticule où est définie l'image du circuit.

- L’immersion, qui consiste à placer un liquide d’indice supérieur à 1 (actuellement de l’eau) entre la dernière lentille de projection et la plaque de silicium.

L’utilisation de l’eau au lieu de l’air comme milieu d’exposition dans les outils de photo-lithographie fait surgir de nouveaux problèmes qui seront traités dans le chapitre 6.

1.3.4 Principe d’exposition d’un scanner

Dans un scanner, on sélectionne par construction une zone rectangulaire du champ image où on limite les problèmes de distorsion liés aux aberrations optiques. Il s’agit en fait de la partie utile de la lentille. Le réticule est éclairé au travers d’une fente rectangulaire, appelée slit[34]. La taille de cette fente représentée sur la figure 1.6 est de 25mm en X et de 8mm en Y .

Pour obtenir une image complète, on balaye le réticule selon l’axe y devant cette fente. La plaque est donc également translatée mais dans la direction opposée et à une vitesse 4 fois plus grande en raison du facteur de grandissement. Cette technique permet l’obtention de cellules de grande dimension dans la direction du balayage sans qu’un changement du système optique soit nécessaire. Néanmoins ce système induit certaines difficultés telles que des vibrations et des problèmes de synchronisation entre le réticule et la plaque[35].

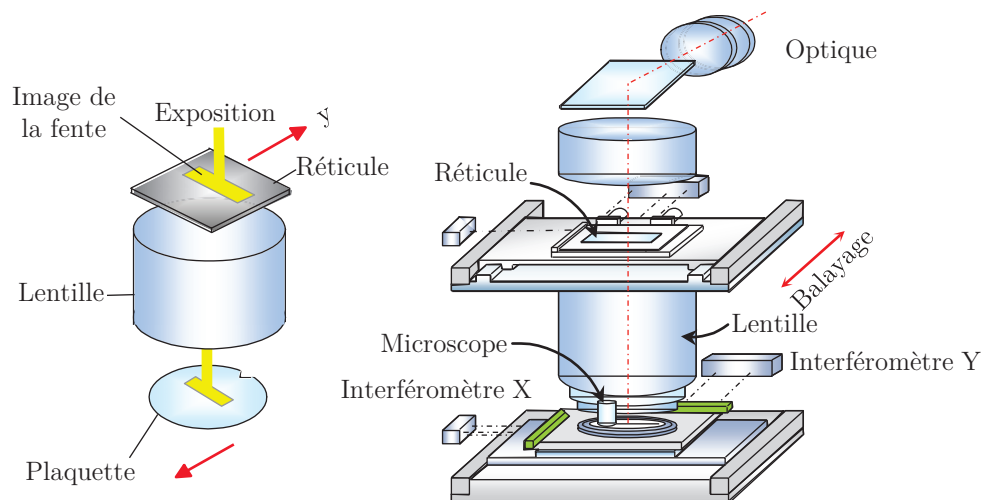


Figure 1.6 – Représentation interne d’un scanner. Dans ce système d’image, la cellule est exposée en scannant une fente à travers le réticule.

1.3.5 Définition des paramètres importants

Les trois principaux paramètres importants du procédé photo-lithographique sont : le contrôle dimensionnel, l'alignement et la contamination. Ces paramètres qualifient la performance photo-lithographique. Contrôler ces trois paramètres est absolument essentiel à la production des dispositifs semi-conducteurs car ils garantissent de haut rendement et de haute performance[36]. Dans la suite, cette thèse étudie uniquement le contrôle dimensionnel qui représente la mesure de la largeur à mi-hauteur d'une ligne de résine.

1.3.5.1 Centrage de la dimension critique

En photo-lithographie, le CD visé est idéalement le CD du réticule divisé par le facteur de grandissement du scanner. En pratique, il existe toujours un écart lié au fait que tous les paramètres ne sont pas strictement maîtrisés comme par exemple : le CD du réticule, le procédé de la résine, la dose et le focus du scanner, etc ...[37]. On définit, dans l'équation 1.1, l'écart du CD obtenu au CD visé.

$$\Delta CD = CD_{obtenu} - CD_{visé} \quad (1.1)$$

1.3.5.2 Dispersion de la dimension critique

La mesure de plusieurs CD du même motif détermine une distribution dimensionnelle. Ces variations spatiales à travers la cellule, la plaque ou le lot, sont aussi importantes et permettent d'identifier des types de faiblesses. Aujourd'hui, la feuille de route internationale des technologies semi-conducteurs ITRS¹¹ prévoit par exemple pour la technologie 28nm la nécessité de contrôler l'uniformité du CD intra-plaque à 1.9nm (3 σ)[38].

1.3.5.3 Résolution d'un procédé photo-lithographique

La résolution d'un procédé est le motif de plus petite dimension imprimable dans un film de résine[39]. Elle peut être influencée par deux composants principaux du procédé photo-lithographique :

- l'outil d'exposition : purement optique, dépendant de la longueur d'onde et de son ouverture numérique.

¹¹. International Technology Roadmap for Semiconductors /Feuille de route internationale des technologies des semi-conducteurs

- la résine : liée à sa formulation (transparence à la longueur d’onde, dimension des molécules), ainsi qu’aux paramètres thermiques du procédé (température, temps de recuit, ...).

La longueur d’onde de la source et l’ouverture numérique NA de la lentille de projection sont les paramètres les plus importants de l’objectif. La résolution d’un système optique par projection est donnée par le critère 1.2 de Rayleigh[40], et qui correspond à la distance minimale séparant deux points images résolus. On définit alors la résolution R par :

$$R = k_1 \times \frac{\lambda}{NA} \quad (1.2)$$

Pour Rayleigh, en image aérienne, $k_1 = 1,22$. En photo-lithographie, k_1 est une constante comprise entre 0,2 et 0,6. Elle est définie par le procédé photo-lithographique (résine, développement, recuits, conditions d’illuminations, ...)[41]. L’ouverture numérique est définie par l’équation 1.3 :

$$NA = n \times \sin(\alpha) \quad (1.3)$$

où α est l’angle maximum d’ouverture de l’objectif et n , l’indice de réfraction du milieu. La résolution peut donc être améliorée en diminuant la longueur d’onde d’exposition ou en utilisant des systèmes optiques à forte ouverture numérique[42]. Cependant, le développement de nouveaux outils d’exposition fonctionnant à des plus petites longueurs d’onde et utilisant des lentilles avec une ouverture numérique plus grandes affectent la profondeur de champ.

1.3.5.4 Concept de profondeur de champ

Pour un système optique donné, il existe une distance autour du plan focal image¹² pour laquelle l’image a un degré de «netteté» acceptable. En photo-lithographie, on définit, dans l’équation 1.4 la profondeur de champ DOF¹³, pour une longueur d’onde donnée, comme étant une distance centrée sur le plan focal image pour laquelle le CD obtenue reste dans les spécifications[43]. Nous verrons plus tard, que la profondeur de champ est différente pour un même CD selon qu’il soit isolé ou qu’il fasse partie d’un réseau. On définit la profondeur de champ par l’équation 1.4 :

$$DOF = k_2 \times \frac{\lambda}{NA^2} \quad (1.4)$$

avec k_2 une constante qui dépend des paramètres résines et de la cohérence

12. Le plan image est considéré comme étant fixe sur l’axe optique

13. Depth Of Focus / Profondeur De Champ [nm]

partielle de l'illumination. La DOF, représentée sur la figure 1.7 est particulièrement importante en photo-lithographie car elle contribue à la stabilité du CD. En pratique, l'image ne se forme pas dans le plan image idéal mais plutôt sur une surface d'image qui dépend de multiple paramètres comme par exemple la planéité du réticule ou la température de l'environnement. Dans les outils d'exposition actuels, la profondeur de champ est de l'ordre de quelques centaines de nanomètres.

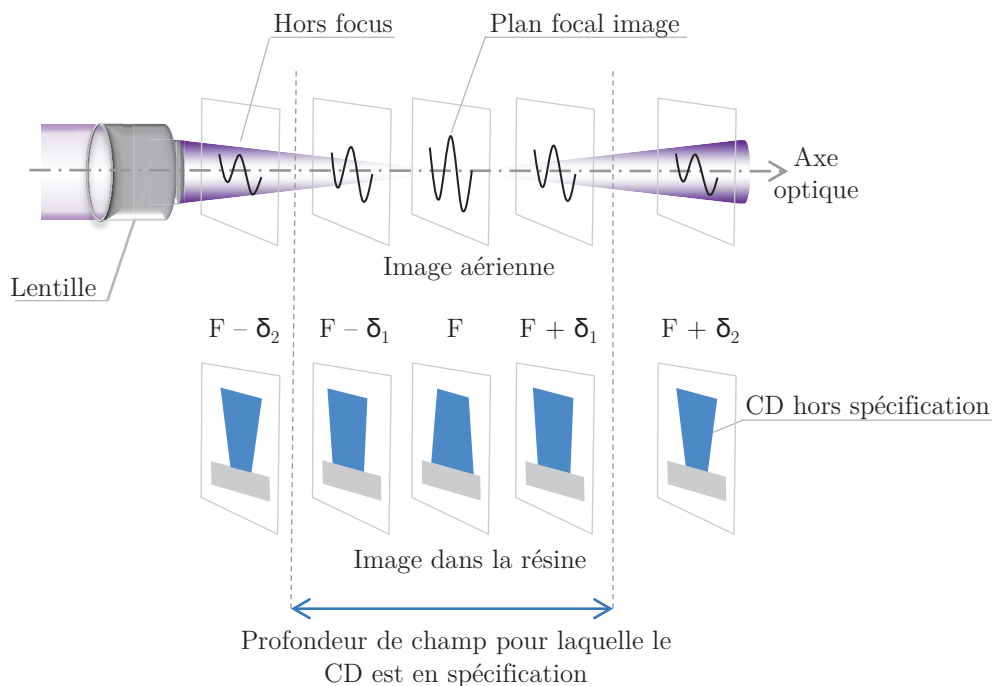


Figure 1.7 – Représentation de la profondeur de champs en terme d'image (en haut) et en termes de dimension critique dans la résine (en bas). L'intensité et le CD dépendent de la position d'observation sur l'axe optique.

1.3.5.5 Concept de latitude en énergie

De même que la profondeur de champ définit une zone de tolérance en focus pour laquelle le CD peut varier à énergie constante, la latitude en énergie EL¹⁴ est une zone de tolérance en dose à focus constant. La latitude en énergie correspond à la variation de dose qui peut être tolérée avant que les motifs s'impriment en dehors des spécifications[44]. La latitude en énergie est déterminée pour une plage de focus donnée. Pour étudier simultanément la variation en dose et en focus permise, on

14. Exposure Latitude [%] / Latitude en Energie [%]

trace la courbe EL-DOF représentée sur la figure 1.8. Tous les points sous la courbe seront en spécification. Cette surface est appelée fenêtre de procédé.

1.3.5.6 Définition de la fenêtre des procédés

Comme nous l'avons vu précédemment, le CD dépend donc à la fois de la dose et du focus. La fenêtre de procédé PW liant le focus et la dose caractérise la qualité d'un procédé photo-lithographique. Cette surface, représentée sur la figure 1.8, indique les plages de variation possibles en focus et en dose pour lesquelles les motifs s'impriment dans les limites des spécifications[45]. Pour définir la fenêtre de procédé, on utilise des structures représentatives du procédé par niveau et par technologie. La PW n'est autre que la représentation de la latitude en énergie en fonction de la profondeur de champ.

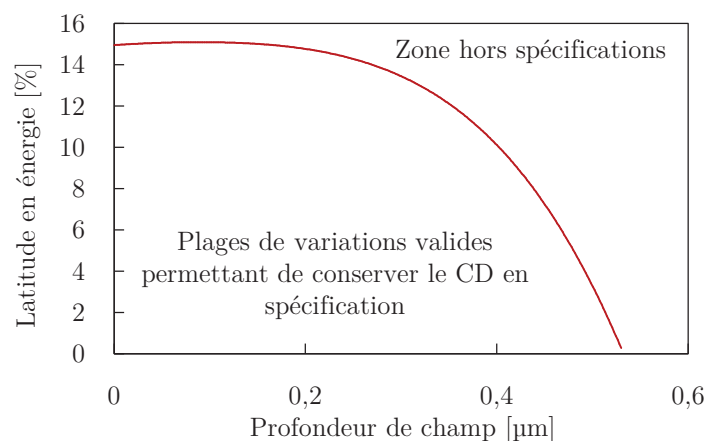


Figure 1.8 – Surface en énergie et profondeur de champ permettant de respecter les spécifications ou non pour un motif et des conditions de procédé donnés. Cette courbe est définie pour la technologie C045 et pour le niveau grille.

1.4 Détermination du profil de la résine après gravure

Nous avons prêté jusqu'à présent une grande importance au CD dans la résine. Le profil est néanmoins très important car la pente de la résine se transférera dans le matériau selon le type de gravure (isotrope ou anisotrope). En effet, pour un procédé de gravure, la forme et la largeur des motifs gravés dépendent de la forme et de la largeur de la résine, représentée sur la figure 1.9. Considérons un trapèze de résine avec un angle inférieur¹⁵ θ et une vitesse de gravure verticale de la résine R_V et horizontale de la résine R_H [46]. La variation de la dimension critique est alors de :

15. On considère que l'angle inférieur gauche est égal à l'angle inférieur droit

$$\frac{dCD}{dt} = 2(R_H + R_V \cos(\theta)) \quad (1.5)$$

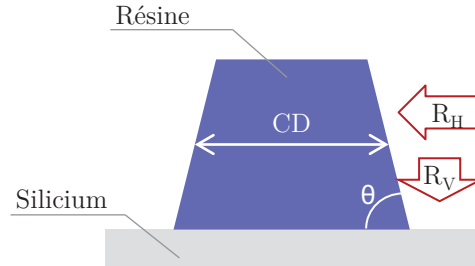


Figure 1.9 – Erosion d’une ligne de résine pendant la gravure. Le profil de gravure évolue suivant les vitesses de gravures R_H et R_V .

Par conséquent, la variation du CD pendant la gravure est fonction de l’angle inférieur du trapèze de résine. Si l’angle de résine est de 90° la composante verticale R_V ne contribuera pas aux variations du CD. En fait, l’équation 1.5 propose trois façon de minimiser la variation de la largeur de la résine pendant la gravure :

- Augmenter la vitesse de gravure des couches inférieures pour obtenir une contribution des composantes R_H et R_V les plus faibles possibles.
- Augmenter l’anisotropie¹⁶ de la gravure ($\frac{R_H}{R_V}$ faible).
- Une pente de résine verticale, c’est-à-dire un angle θ proche de 90° .

L’exemple précédent, montre clairement comment l’angle de la résine peut affecter le transfert du motif. Pour obtenir un CD après gravure en spécification, un contrôle et une correction précise de l’angle et donc de la pente de la résine doivent être appliqués.

1.5 Contrôle de la dimension critique

Dans un environnement industriel, les plaques sont généralement traités par lot de 25 dans les équipements de procédé. Pour cela, elles sont regroupés dans des boîtes appelées FOUP¹⁷. Plusieurs circuits sont ainsi réalisés en même temps sur un substrat, le plus souvent en silicium mono-cristallin. Le contrôle dimensionnel inclut les mesures suivantes :

- La mesure du CD lot à lot : Elle correspond à la mesure du CD, mesuré sur une même structure, d’un lot à un autre.

16. Capacité à graver dans une seule direction

17. Front Opening Unified Pod

- La mesure du CD plaque à plaque : Elle correspond à la mesure du CD, mesuré sur une même structure aux coordonnées (x_{plaque}, y_{plaque}) , d'une plaque à une autre sur un même lot.
- La mesure du CD intra-plaque : Elle correspond à la mesure du CD, mesuré sur une même structure aux coordonnées $(x_{cellule}, y_{cellule})$, d'une cellule à une autre sur une même plaque.
- La mesure du CD intra-cellule : Elle correspond à la mesure du CD, mesuré sur une même structure, selon les coordonnées qu'elle occupe sur une même cellule. Elle est principalement liée à la lithographie.

Chaque cellule est développée suivant une technologie qui détermine les dimensions élémentaires du circuit. Plus de 400 étapes technologiques, regroupées en niveaux, sont aujourd'hui nécessaires à la conception d'un circuit intégré. Il existe 5 types de niveau :

- Niveau Active ACT : Cette étape consiste en la définition des zones actives c'est-à-dire des zones dopées qui correspondront soit aux drains soit les sources des transistors.
- Niveau Grille GATE : Ce niveau consiste en la réalisation de la grille des transistors en poly-silicium.
- Niveau Contact CNT : Ce niveau consiste en la réalisation des trous de contact, c'est-à-dire les zones de contact entre les régions dopées et le métal mais aussi le contact entre la liaison de grille en poly-silicium et le métal.
- Niveau Ligne LIN : Cette étape consiste en la réalisation des connexions métal.
- Niveau Inter-connexion VIA : Ce niveau permet de relier les lignes de métaux entres-elles par des trous d'inter-connexions.

Dans ce manuscrit, le développement des méthodes sera appliquée à un ensemble de produits logiques des technologies C040, C028 et C020 et des niveaux Active, Grille et Contact fabriqués sur le site de STMicroelectronics à Crolles. Les tests expérimentaux sont réalisés à la fois sur silicium nu, c'est-à-dire que les motifs de résine sont déposés directement sur le substrat, et sur niveaux, c'est-à-dire que les motifs de résine sont déposés sur des plaques ayant déjà subies des étapes technologiques. Les tests expérimentés sur niveaux sont les plus importants car ils sont réalisés sur des plaque de production.

1.5.1 Sources de variation de la dimension critique

Le contrôle effectif du CD suit la stratégie : diviser pour mieux contrôler. Cette stratégie, nécessite de décomposer les variations globales du CD en effets individuels physiques et de pouvoir classer les sources d'erreurs par ordre d'importances[47].

Cette décomposition est présentée dans le tableau 1.1. En effet, il existe beaucoup de facteurs qui contribuent à la variation finale de la dimension critique :

- Les imperfections des matériaux, des résines et des plaques.
- Les erreurs et les fluctuations des équipements et des instruments de mesures.
- La qualité des réticules.
- L’environnement de la salle blanche.

Variation du CD			
Lot à lot	Plaque à plaque	Cellule à cellule	Motif
Equipement	Equipement	Dose	Diffraction
Matériaux	Non-uniformité	Focus	Effet de proximité Déformation
	Intra-plaque	Intra-cellule	
	Résine	Erreur réticule Aberration Dose Focus	

Tableau 1.1 – Récapitulatif des effets globaux impactant le CD. Chaque type d’effet peut être repéré par un type de mesure précise. Les effets intra-plaque et intra-cellule sont incorporés respectivement dans les effets plaque à plaque et cellule à cellule.

Les variations du CD définies dans le tableau 1.2 sont produites spatialement au niveau de la plaque et au cours du temps. Les variations temporelles, regroupant les effets lot à lot, sont uniquement dues aux dérives des équipements et aux variabilité des matériaux[48]. Ces variations, peuvent être réduites en temps réel en utilisant des tests de surveillance, des boucles de régulations ou encore des contrôles des procédés statistiques. Les variations spatiales se manifestent au niveau des effets puce à puce et au niveau de l’intra-cellule ou de l’intra-plaque.

1.5.2 Métrologie de la dimension critique

Parallèlement aux étapes élémentaires de fabrication, sont intégrées des méthodes de caractérisation en ligne de différents paramètres physiques et géométriques associés au produit[49]. Ces étapes de métrologie, permettent d’assurer un contrôle précis des procédés et des équipements. Parmi les méthodes de caractérisation en ligne, nous allons nous intéresser particulièrement à la caractérisation de la dimension critique. Cette mesure alimentera les effets mentionnés dans la section 1.3.1. Pour obtenir une mesure précise et juste de la dimension critique, nous devons adapter l’outil de métrologie. La forme du motif étant tridimensionnelle, la scat-

Plaque	Réticule	Scanner	Gravure
Planéité	Erreur CD	Aberrations	Puissance
Réfectivité	Défectivité	Echauffement	Pression
Topologie	Effet de proximité	Dose	Vitesse
	OPC	Focus	
		Vibrations	
Résine	Four de piste	Développeur	Milieu
Epaisseur	Temps	Temps	Humidité
Uniformité	Uniformité	Dispense	Pression
Température	Température	Développeur	Température
		Température	

Tableau 1.2 – Composantes des variations de CD dans l’atelier patterning. Chaque entité impacte de manière différente le CD. En utilisant un algorithme de métrologie précis, il est possible d’adresser un type de variation de CD à un équipement.

térométrie SCD¹⁸ sera la technique la plus à même à caractériser les dimensions de la résine avec précision[50]. La scatterométrie comporte de nombreux avantages pour la mesure d’un profil nanométrique en regard notamment des autres techniques utilisées aujourd’hui couramment par l’industrie : CDSEM¹⁹ ou AFM²⁰ :

- La scatterométrie impose seulement la présence d’un rayon lumineux. Elle est donc particulièrement adaptée aux mesures in situ, c’est-à-dire à l’endroit même où se produit l’une des étapes de fabrication. Le CDSEM[51] ou l’AFM supposent au contraire que l’échantillon soit inséré dans leur propre environnement de mesure, et ne permettent donc au mieux que de la métrologie, en ligne, c’est-à-dire intégrée à la chaîne de fabrication.
- Pour une structure en poly-silicium en technologie 45nm, l’incertitude en scatterométrie est 4 fois moins importante ($3\sigma = 0.75nm$) que celle du microscope à balayage électronique ($3\sigma = 3.28nm$) et 2 fois moins importante que l’AFM ($3\sigma = 1.6nm$).

Le tableau 1.3 réunit les principales caractéristiques des 3 appareils de métrologie :

Le microscope à force atomique, référence métrologique en terme de mesure dimensionnelle, sera principalement utilisé pour valider les résultats obtenus en scatterométrie. Une description détaillée des principes de fonctionnement des outils de métrologie est disponible en annexe B.

18. Scatterometry for Critical Dimension / Scatterométrie pour Dimension Critique

19. CD Scanning Electron Microscopy / Microscopie Electronique à Balayage

20. Atomic Force Microscopy / Microscopie à Force Atomique

Outils	SCD	CDSEM	AFM
Débit [Plaques / heure]	70	25	5
Mesure [/ heure]	900	300	30
Précision [nm]	1	5 à 10	1 à 5
Information sur le profil	Oui	Non	Oui
Mire dédiée	Oui	Non	Oui
Calibration	Non	Oui	Oui
Mesure Destructive	Non	Semi	Semi

Tableau 1.3 – *Tableau récapitulatif des différences entre la scattérométrie, le microscope électronique à balayage et le microscope à force atomique.*

Pour valider les mesures effectuées dans ce projet, une corrélation entre les 3 équipements de métrologie a été effectuée. La figure 1.10 représente la corrélation effectuée sur la dimension critique qui est une ligne de résine de $170nm$.

Cette corrélation s'apparente à de la métrologie hybride[52] qui permet de valider les mesures effectués par scattérométrie par l'AFM, outil de référence métrologique.

1.6 Conclusion

La photo-lithographie optique reste, pour le moment, la technique la plus utilisée[53] dans une chaîne de fabrication en volume. Beaucoup de solutions, comme l'utilisation de source à géométrie variable Flexray[54] de la société ASML ou encore l'introduction d'un liquide entre la lentille et la plaque, ont contribué à étendre la résolution limite de l'équipement de telle sorte qu'aujourd'hui, il est possible d'obtenir des CD inférieurs à la longueur d'onde de l'illumination. Pour poursuivre l'objectif d'augmentation de densité d'intégration et de performances des circuits, de nouvelles techniques de lithographie reposant sur de nouvelles approches doivent être développées. Certains paramètres de l'outil d'exposition comme la dose et le focus jouent un rôle essentiel dans le centrage et dans la dispersion du CD[55]. L'étude poussée des CD et des pentes des motifs après photo-lithographie et après gravure dans la cellule[56] est aujourd'hui un domaine prépondérant.

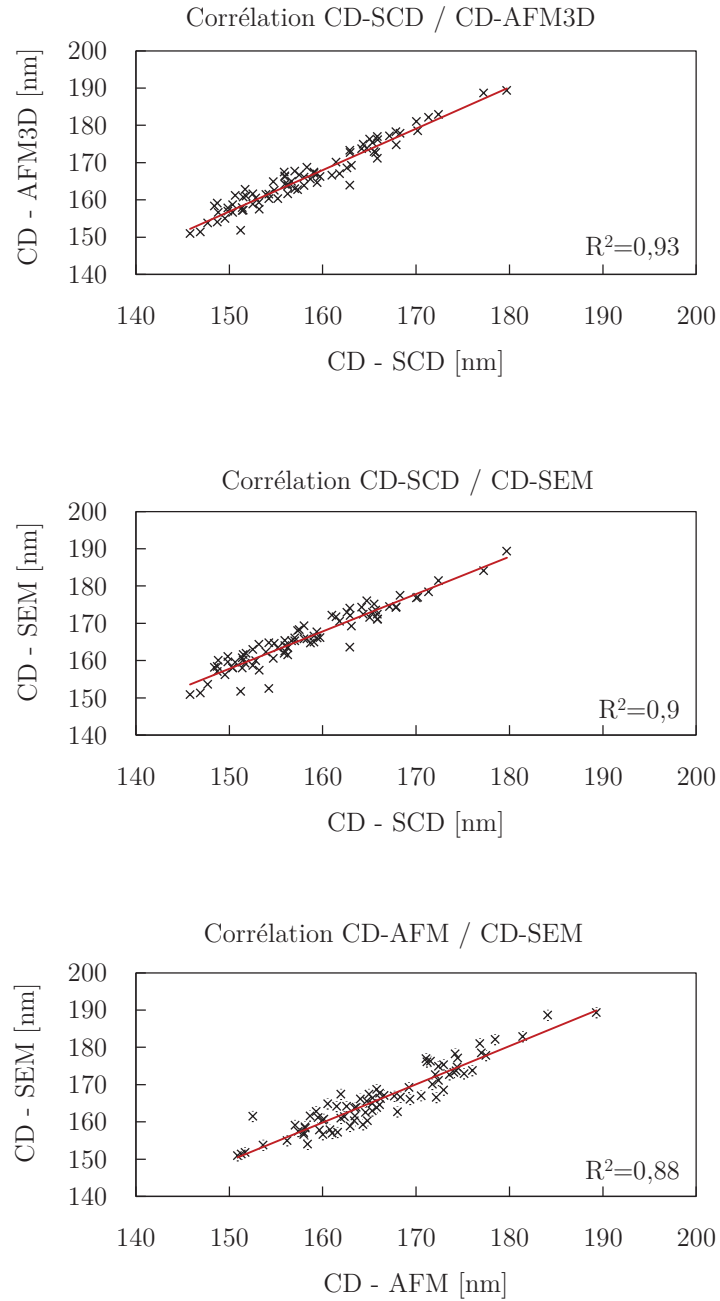


Figure 1.10 – Représentation de la corrélation des 3 équipements de métrologie. Cette corrélation a été effectuée sur une largeur d'une ligne de résine de 170nm exposée en utilisant les conditions de la technologie C040 et du niveau Grille.

Chapitre 2

Détermination des paramètres dose/focus en photo-lithographie

2.1 Introduction

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, le rôle du photo-lithographe est donc de contrôler le CD et les pentes du motif (en vue de la gravure) compte tenu des variations photo-lithographique et des outils présents. L'idéal, est d'obtenir l'énergie optimale et le focus pour obtenir le CD fixé par le cahier des charges. De plus, la fenêtre de procédé diminue pour chaque nouvelle génération photo-lithographique. Il devient alors primordial de conserver les variations dans la fenêtre de procédé afin d'assurer la robustesse des motifs. Dans un premier temps, nous étudierons avec précision les effets de la dose et du focus sur la dimension critique pour un éclairage monochromatique de longueur d'onde $\lambda = 193nm$. Puis, nous considérerons non plus la dose et le focus mais le couple dose/focus. Cette nouvelle considération nous permettra de modéliser les paramètres géométrique des motifs de la résine en fonction du couple.

2.2 Détermination de l'énergie d'exposition

Dans les outils photo-lithographique, les UV profonds sont fournis par des lasers à excimère qui sont capables d'émettre entre $157nm$ et $351nm$. La source utilisée dans cette thèse est un laser excimère, fabriqué par Cymer, émettant à $193nm$. Cette source, représentée sur la figure 2.1, a la particularité d'émettre des impulsions avec

un fort taux de répétition de $6Khz$ et une puissance de sortie relativement grande qui définiront l'énergie d'exposition.



Figure 2.1 – Schématisation du module de la source. Le laser à excimère se situe au basement c'est-à-dire sous la salle blanche.

La dose d'exposition notée D , représenté par l'équation 2.1, est définie comme étant la quantité d'énergie E du faisceau lumineux arrivant sur la résine par unité de surface S de résine exposée.

$$D = \frac{\text{Energie incidente [mJ]}}{\text{Surface exposée [cm}^2\text{]}} \quad (2.1)$$

En photo-lithographie, la dose d'exposition représente la quantité de lumière qu'il faut pour éclairer un réticule afin d'obtenir une image dont le CD est égal à la spécification[25].

2.2.1 Détermination de la sensibilité en dose

Dans la section 1.3.1, nous avons présenté les résines à amplification chimique utilisées en photo-lithographie. Chaque résine est caractérisée par un seuil au-delà duquel la dose rend les résines solubles dans le développeur. La dose d'insolation est alors ajustée en fonction du seuil. La figure 2.2 illustre bien le fait qu'une variation de dose impacte directement sur la formation de l'image dans la résine et donc de la dose.

Comme la sensibilité de la résine, la sensibilité en dose est déterminée pour une résine donnée. Elle est déterminée par la réponse quasi linéaire du CD en fonction de la dose. La pente de cette droite, représentée sur la figure 2.3, définit donc la sensibilité de la résine.

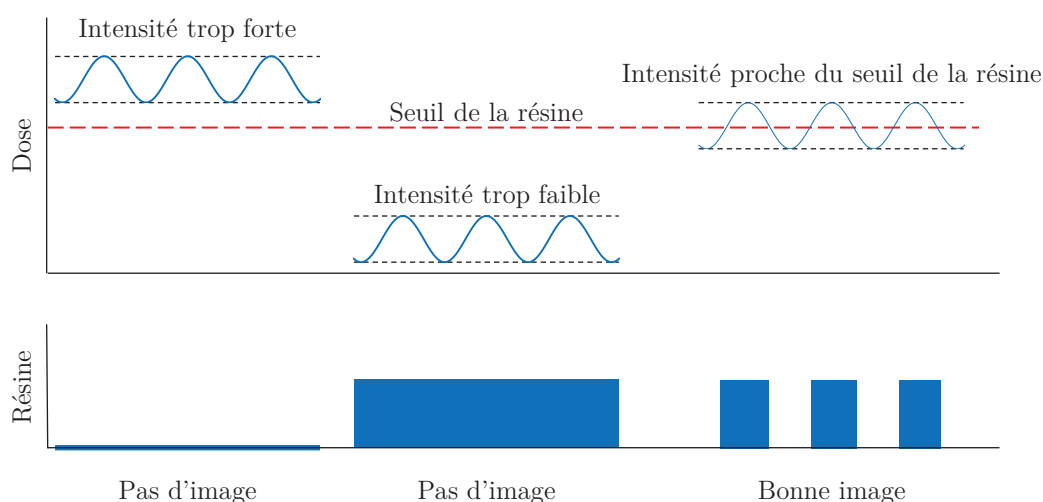


Figure 2.2 – Impacte des variations de la dose sur la formation de l'image dans la résine. L'énergie d'exposition doit coïncider avec le seuil de la résine pour que l'image se forme.

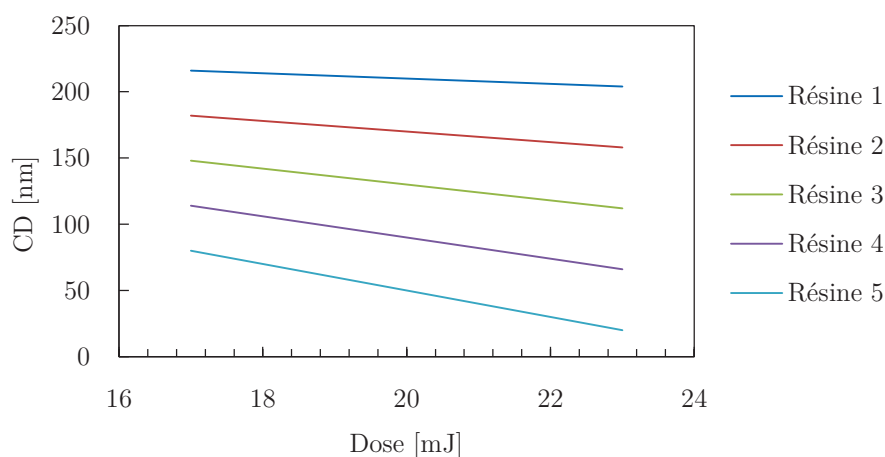


Figure 2.3 – Détermination de la sensibilité en dose pour plusieurs résines. La variation linéaire du CD en fonction de la variation en dose est différente suivant la résine utilisée. Résultats obtenus sur plaquette de silicium nu avec des conditions d'illumination identiques.

2.2.2 Détermination de l'intensité de l'illumination

Avec un éclairage uniforme sur toute la fente, le nombre d'impulsions et la vitesse de balayage doivent être identiques pour chaque exposition. Pour éviter les effets en bord de cellule en dose, l'illumination est généralement non uniforme dans la direction du balayage dans le système. La figure 2.4 représente l'intensité de la lumière en fonction de la direction du balayage.

La dose d'exposition dépend donc de l'intensité de la lumière, de la largeur de la fente d'ouverture et de la vitesse de translation du support de la plaque.

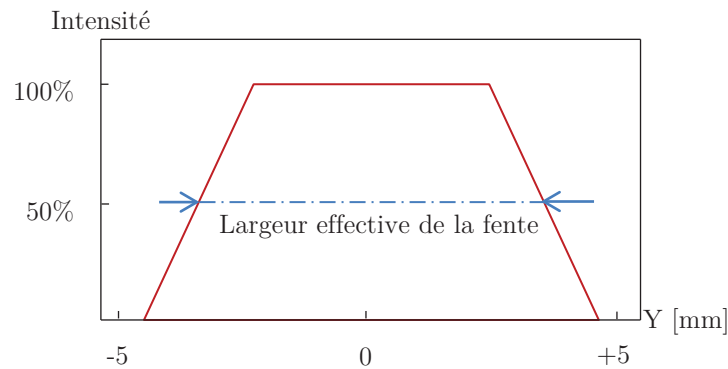


Figure 2.4 – Intensité de la lumière en fonction de la direction du balayage. L'intensité est non uniforme dans la direction du balayage.

2.2.3 Performance du système d'illumination du scanner

Les performances en dose requise dépendent essentiellement des technologies. En effet, pour le noeud $90nm$, la tolérance en dose était généralement inférieure à 6%. Aujourd'hui, pour le noeud $28nm$, le contrôle de la dose doit s'effectuer avec une précision de 1% [38]. Le tableau 2.1 présente la globalité des performances de la dose pour les 2 dernières générations de scanner.

Système d'illumination	Unité	Spécification	ASML 1700i	ASML 1950i
Performance d'illumination	%	$\leq 0,9$	1,2	0,5
Uniformité de la fente	%	$\leq 0,25$	0,2	0,12
Uniformité du balayage	%	$\leq 0,2$	0,2	0,1
Reproductibilité	%	$\leq 0,9$	0,2	0,1
Précision en dose	%	$\pm 0,7$	0,3	0,4
Correspondance des doses	%	≤ 2	≤ 2	≤ 2
Stabilité de la dose	%	$\leq 0,25$	0,05	0,03

Tableau 2.1 – Tableau récapitulatif des performances globales du système de dose d'exposition pour les scanners ASML 1700i et ASML 1950i.

2.2.4 Impact de l'énergie d'exposition

L'énergie d'exposition agit linéairement sur le CD. La figure 2.5 présente une simulation de l'image aérienne pour deux doses d'exposition. Cette simulation montre bien qu'une augmentation de la dose d'exposition entraîne une baisse de la dimension critique. En effet, le fait d'augmenter la dose d'exposition diminue l'étendue spatiale de l'intensité de lumière transmise sous le réticule.

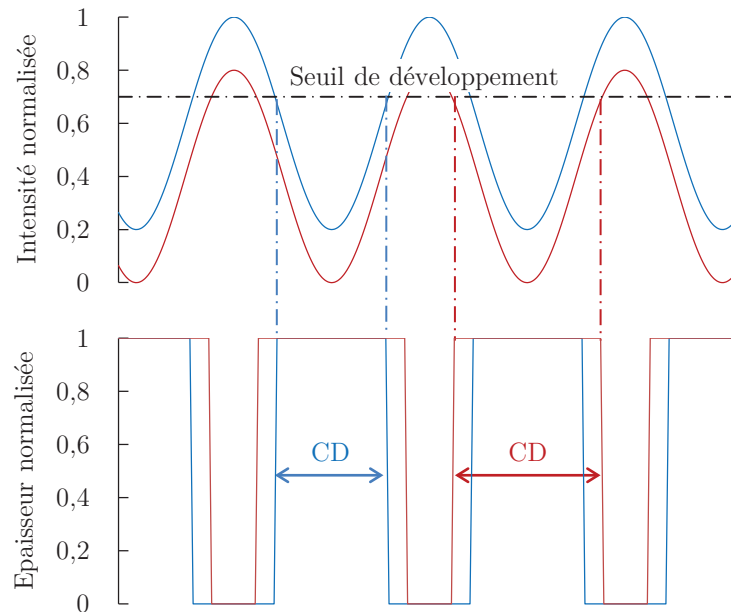


Figure 2.5 – Simulation de l'image aérienne et du motif dans la résine pour deux doses d'exposition. Le CD dépend directement de la dose d'exposition.

2.3 Détermination de la position du plan focal

2.3.1 Définition du plan focal de l'image aérienne

En optique géométrique, le focus, ou les distances focales, respectivement objet et image, sont, par définition, les distances algébriques séparant respectivement le plan principal objet H du foyer objet F_{objet} et le plan principal image H' du foyer image F_{image} [57]. Elles sont souvent notées respectivement f_{objet} et f_{image} . Ces distances sont représentées sur la figure 2.6

2.3.2 Définition du plan focal dans la résine

La définition du focus pour la photo-lithographie optique est un peu moins intuitive. Au cours du processus de lithographie, le système d'éclairage projette l'image du réticule au travers de l'objectif dans la résine. Les caractéristiques de l'image projetée peuvent varier à travers l'épaisseur de la résine mais aussi, selon la topologie du substrat. Par conséquent, la position focale photo-lithographique notée F doit être définie comme étant une position par rapport à une hauteur référence qui est celle de la surface de la résine¹. Par exemple, pour une hauteur HT de résine, le focus

1. La surface de la résine est considérée comme plane

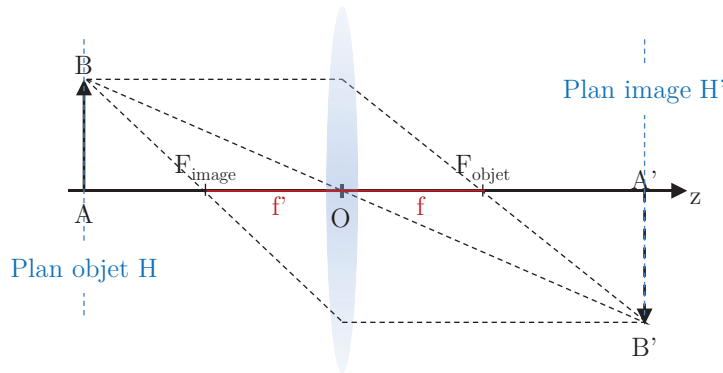


Figure 2.6 – Un objet AB éclairé placé à gauche d'une lentille convergente va donner une image réelle $A'B'$ à droite de la lentille. On peut noter que cette image est inversée et de taille différente par rapport à l'objet initial.

sera défini comme étant à une hauteur HT_k compris dans l'intervalle $[0; HT]$, pour laquelle l'image obtenue aura le meilleur contraste. Les valeurs positives du focus seront alors plus proche de l'interface résine/air et les valeurs négatives du focus plus proche de l'interface résine/substrat. On définit alors le focus dans la résine par l'équation 2.2 :

$$Focus = Z_{HT_k} \quad (2.2)$$

Les positions du focus au sein de la résine pourront alors varier de $-HT_k$ à $HT - HT_k$.

2.3.3 Définition du plan focal en simulation

La définition du focus pour la simulation optique est différente de la définition du focus pour la photo-lithographie optique. En effet, en simulation, on définit la position du focus à $\frac{1}{3}$ du bas de la résine en raison des mesures faites historiquement par CDSEM. On définit alors le focus simulé par l'équation 2.3 :

$$Focus_{simulé} = Z \frac{HT}{3} \quad (2.3)$$

En définitive, il existe 3 focus différents :

- Le focus aérien, noté $F_{aérien}$ qui est la position sur l'axe optique pour laquelle l'image aérienne possède un contraste maximal.
- Le focus dans la résine, noté $F_{résine}$ qui est la position sur l'axe optique pour laquelle l'image dans la résine possède un contraste maximal.
- Le focus simulé, noté $F_{simulé}$ qui est défini à $\frac{1}{3}$ du bas de la résine.

2.3.4 Définition de la défocalisation

Comme avec un appareil photo, un scanner va tenter de définir le focus,² ou le plan focal, pour réaliser une image au contraste maximal. Cependant, les variations de l'environnement comme la température ou la pression génèrent un écart de position entre le point focal exposé et le point focal théorique. La différence de position entre ces deux points définit donc les erreurs en focus ou la défocalisation notée ΔF . Ces erreurs, considérées comme étant une déviation par rapport au plan focal, provoquent des dégradations de la pente de la résine et donc du CD. Pour comprendre d'où proviennent ces erreurs, nous étudierons dans le chapitre 6 l'impact des éléments photo-lithographiques sur la position du plan focal.

2.3.5 Présentation des courbes de Bossung

En micro-électronique, on caractérise un procédé d'imagerie en faisant varier simultanément la focalisation et la dose afin d'évaluer la profondeur de champ et la latitude d'exposition du procédé. On expose alors une plaque en mode FEM³ de sorte que chaque cellule présente sur la plaque soit exposée pour des conditions de dose et de focus différentes. La matrice focus-dose ainsi obtenue peut être visualisée grâce aux courbes de Bossung[58]. Ces courbes sont spécifiques à un procédé et à une structure donnée et permettent d'obtenir la largeur du motif pour une condition de dose donnée en fonction du décalage en focus. La figure 2.7 obtenue permet de déterminer la sensibilité des structures aux variations du procédé et de connaître la fenêtre de procédé associée (PW). En effet, on peut déterminer la sensibilité d'un motif aux variations de la position du plan focal en observant l'allure des courbes en iso-dose⁴. Si elles sont très incurvées, le motif sera très sensible à la position du plan focal, et si elles sont très espacées, le motif sera très sensible aux variations de dose.

2.3.6 Performance du scanner en focus

Tout comme la dose, les performances en focus requises par l'équipement dépendent essentiellement des technologies. En effet, pour le noeud 90nm, les erreurs en focus sont généralement inférieures à environ 300nm. Aujourd'hui, pour le noeud 28nm, le contrôle du focus doit s'effectuer avec une précision de 100nm[38]. Le tableau 2.2 présente la globalité des performances du focus pour les 2 dernières générations de scanner.

2. On parle alors d'auto-focus

3. Focus Exposure Matrix / Matrice Dose Focus

4. Valeur de la dose pour laquelle la profondeur de champ est infinie

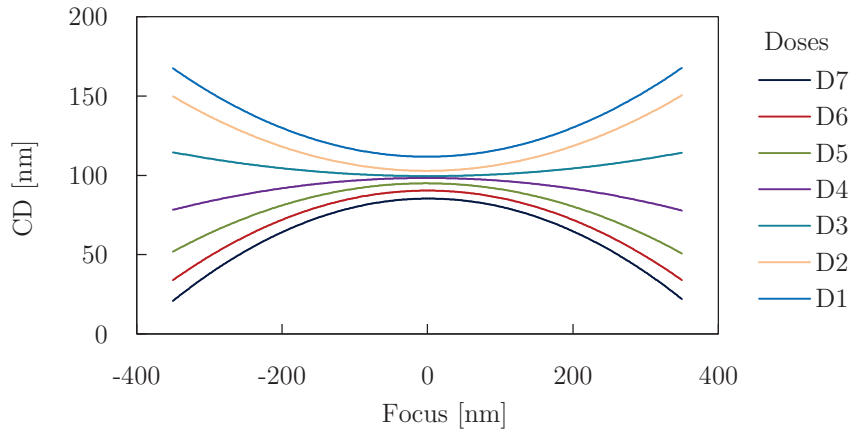


Figure 2.7 – Courbes de Bossung pour un motif donné. Cette courbe est le résultat de la matrice focus-dose FEM. Ces courbes sont utilisées pour déterminer la fenêtre des procédés.

Système de niveau	Unité	Spécification	ASML 1700i	ASML 1950i
Reproductibilité	nm	≤ 5	5	4, 5
Correspondance des supports	nm	≤ 12	9	5
Uniformité du focus	nm	≤ 30	32	26
Stabilité du focus	nm	≤ 20	13	6

Tableau 2.2 – Tableau récapitulatif des performances globales du système de focus pour les scanners ASML 1700i et ASML 1950i.

2.3.7 Impact de la variation du focus sur le CD

On définit le plan de mise au point, le plan où l'image aérienne a le plus grand contraste. L'image se dégrade en fonction du focus de part et d'autre de cette position. Il y a conservation de l'énergie de part et d'autre du meilleur focus c'est-à-dire que l'énergie totale reçue au niveau de la plaque est invariante en fonction du focus. Cette dégradation, définie par l'équation 2.4, s'exprime par une diminution de la modulation de l'image.

$$E_{totale}(F) = \int I_x dx = C^{ste} \quad (2.4)$$

avec, F , la position du focus le long de l'axe optique, I_x , l'intensité lumineuse et x la dimension du réticule.

La figure 2.8 représente l'intensité de l'image et la pente de la résine en fonction de la defocalisation.

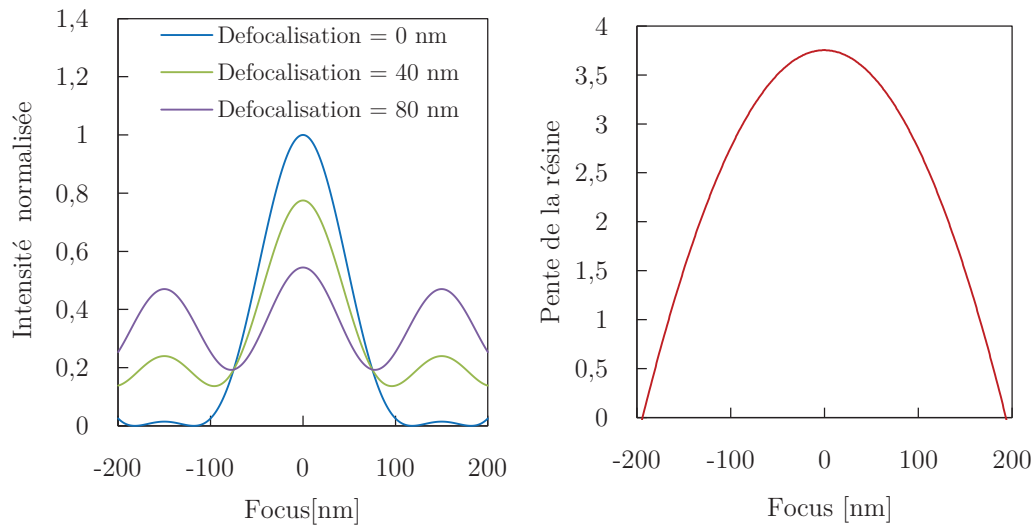


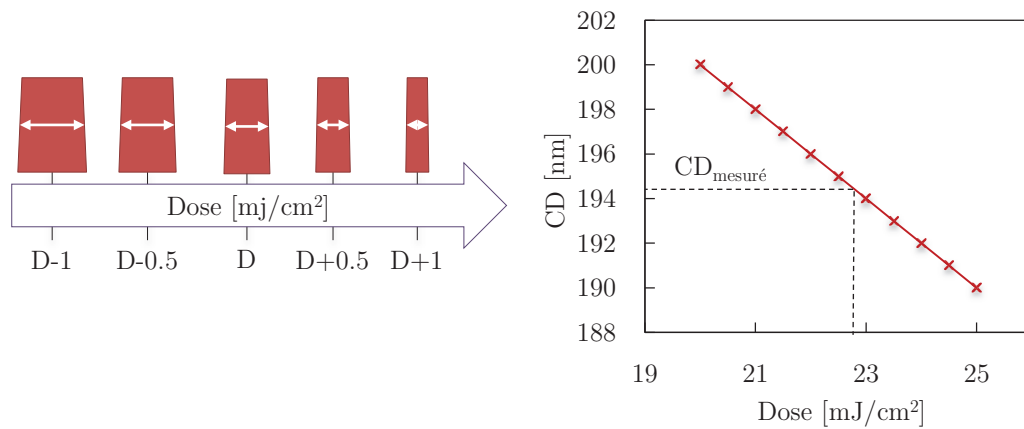
Figure 2.8 – Représentation de l'intensité de l'image et la pente de la résine en fonction du focus. L'intensité de l'image et la pente de la résine se dégradent si l'exposition est hors focus.

2.4 Détermination simultanée du focus et de la dose

Pour déterminer simultanément la dose et le focus, il est nécessaire d'étudier plus en détail les réactions du CD en fonction de ces paramètres. La figure 2.9, obtenue par simulation, montre clairement que le CD réagit linéairement en fonction de la dose. Par conséquent, une valeur de CD correspond à une valeur de dose. Pour déterminer la dose optimale d'exposition, on caractérise la droite du procédé en exposant une FEM. Dès lors, nous connaissons la pente de la droite et l'ordonnée à l'origine. En inversant l'équation, il sera alors possible de déterminer la dose optimale pour le CD visé.

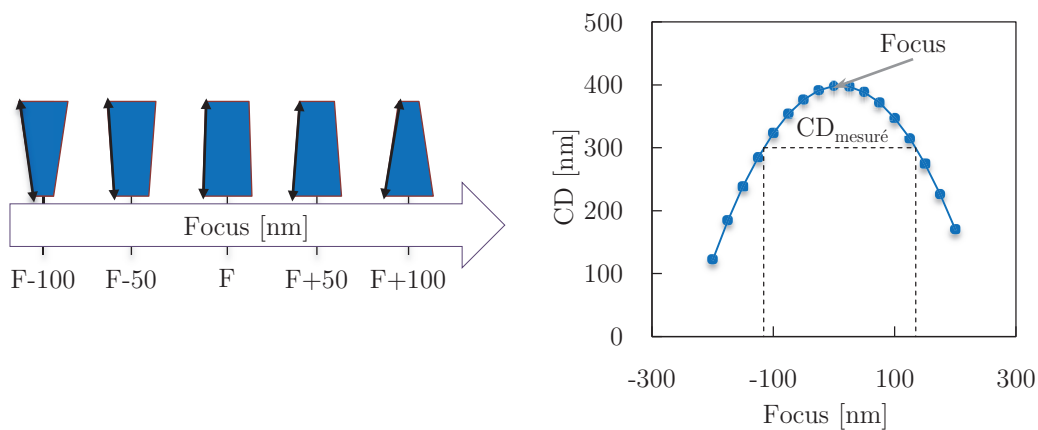
Le focus réagit différemment. En effet, la figure 2.10 montre qu'une valeur de CD correspond à 2 valeurs en focus. La difficulté réside dans le fait qu'un seul de ces 2 focus est correct. En effet, on cherche le focus qui donnera le meilleur contraste et donc un CD optimal et une pente optimale. Ces 2 focus sont symétriques par rapport au meilleur focus.

Il existe donc une infinité de couple dose/focus pour le CD visé. Néanmoins, 1 seul couple donnera le meilleur contraste et la pente maximale dans la résine. Cette pente est déterminante puisqu'elle définit le CD après gravure comme nous l'avons vu dans la section 1.4.



1 mesure de CD \rightarrow 1 valeur de dose

Figure 2.9 – Qualification de l'impact de la dose sur la dimension critique. Le CD réagit linéairement en fonction de la dose. Résultats obtenus par simulation en technologie C040 et pour le niveau grille.



1 mesure de CD \rightarrow 2 valeurs de focus

Figure 2.10 – Qualification de l'impact du focus sur la dimension critique. Le CD réagit quadratiquement en fonction du focus. Résultats obtenus par simulation en technologie C040 et pour le niveau grille.

2.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre l'impact des paramètres photo-lithographiques sur le CD. Nous avons remarqué que la dose a une action directe sur le CD à mi-hauteur MCD⁵ qui est la dimension suivie en production. Pour obtenir le CD visé, il est donc pratique de corriger la dose. Par ailleurs, le focus agit principalement sur

5. Middle CD / CD à mi hauteur [nm]

les pentes de la résine. L'action sur la largeur du motif est donc plus modérée.

Par conséquent, pour un CD visé, il existe une infinité de couple dose/focus. Seul, un couple donnera le meilleur contraste de l'image et le bon CD après photolithographie et après gravure. Jusqu'à présent, aucune méthode ne permet de déterminer ce couple. L'enjeu de cette thèse est donc de trouver un moyen de déterminer simultanément la dose et le focus pour un CD visé. Intégrer les 2 paramètres photo-lithographiques dans une boucle de régulation, plutôt qu'un seul actuellement, permettra de maintenir d'avantage l'uniformité du CD et donc le rendement de la chaîne de production.

Chapitre 3

Méthodes de décorrélation Dose/Focus

3.1 Introduction

Historiquement, le focus photo-lithographique était déterminé par observation au microscope optique de motifs lignes/espaces dans la résine [59]. Aujourd'hui, on détermine le focus photo-lithographique en utilisant le CDSEM et un algorithme de calcul. A l'aide d'une FEM, le focus et la profondeur de champ peuvent être estimés en utilisant les spécifications de la technologie et du niveau. Cependant, ces méthodes souffrent de la réponse quadratique du CD au focus. Cette réponse symétrique limite l'étendue des techniques pour l'automatisation. Un grand nombre de techniques de contrôle du focus a été développé en utilisant les systèmes d'imagerie avancés. Dans ce chapitre, nous allons décrire les principales méthodes utilisées dans l'industrie pour contrôler le focus. Nous décrirons ensuite les méthodes développées durant cette thèse qui permettent de déterminer à la fois le focus et la dose sur les lots de production.

3.2 Présentation des méthodes expérimentées de détermination du focus

Les méthodes expérimentées décrites dans cette section ont toutes été utilisées dans l'industrie de la micro-électronique. STMicroelectronics utilise actuellement le test NPW Focus¹[60]. Le test Baseline[®], développé par ASML,[61] est plus complet et plus précis. Ces 2 méthodes seront décrites dans les sections suivantes. L'objectif

1. Non Productive Wafer for Focus/ Plaquette de Suivi du Focus

de la décorrélation est de mettre en évidence, à partir de mesures, des effets et des signatures dans le but de déterminer le contributeur principal. La figure 3.1 décrit cet objectif.

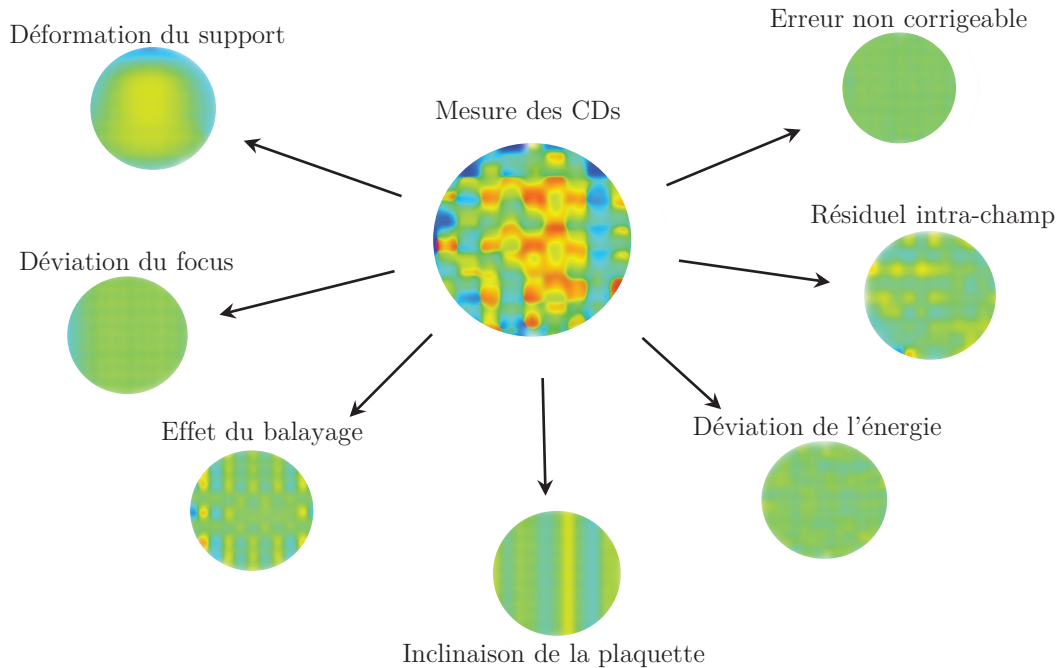


Figure 3.1 – *Objectif de la décorrélation dose/focus : Trouver le contributeur principal à partir des mesures effectuées sur un outil de métrologie.*

3.2.1 Présentation du test NPW Focus

Le test NPW Focus présente l'avantage d'exposer les plaques en utilisant le système automatique de la salle blanche sans arrêter le cluster[62]. Cependant, il ne permet pas de définir la référence en focus de l'équipement. La durée d'exposition est de 2 minutes par stage d'exposition mais ce test nécessite 2 heures de mesures sur un équipement de métrologie annexe. Les mesures sont ensuite récupérées par un logiciel de traitement intitulé Symphony[®] qui permet de déterminer pour chaque point de la cellule mesuré le meilleur focus. Ce focus est calculé à partir de l'évolution de la dimension critique en fonction du focus sur des motifs isolés verticaux et horizontaux de $100nm$, pour les scanners $193nm$, et sur des motifs isolés verticaux et horizontaux de $150nm$ pour les scanners $248nm$. Ces motifs sont implantés sur un réticule spécialement dessiné pour ce test. L'objectif du NPW Focus dans Symphony[®] est d'une part d'avoir un suivi régulier du focus des scanners propre à STMicroelectronics et, d'autre part, de suivre l'inclinaison du plan focal dans la

fente et l'inclinaison du plan focal dans le sens de balayage.

3.2.1.1 Déroulement du test NPW Focus

Pour chaque plaque, on expose le réticule NPW Focus à 9 valeurs de focus différentes. Ces 9 cellules, correspondant aux 9 valeurs de focus, sont déterminées de telle sorte que l'effet du sens du balayage soit minimisé. En utilisant la scattérométrie, le MCD horizontal et le MCD vertical de 36 sites par cellules (9 points et 4 positions dans la fente) sont mesurés. Ces 36 sites sont choisis pour déterminer les corrections du scanner à savoir :

- l'effet de la lentille et de la fente en x (4 points).
- l'effet d'inclinaison et de balayage en y (9 points).

Pour les scanners $193nm$, toutes les valeurs du MCD inférieures à $60nm$ et supérieure à $120nm$ doivent être filtrées en raison des spécifications pour ce test obtenues expérimentalement. Pour les scanners $248nm$, toutes les valeurs du MCD inférieures à $130nm$ et supérieure à $170nm$ doivent aussi être filtrées. Pour chacun des 36 sites, il est donc possible de tracer une courbe du MCD en fonction du focus, et d'inter-poler à partir de ces 9 points vers un polynôme d'ordre 2 pour obtenir les courbes de Bossung :

$$MCD_{NPW} = a_{NPW} \times focus^2 + b_{NPW} \times focus + c_{NPW} \quad (3.1)$$

avec a_{NPW} la sensibilité quadratique du focus, b_{NPW} la sensibilité linéaire du focus et, c_{NPW} le CD lorsque le focus est nul. Le $focus_{NPW}$ correspond à la valeur de focus pour laquelle le MCD est maximum, c'est-à-dire lorsque la dérivée de la fonction précédente est nulle :

$$Focus_{NPW} = \frac{-b_{NPW}}{2 \times a_{NPW}} \quad (3.2)$$

Par conséquent, le focus horizontal et le focus vertical sont déterminés pour chaque support de plaque permettant ainsi d'obtenir le plan focal horizontal et vertical. La valeur du focus moyen pourrait être prise en compte dans une boucle de régulation afin de compenser la dérive moyenne du plan focal du scanner et de ne plus ajuster le CD uniquement par la dose. Il serait également possible de compenser l'inclinaison du plan focal dans la fenêtre de balayage et l'inclinaison du plan focal dans la fente.

3.2.2 Présentation de Baseliner[®]

La robustesse du contrôle en photo-lithographie est la capacité à contrôler le CD et l'alignement pour chaque lot. Dans l'avenir, un contrôle de chaque plaque et de chaque cellule est envisagé. Pour les scanners, cela revient à minimiser la contribution de l'équipement et à éliminer les variations entre ces équipements dans le but de pouvoir exposer une plaque sur n'importe quel scanner. Cette flexibilité est la clé d'une salle blanche de production efficace. Baseliner[®], un logiciel de la société ASML, a été développé dans cette direction. Cet outil est capable de déterminer les erreurs d'alignement et de focus pour chaque lot de suivi[63]. Ces valeurs sont donc utilisées lors de l'exposition des lots de production pour maintenir un procédé stable. Tout comme le test NPW Focus, il n'est pas nécessaire d'arrêter l'équipement. Comme le montre la figure 3.2, il suffit d'exposer des plaques de surveillance dans le scanner en utilisant un réticule et une résine spécifique et de poursuivre vers une étape de métrologie qui pourra déterminer le focus noté $F_{Baseliner}$. La Yieldstar[®], de la société ASML, est l'outil de métrologie. Les CD mesurés par scattérométrie, permettent, grâce à un algorithme de calcul, d'obtenir des mesures de focus en tout point d'une plaque[64]. Basé sur ces résultats, une valeur de focus de référence sera transmise au scanner dans le but de mettre à jour sa valeur dans l'outil de photo-lithographie et d'assurer ainsi un procédé optimal. L'atout de cette technique est sa rapidité de mesure (actuellement 0,9 seconde par point), la possibilité d'avoir une densité de points de mesure du focus élevée (jusqu'à 247 points par cellule) et son intégration au scanner sous forme de boucle de régulation.

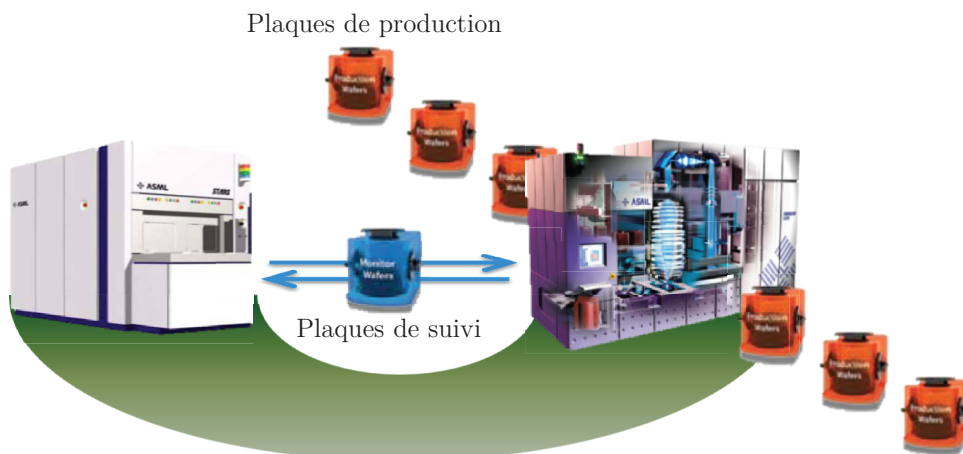


Figure 3.2 – Principe de Baseliner[®]. Le test est effectué en parallèle à la production pour ne pas arrêter l'équipement.

Il est tout de même important de préciser que la correction apporté par Baseline[®] corrige les effets de l'équipement uniquement. En effet, de part l'unicité du réticule, de la résine et de la plaque de surveillance, ce test peut déterminer les erreurs en focus dues aux modules du cluster comme la lentille et le support de la plaque.

3.2.3 Utilisation des motifs «Box-in-box»

Sur les réticules disponibles pour le scanner $193nm$, il existe des boites ELM² dites «Box-in-box» représentées sur la figure 3.3. En réalité, il s'agit de deux motifs d'alignement qui ont été modifiés. Le premier motif, une fois imprimé, est constitué de blocs de résine sur les côtés gauches et bas, alors que les côtés hauts et droits sont en fait deux réseaux identiques[65]. Ces 2 motifs sont donc complémentaires : ce qui est résine dans le motif «Clear Field» correspond au substrat dans le motif «Dark Field».

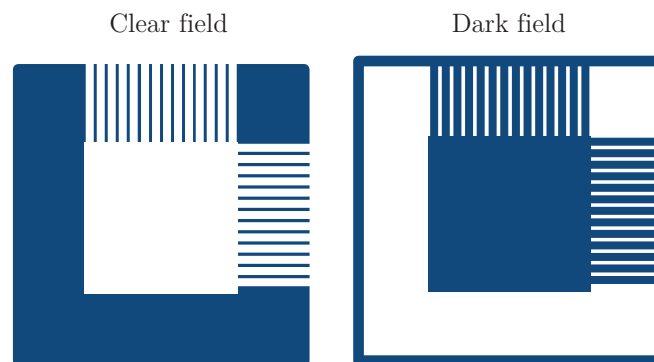


Figure 3.3 – Représentation des motifs box-in-box sur réticule à fond clair et à fond sombre.

Une fois imprimé, les réseaux apparaissent comme des rectangles homogènes, ce qui permet de mesurer les motifs comme s'ils étaient des motifs d'alignements classiques[66]. Comme l'effet est notable lorsque le pas du réseau est de l'ordre de grandeur de la résolution du scanner utilisé, les motifs doivent être différents suivant le scanner utilisé. Il est donc nécessaire d'adapter ces motifs en fonction des résolutions des scanners. Cette contrainte fait que ce test n'a pas été retenu à STMicroelectronics au profit du test NPW.

3.2.4 Principe du déplacement de l'image

Le problème de la variation quadratique du focus a été résolu en introduisant un nouveau concept de métrologie du focus. Il utilise un élément déphasant qui

2. End of Line Metrology / Métrologie de Fin de Ligne

permettait de décaler le motif dans la cellule en fonction du focus[67].

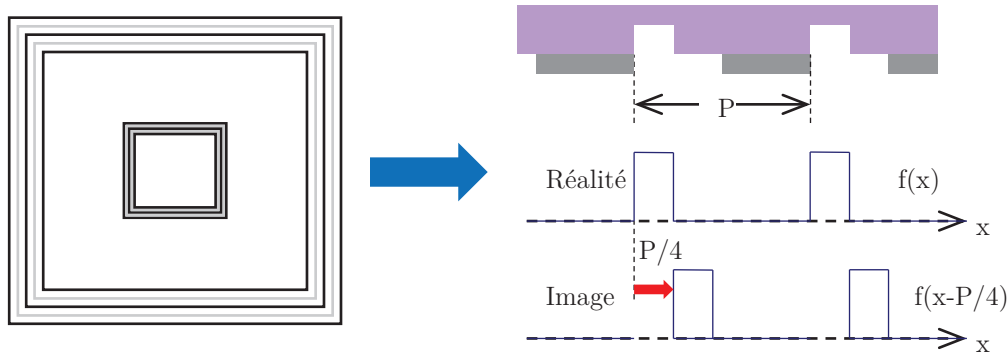


Figure 3.4 – Présentation et principe du réticule PSFM. Ce réticule permet un décalage de l'image lors de l'exposition.

A partir de là, le décalage était linéaire en fonction de l'erreur en focus. Les réticules de contrôle du focus à décalage de phase PSFM³ convertissent les erreurs de focus en décalage d'alignement du motif imprimé. Le travail des réticules PSFM a été décrit dans l'annexe C. La simulation d'un même motif placé à la fois sur une zone décalée et sur une zone non décalée est représenté sur la figure 3.5. Ce graphique indique que pour une valeur positive de focus, l'image se décale vers la droite, alors que pour une valeur négative du focus, l'image se décale vers la gauche. Le déplacement de l'image est proportionnel à la défocalisation. Cet effet peut donc être utilisé pour caractériser l'erreur en focus.

La répétition du motif à décalage de phase r-PSG⁴, ou le contrôle du focus par le motif à décalage de phase PGFM⁵, sont basés sur la même idée : Convertir les erreurs en focus en erreurs d'alignement[68]. Cette méthode n'est pas utilisable pour les technologies inférieures à $90nm$ du fait de son manque de précision. Pour les noeuds inférieurs à $65nm$, l'industrie préfère utiliser le test NPW présente dans la section 3.2.1.

3.2.5 Description de la méthode Dual Tones

Cette méthode est basée sur les mesures optiques de l'espace existant entre deux réseaux verticaux de lignes[69]. Au motif de la cellule claire est ajouté son complémentaire de la cellule noire. Ces réseaux sont constitués de lignes longues de $3\mu m$,

3. Phase Shift Focus Monitor / Suivi du Focus par Décalage de Phase

4. repeated Phase Shift Grating / Répétition du Motif à Décalage de Phase

5. Phase Grating Focus Monitor / Suivi du Focus par Décalage du Motif

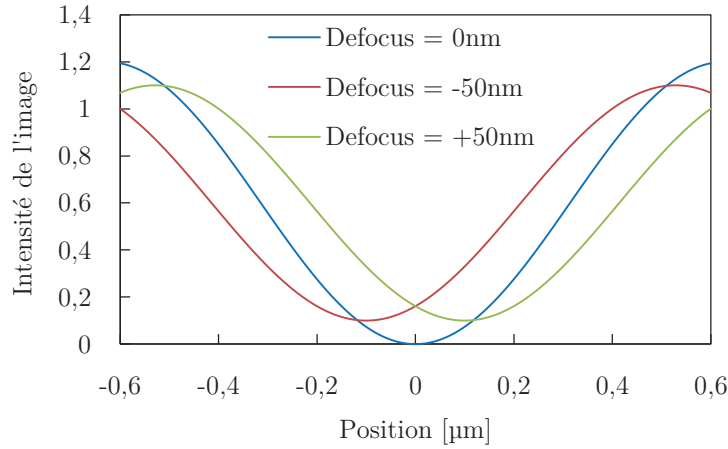


Figure 3.5 – Simulation de l'image aérienne de 2 motifs placés sur une zone décalée et non décalée pour 3 valeurs de focus. L'image se décale en fonction de la défocalisation.

larges de $0,2\mu m$ et espacées de $0,2\mu m$. Pour les deux motifs, les réseaux sont distants de $3\mu m$ [70].

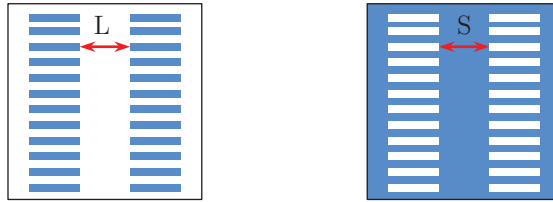


Figure 3.6 – Représentation des motifs Dual Tones. Les motifs des cellules claires et des cellules noires sont complémentaires.

Sur le motif de la cellule claire, $L_{DualTones}$ correspond à la distance entre les réseaux de lignes alors que $S_{DualTones}$ est la longueur sur le motif de la cellule noire séparant les réseaux de tranchées. Ces deux distances sont mesurées par un appareil optique pour lequel les deux réseaux apparaissent comme des ensembles rectangulaires homogènes. La mesure des distances, $L_{DualTones}$ et $S_{DualTones}$, est répétée sur les cellules d'une FEM. Ces deux ensembles de mesures ont un comportement particulier vis-à-vis de la dose et du focus décrit par l'équation 3.3 :

$$\begin{cases} L_{DualTones} = a_{L0} + a_{L1}E_{DualTones} + a_{L2}F_{DualTones}^2 + a_{L3}E_{DualTones}F_{DualTones}^2 \\ S_{DualTones} = a_{S0} + a_{S1}E_{DualTones} + a_{S2}F_{DualTones}^2 + a_{S3}E_{DualTones}F_{DualTones}^2 \end{cases} \quad (3.3)$$

où $F_{DualTones}$ représente le focus et $E_{DualTones}$ l'énergie d'exposition. Les mesures expérimentales de $L_{DualTones}$ et $S_{DualTones}$ pour toutes les cellules exposées

permettent de calculer les coefficients $a_{DualTones}$. Ces coefficients sont obtenus par la méthode des moindres carrés. Une fois le modèle calculé, il est possible de l'utiliser pour suivre les évolutions des paramètres dose/focus du scanner utilisé. Les distances $L_{DualTones}$ et $S_{DualTones}$ mesurées sur d'autres plaques exposées dans les mêmes conditions permettent de calculer les couples doses/focus réels. Ces calculs mettent donc en valeur les dérives possibles de la dose et du focus. Dans un premier temps, le modèle obtenu est validé par les mesures de $L_{DualTones}$ et $S_{DualTones}$ qui ont permis de le calculer. Les valeurs ainsi calculées, $E_{DualTones}$ et $F_{DualTones}$, doivent correspondre aux valeurs relatives au scanner si le modèle est correct. Cette méthode détermine chaque dose réduite, $E_{DualTones}$, en considérant la moyenne des valeurs calculées à partir des cellules relatives à la même dose. Les écarts relatifs sont inférieurs à 1.5% et l'écart relatif moyen vaut 0.5%. De même, pour chaque focus, $F_{DualTones}$, la moyenne des valeurs calculées issues des cellules relatives au même focus est comparée à la valeur donnée par le scanner. Ces deux séries de focus se correspondent à 100nm près sauf pour les valeurs proches de 0, c'est à dire proche du focus du procédé. Cependant, les déviations que l'on peut observer entre les valeurs calculées et les valeurs scanner font intervenir les variations du procédé dans la piste et le scanner ainsi que le bruit et l'imprécision des mesures optiques. Au vue de sa précision, cette méthode a été abandonnée dès le noeud 65nm.

3.3 Présentation des méthodes développées durant cette thèse

Pour améliorer considérablement les méthodes existantes, des techniques supplémentaires ont été créées durant cette thèse afin d'améliorer la précision de détermination de la dose et du focus. Ces nouvelles méthodes ont été développées en tenant compte du fait que les mesures doivent être effectuées directement sur les lots de production.

3.3.1 Méthode de la grille de Fresnel

Le principe du réseau de Fresnel est très largement détaillé dans la littérature. Globalement, ce motif appelé «grille de Fresnel» [71], va jouer le rôle d'optique focalisatrice. Une onde provenant d'un objet observé va être diffractée en chacune des ouvertures. Celles-ci sont disposées de telle façon que pour un point donné de l'axe optique, les éléments de front d'onde émergents interfèrent constructivement entre eux, résultant en l'équivalent d'une focalisation. Ici, on souhaite utiliser 2 réseaux de Fresnel de pas différent pour étudier le focus en fonction des dimensions du réseau.

La figure 3.7 représente les 2 motifs de Fresnel embarqués sur un réticule de test.

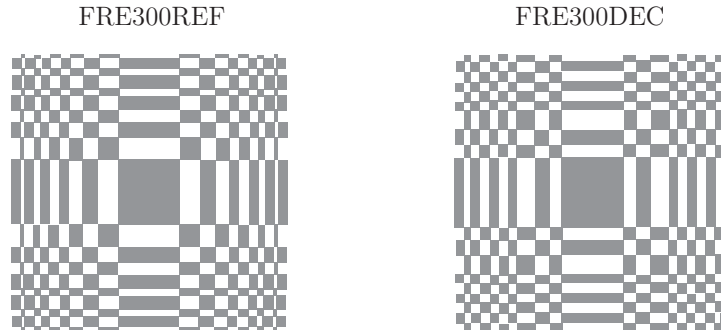


Figure 3.7 – Représentation des 2 grille de Fresnel comprenant de multiples ouvertures. Ces multiples ouvertures vont permettre la diffraction des ondes incidentes.

Malheureusement, faute de temps, je n'ai pas pu étudier les réponses en focus de ces 2 réseaux. A noter que ces mi-res sont mesurables uniquement par CD-SEM ce qui génère un temps de mesure trop long en production.

3.3.2 Méthode de la hauteur de la résine

Une des méthodes principales de décorrélation dose/focus a été de mesurer 2 paramètres géométriques d'un motif de la résine suffisamment variables en fonction de la dose et du focus. Il a été décidé de mesurer le CD à mi-hauteur (MCD) et la hauteur de résine (HT) après exposition. La réponse du CD et la hauteur de résine en fonction du focus sont étudiés sur la figure 3.8. Ces résultats ont été obtenues en exposant une plaque en technologie C040 et au niveau active.

Tout comme le MCD, on définit le focus de la résine pour lequel la hauteur de résine est maximale. Les variations de la hauteur de résine après exposition en fonction du focus s'explique à partir de la figure 3.9. En effet, pour les focus faibles, la résine est «creusée» sur les côtés, tandis que la dégradation est plus rapide pour les focus élevés. Cette dégradation élevée pour les focus fort est due au développeur qui possède une action plus importante pour les focus élevés.

Pour modéliser au mieux le CD et la hauteur de résine en fonction de la dose et du focus, le choix d'un modèle approprié est critique. On utilise généralement une double sommes d'équations polynomiales sous la forme suivante :

$$MCD = \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N a_{ij} D^i F^j \quad (3.4)$$

$$HT = \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N b_{ij} D^i F^j \quad (3.5)$$

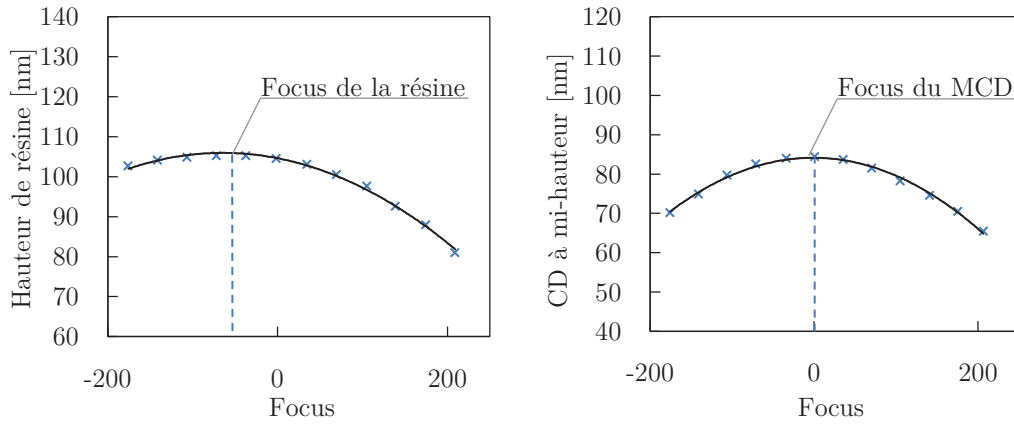


Figure 3.8 – Etude de la variation du focus sur la hauteur de la résine et sur le CD à mi-hauteur. A noter que les focus de ces 2 paramètres géométriques sont différents. Résultats obtenus en technologie CO40 et sur le niveau grille.

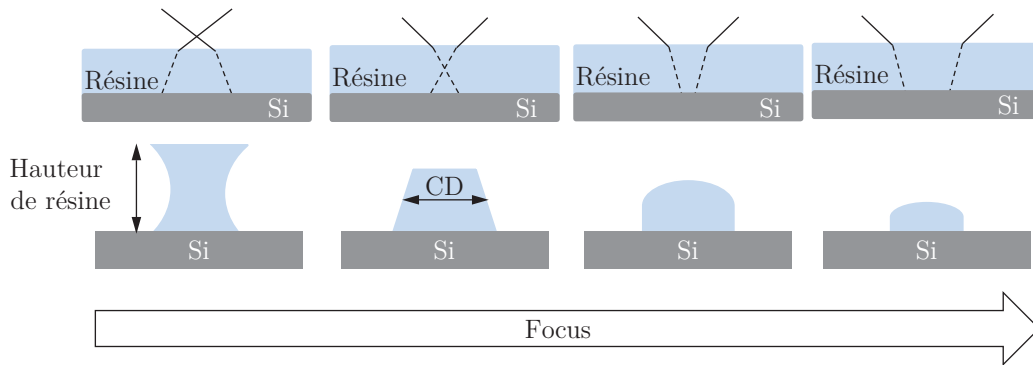


Figure 3.9 – Phénomène de variation de la hauteur de la résine en fonction du focus. le comportement de la hauteur de résine est différent suivant la défocalisation.

Avec, a_{ij} et b_{ij} les coefficients de sensibilité de la dose ou du focus pour le CD et pour la hauteur de résine, M et N les degrés de précision de la méthode et F et D respectivement le focus et la dose. Généralement, M et N sont fixés à 2. Les autres termes sont volontairement fixés à 0. On obtient donc un système défini par l'équation 3.6 :

$$\begin{cases} HT = a_{HT}F^2 + b_{HT}D + c_{HT} \\ MCD = a_{MCD}F^2 + b_{MCD}D + c_{MCD} \end{cases} \quad (3.6)$$

En inversant le système d'équation on obtient :

$$\begin{cases} a_{MCD}(HT - c_{HT}) - a_{HT}(MCD - c_{MCD}) = (b_{HT} \times a_{MCD} - b_{MCD} \times a_{HT}) \times D \\ b_{MCD}(HT - c_{HT}) - b_{HT}(MCD - c_{MCD}) = (b_{MCD} \times a_{HT} - b_{HT} \times a_{MCD}) \times F^2 \end{cases} \quad (3.7)$$

On a donc :

$$\begin{cases} D = \frac{a_{HT} \times MCD - a_{MCD} \times HT + a_{MCD} \times c_{HT}}{-a_{MCD} \times b_{HT}} \\ F = \pm \sqrt{\frac{HT + a_{HT} \times MCD - a_{MCD} \times HT + a_{MCD} \times c_{HT} - a_{HT} \times c_{MCD}}{a_{MCD} \times a_{HT}}} \end{cases} \quad (3.8)$$

Cette méthode est cependant limitée en raison de l'épaisseur de la résine. En effet, le contrôle sur la hauteur de la résine est faible (environ $5nm$) et, l'erreur sur le focus dépend de la hauteur de la résine comme le montre la figure 3.10.

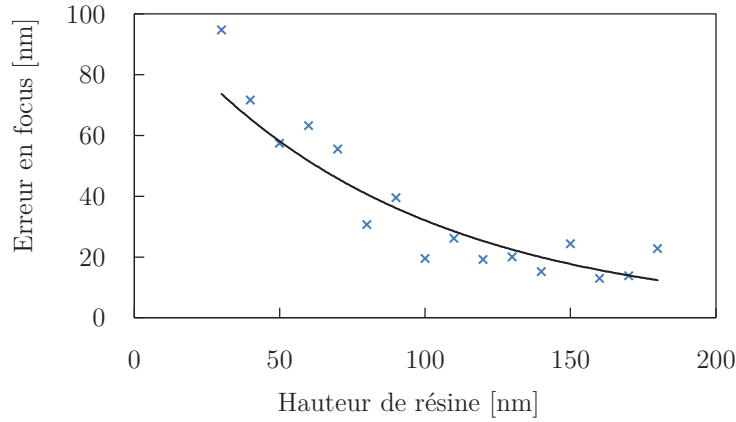


Figure 3.10 – Représentation de l'erreur sur le focus en fonction de la hauteur de la résine. On obtient les meilleures précisions pour des hauteurs de résine \geq à $170nm$. Résultats obtenus en technologie C040 et sur le niveau grille.

Pour des résines d'épaisseur $\geq 170nm$, l'erreur sur le focus est de l'ordre de $10nm$. Or, la tendance générale est à la réduction de l'épaisseur des résines. En C028, l'épaisseur de la résine est de l'ordre de $80nm$ ce qui génère donc une erreur sur le focus d'environ $30nm$. Cette erreur sur le focus est trop importante pour envisager un contrôle précis de ce paramètre.

Un autre phénomène rend inutilisable cette méthode. Sur une piste, la précision

de la hauteur de résine est de $4nm$ alors qu'elle est 2 fois moins importante sur le CD. Des erreurs due à l'étalement de la résine sont remontées comme erreur de focus. La figure 3.11 montre les cartographies du focus et de la dose déterminées par la méthode des résines.

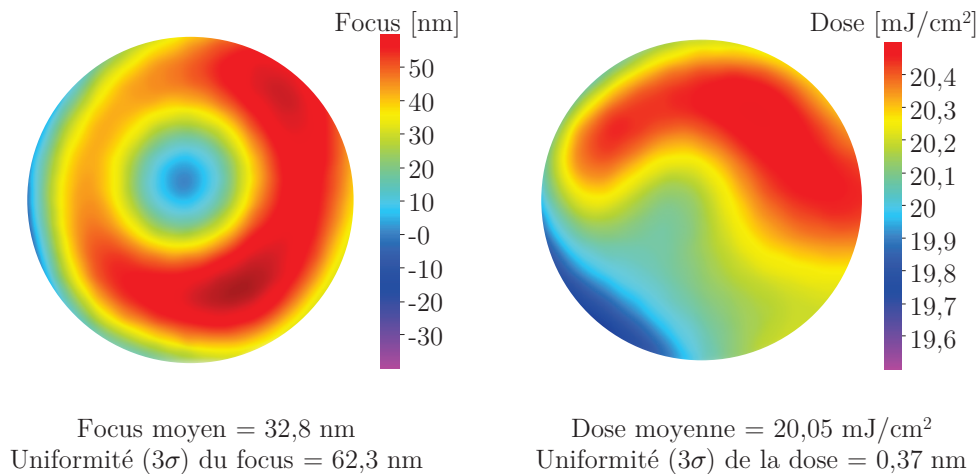


Figure 3.11 – Cartographie de la dose et du focus réalisé sur une plaque de C045 grille. La cartographie du focus représente une signature due à la buse de dispense du développeur.

Sur la figure de gauche on remarque une signature radiale qui est due au type de buse dispensant le développeur⁶. Ce module de la piste est un bras articulé qui vient déposer le développeur au centre de la plaquette. On remarque bien ici la différence entre le centre de la plaque et le bord de la plaque. La cartographie du focus n'est donc pas représentative des véritables erreurs en focus. Par conséquent, cette méthode a été abandonnée.

3.3.3 Méthode de décalage des motifs sur plaque

La méthode de décalage des motifs sur plaque est basée sur le décentrage de 2 motifs en focus. Pour créer ce décalage en z , nous avons décidé de graver une zone sur la plaque pour insérer un motif. Cette méthode est donc basée sur la mesure d'un motif de référence et d'un motif décalé en focus. La figure 3.12 décrit le procédé qui permet de créer ce décalage.

L'avantage de cette méthode est d'obtenir un ΔCD linéaire en fonction du focus. Cette relation linéaire, permet facilement de retrouver le focus pour un CD mesuré. Cette méthode, très prometteuse, rajoute 4 étapes supplémentaires sur une route de

6. Cette buse est appelée le GP Nozzle

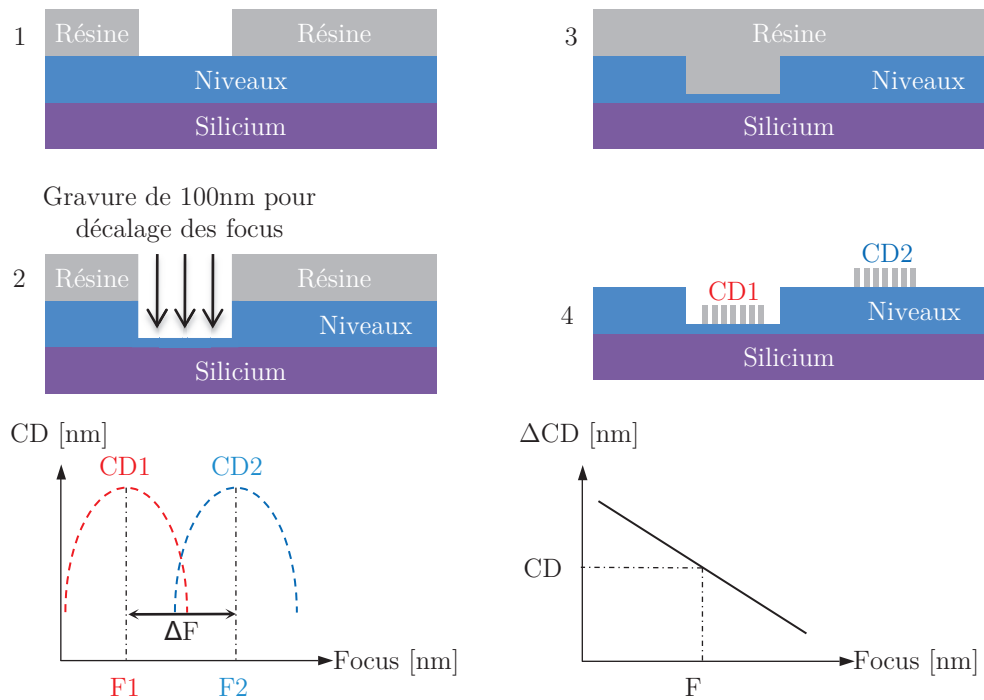


Figure 3.12 – Description de la méthode de décalage des motifs sur plaque. Cette méthode permet de créer un décalage en focus directement sur plaque.

production. En raison des coûts de ces opérations, cette méthode a été abandonnée. Cependant, le concept de décalage en z de 2 motifs a été développé sur un autre élément.

3.3.4 Réticule à décalage local de focus

Le réticule à décalage local de focus utilise la même technique que la méthode de décalage des motifs sur plaque. Le décalage en z s'effectue non pas sur les plaques mais directement sur le réticule.

3.3.4.1 Aspect théorique de la méthode

Pour réaliser le réticule à décalage local de focus, que nous appellerons DAFT⁷, nous avons utilisé un réticule similaire aux réticules de production[72]. Nous utilisons donc un réticule de type OMOG⁸. Un descriptif détaillé de ce type de réticule est présent dans l'annexe C. Ce réticule présente une zone défocalisée qui permet de

7. Dose And Focus Technic / Réticule Décalage Local du Focus

8. Opaque MoSi on Glass / Réticule MoSi sur Quartz

créer un décalage en focus par rapport à une zone de référence. Il existe plusieurs techniques pour réaliser cette zone. La première technique consiste à faire varier l'épaisseur d'un matériau en le gravant ou en le retirant. Il est également possible de faire varier localement les indices des différents matériaux composant le réticule pour créer la zone défocalisée. L'ajout d'un matériau annexe est aussi une possibilité. En effet, en rajoutant ce nouveau matériau, une variation du chemin optique se créera. Enfin, le support des motifs, réalisé en quartz, peut être gravé pour défocaliser une zone. Toutes ces techniques sont représentées sur la figure 3.13.

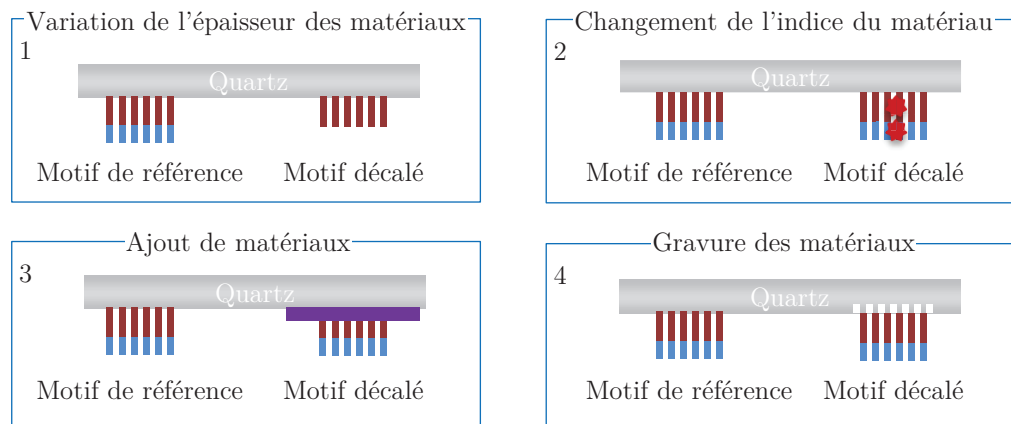


Figure 3.13 – Énumération des techniques permettant de créer, sur le réticule, un décalage en focus. Ces 4 techniques ont été brevetées.

3.3.4.2 Aspect simulation du réticule DAFT

Ce réticule utilise 2 motifs. Un motif de référence représentant le circuit et un motif décalé sur le réticule donc défocalisé sur la plaque. Ce motif décalé est utilisé pour déterminer le focus et la dose[73]. La figure 3.14 représente une simulation de ce réticule réalisée sous le logiciel EM-Suite[®] de la société Panoramic. A noter, que la translation des courbes de Bossung est proportionnelle aux décalages.

De cette façon, la différence des 2 dimensions critiques, représentée sur la figure 3.15 est linéaire en fonction du focus. Il est désormais possible de déterminer facilement le focus en mesurant une différence de dimension.

Ce projet a été réalisé avec le fournisseur de réticule DNP⁹. DNP a réalisé le réticule DAFT en retirant 80nm de chrome pour créer la zone défocalisée. Cette zone est donc composée de quartz et de 49nm de MoSi¹⁰. DNP nous a également

9. Dai Nippon Printing / Fournisseur de réticule

10. Molybdenum and Silicon

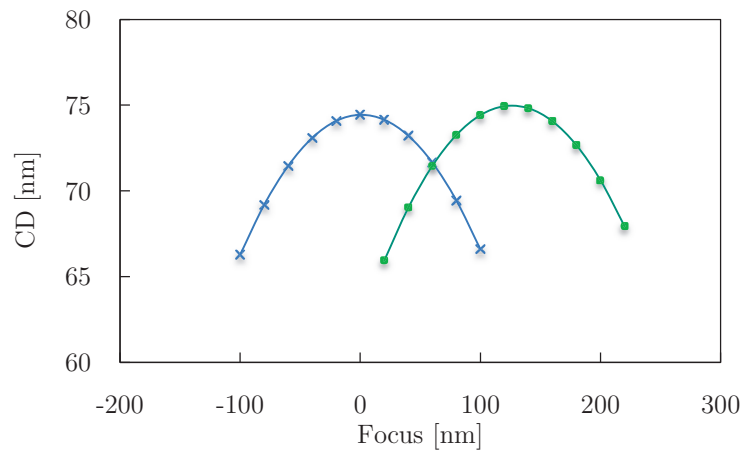


Figure 3.14 – Résultat de la simulation du réticule à décalage local de focus. Les 2 dimensions critiques sont décalées en fonction du focus.

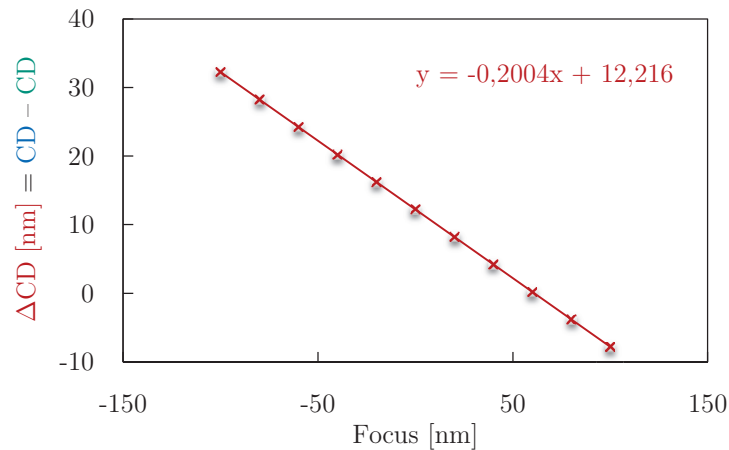


Figure 3.15 – Représentation de la différence des 2 CD en fonction du focus. Le ΔCD est linéaire par rapport au focus.

fournit des simulations pour ce type de réticule. La figure 3.16 représente le CD en fonction du focus pour des valeurs différentes d'épaisseur de chrome.

La simulation de DNP confirme bien le fait que le décalage en focus est proportionnel à l'épaisseur de chrome. Sur les conseils de DNP, nous avons utilisé une épaisseur de chrome de 118nm pour réaliser le réticule. Cette épaisseur, devrait nous fournir un décalage en focus de l'ordre de 70nm . Ce décalage permettra de nous affranchir de la création de nouvelles bibliothèques pour la scattérométrie. En effet, les motifs possèdent les mêmes dimensions que les motifs de référence. Nous avons donc dessiné et fait réaliser le réticule DAFT, représenté sur la figure 3.17, qui comprend 180 micro-cellules incluant 90 mires différentes. Les 4 coins du réticule ont subi le procédé de défocalisation. Le surcout d'un tel réticule a été évalué à 5% par notre

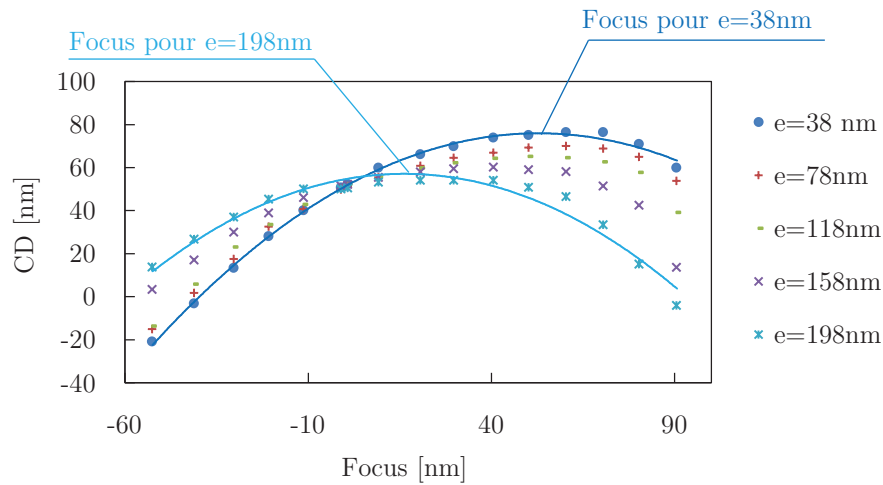


Figure 3.16 – Variations du CD en fonction du focus pour différentes valeurs d'épaisseurs de chrome. Résultat simulé utilisant un réticule OMOG.

fournisseur. Cette méthode n'a pas pu être expérimentée sur plaque durant la thèse, mais elle est en cours d'évaluation actuellement chez STMicroelectronics.

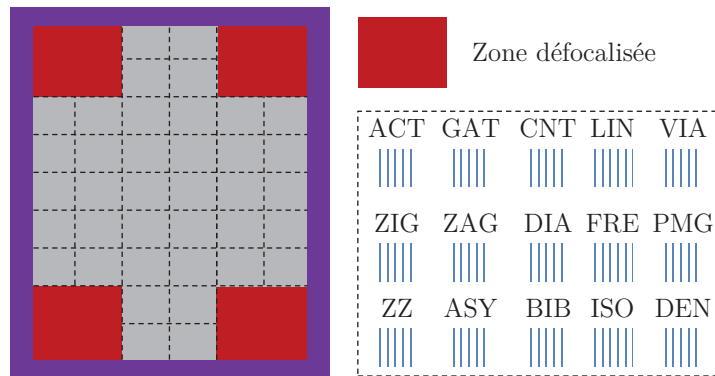


Figure 3.17 – Représentation du réticule DAFT comprenant les zones défocalisées. Ce réticule est aujourd'hui disponible en salle blanche pour expérimentation. Il dispose également de tous les motifs dessinés durant cette thèse.

3.3.5 La méthode : Focus Dose Optimisation

La méthode FDO¹¹ a été développée pour cette thèse chez STMicroelectronics dans le but de contrôler les paramètres photo-lithographique directement sur pro-

11. Focus Dose Optimisation / Optimisation de la Dose et du Focus

duit. Cette méthode utilise un principe de décorrélation dose/focus qui permet, pour chaque mesure, de déterminer le focus et la dose optimale. La difficulté de cette technique réside dans le fait qu'il est nécessaire de créer d'une part un motif de mesure sensible aux paramètres photo-lithographique et, d'autre part, d'exprimer un algorithme de calcul pour déterminer à la fois la dose et le focus.

3.3.5.1 Aspect théorique de la méthode

Comme nous l'avons vu dans la section des courbes de Bossung, le focus est toujours défini pour le CD à mi-hauteur. De part et d'autre de cette dimension, on est donc hors focus. Par exemple, le focus du BCD¹² c'est-à-dire de la largeur basse de la résine est différent du TCD¹³ c'est-à-dire de la largeur haute de la résine. Pour créer un modèle de décorrélation[74], la différence de focus existante entre le BCD et le TCD est utilisé comme le montre la figure 3.18

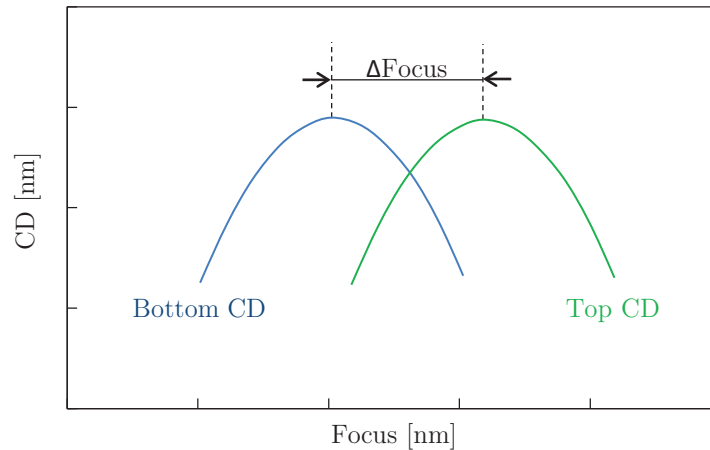


Figure 3.18 – Fondement de la décorrélation dose/focus. Le principe de cette technique est basé sur la différence de focus existante entre le BCD et le TCD.

Le choix d'un modèle approprié est critique. Pour modéliser au mieux le CD en fonction de la dose et du focus on utilise généralement une double sommes d'équations polynomiales sous la forme suivante :

$$CD = \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N a_{ij} D^i F^j \quad (3.9)$$

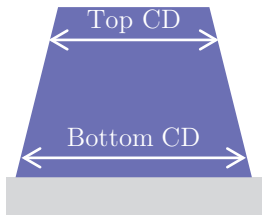
Avec, a_{ij} , les coefficients de sensibilité de la dose ou du focus, M et N les degrés de précision de la méthode et F et D respectivement le focus et la dose. Généralement,

12. Bottom Critical Dimension / Dimension Critique au Pied [nm]

13. Top Critical Dimension / Dimension Critique au Sommet [nm]

M et N sont fixés à 2. Les autres termes sont volontairement fixés à 0.

Pour déterminer la dose et le focus, il suffit, à partir de l'équation 3.9 de créer un système de 2 équations à 2 inconnues. Pour obtenir ces 2 équations, il suffit de mesurer le motif de la résine à 2 endroits différents. Nous choisissons de mesurer le TCD et le BCD. Pour mesurer ces dimensions, nous utiliserons l'outil de scattérométrie qui est capable de mesurer ces géométries. Ce système, relativement simple, est présenté sur la figure 3.19 :



$$\begin{cases} BCD - TCD = a_f F + b_f \\ BCD + TCD = a_d F^2 + b_d D + c_d \end{cases} \quad (3.10)$$

Figure 3.19 – Système d'équation de décorrélation dose focus. Ce système permet pour chaque double mesure de déterminer le couple dose/focus correspondant.

Avec, a_f, b_f les coefficients de sensibilité du focus, et, a_d, b_d, c_d les coefficients moyens de sensibilité de la dose. En inversant le système d'équation de la figure 3.19, le système d'équation 3.11 permet donc de déterminer à la fois la dose et le focus.

$$\begin{cases} F = \frac{BCD - TCD - b_f}{a_f} \\ D = \frac{(BCD + TCD)(a_f - a_d) - a_d b_f - c_d a_f}{a_f b_f} \end{cases} \quad (3.11)$$

3.3.5.2 Calibration de la méthode FDO

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, un procédé lithographique est caractérisé par une variation simultanée du focus et de la dose d'exposition. En pratique, cette caractérisation est réalisée à l'aide d'une FEM. Pour cette étude, nous avons utilisé une plaque de ce type, sur laquelle nous avons mesuré à l'aide de la scattérométrie, un motif. Ces mesures vont nous permettre de déterminer les coefficients moyens de sensibilité du système d'équation précédent[19]. En effet, les coefficients moyens a_f, b_f, a_d, b_d et c_d sont déterminés en inversant une matrice de résultat. Ce système de matrice est défini ci-dessous.

$$\begin{pmatrix} BCD_1 - TCD_1 \\ \vdots \\ BCD_n - TCD_n \end{pmatrix} = a_f \times \begin{pmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_n \end{pmatrix} + b_f \quad (3.12)$$

$$\begin{pmatrix} BCD_1 + TCD_1 \\ \vdots \\ BCD_n + TCD_n \end{pmatrix} = a_d \times \begin{pmatrix} F_1^2 \\ \vdots \\ F_n^2 \end{pmatrix} + b_d \times \begin{pmatrix} D_1 \\ \vdots \\ D_n \end{pmatrix} + c_d$$

Connaissant les coefficients moyens a_f , b_f , a_d , b_d et c_d , nous pourrions déterminer, grâce à l'équation 3.11, le focus et la dose pour les futures plaques exposées aux conditions optimales.

Une étude plus poussée sur les coefficients moyens a été réalisée pour déterminer la variabilité de chacun[75]. D'après la figure 3.20 la valeur de la dose et du focus varie en fonction des modules de la piste. Nous avons calculé à partir de 25 FEM, la variabilité moyenne de la dose et du focus. La variabilité moyenne de la dose est de $\pm 0,14mJ/cm^2$ et la variabilité moyenne du focus est de l'ordre $\pm 4,6nm$.

Module	HCP	BCT	PAB	COT	CPHP	PIR	PEB	DEV
Nombre	2	2	5	3	6	2	7	4

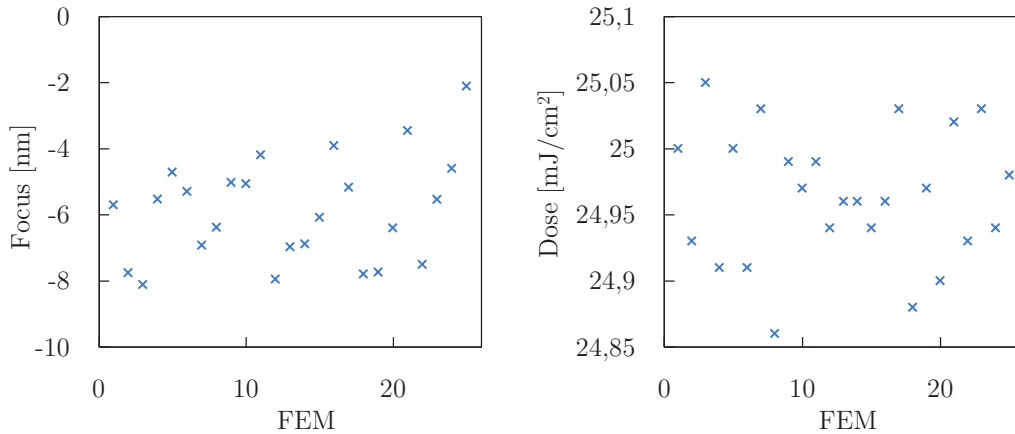


Figure 3.20 – Etude de la variabilité des coefficients moyens de corrélation en utilisant 25 FEM exposées dans des modules de piste différents.

Les dénominations des modules de la piste sont représenté dans le tableau 3.1 :

- 14. High Chill Plate / Plaque de refroidissement
- 15. Barc Coater / Etalement du Barc
- 16. Coater / Etalement de la résine
- 17. Chilling Precision Hot Plate / Plaque de réchauffement

Modules	Dénomination 1	Dénomination 2
HCP ¹⁴	High Chill Plate	Plaque de refroidissement
BCT ¹⁵	Barc Coater	Étalement du Barc
PAB	Post Applied Bake	Recuit de la résine après étalement
COT ¹⁶	Coater	Étalement de la résine
CPHP ¹⁷	Chilling Precision Hot Plate	Plaque de réchauffement
PIR ¹⁸	Post Immersion Rince	Rinçage après exposition
PEB	Post Exposure Bake	Recuit de la résine après exposition
DEV ¹⁹	Development	Développeur

Tableau 3.1 – *Dénomination des modules de la piste. Les variations des paramètres de chaque module peuvent impacter les coefficients de calibration de la décorrélation dose/focus.*

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté différentes méthodes de décorrélation dose/focus utilisant des algorithmes de calcul.

Parmi toutes ces méthodes, la méthode FDO représente, à l'heure actuelle, la méthode de décorrélation la plus prometteuse pour les technologies C045 et C040. Nous disposons enfin d'une technique de décorrélation. Sa validation expérimentale sera présentée dans le chapitre 6. Dans le chapitre suivant, nous nous efforcerons à maximiser la sensibilité de cette technique. En effet, pour les futures technologies, il est nécessaire d'optimiser cette méthode car les profondeurs de champs sont plus agressives. Pour que notre méthode soit plus précise, il est possible d'augmenter le degré de précision de l'algorithme ou de développer des motifs spéciaux. En effet, en utilisant des motifs sensibles aux variations de la dose et du focus, il sera possible d'augmenter la précision de la méthode. Pour cela, nous allons étudier des motifs particuliers et déterminer le meilleur motif pour cette technique. Avant d'étudier dans le détail l'importance du motif imprimé nous allons nous pencher, dans le chapitre suivant, sur les lois physiques de formation des images et de l'importance du choix des motifs. é

18. Post Immersion Rince / Rinçage après exposition

19. Development / Développeur

Chapitre 4

Optimisation de la méthode FDO

4.1 Introduction

La méthode de décorrélation dose/focus étant basée sur 2 mesures géométriques d'un motif de résine, il est nécessaire d'utiliser 1 motif répondant fortement aux variations de la dose et du focus. Pour créer un tel motif, nous allons tout d'abord décrire le principe de formation des images en photo-lithographie. Ensuite, nous décrirons le principe de correction de proximité optique pour sensibiliser un motif aux variations des paramètres photo-lithographique. Enfin, nous présenterons des motifs spécialement créés pour la décorrélation et nous étudierons les réponses de ces motifs aux variations de la dose et du focus.

4.2 Formation des images en photo-lithographie

Le principe de la formation des images par un scanner peut être décrit par la théorie de la diffraction de Fraunhofer[76]. En effet, en lithographie par projection, les phénomènes de diffraction observés sont des effets longues distances. Ceci est dû au fait que le type de système optique utilisé est un système à double télécentricité[77]. Ce système permet de rejeter l'image et l'objet à l'infini. L'intérêt premier est d'obtenir un grandissement indépendant de la position de l'objet et de l'image sur l'axe optique. La théorie de Fraunhofer qui décrit les phénomènes de diffraction à l'infinie est donc appropriée pour décrire le principe de la formation des images en photo-lithographie.

La lumière, provient d'une source laser couplée à un illuminateur¹. Cet illuminateur a pour propriété de former une source secondaire de forme voulue, mais aussi de re-focaliser la source ainsi formée dans la pupille d'entrée de l'objectif. On parle alors d'éclairage de Köhler[78]. Le réticule, placé sur ce faisceau convergent, diffracte. Les ordres sont ensuite partiellement captés par la pupille d'entrée du système optique. L'objectif va recombinaison les ordres qui sont passés dans la pupille de sortie pour former l'image du réticule au niveau de la plaque de silicium. La perte des ordres va alors dégrader l'image. Pour expliquer ce phénomène, nous allons étudier, dans la section suivante, un cas simple utilisant des réseaux.

4.2.1 Théorie de la diffraction

4.2.1.1 Optique de Fourier

Nous allons maintenant introduire quelques notions et notations qui nous seront utiles d'un point de vue théorique et calculatoire pour ce chapitre. L'optique de Fourier est très bien décrite dans plusieurs ouvrages de références[79] [80] [81]. Nous avons l'habitude de travailler dans un espace direct que l'on note souvent (x, y) . A ce plan direct est associé un espace dual que l'on appelle le plan des fréquences spatiales. Cet espace est noté (ν, v) . La transformation² qui permet de passer d'un espace à l'autre est appelée la Transformation de Fourier.

4.2.1.2 Théorie de la diffraction par les réseaux

Formalisons ce mécanisme à partir d'un réseau de fentes supposées infinies et parallèles de pas p et de largeur l [82]. La diffraction d'un tel réseau, lorsqu'il est éclairé par un faisceau convergent issu d'une source ponctuelle, est représenté sur la figure 4.1. On parle alors de cohérence spatiale de l'éclairement. La longueur d'onde de la source est λ . Dans ce qui suit, on suppose que la source est centrée sur l'axe optique.

Soit $Rect(\frac{x}{l})$ la fonction rectangle représentant une fente. On peut dire que le réseau est obtenu en translatant de multiples entiers de p à la fonction solitaire $Rect(\frac{x}{l})$. Puisque la translation est une convolution par la fonction du peigne de Dirac[83], si $f(x)$ représente le réseau, on a :

1. Les termes «illuminateur» et «illumination» englobent généralement la source laser et l'illuminateur

2. On considère que cette transformation est bijective

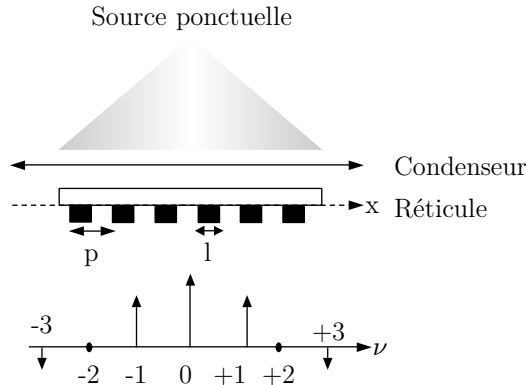


Figure 4.1 – Schéma du phénomène de diffraction. La distribution des ordres de diffraction d'un réseau périodique de période p et de largeur de fente l sous une illumination cohérente ponctuelle et centrée.

$$f(x) = \text{Rect}\left(\frac{x}{l}\right) \otimes \text{peigne}\left(\frac{x}{p}\right), \text{ avec } \text{peigne}\left(\frac{x}{p}\right) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - np) \quad (4.1)$$

Cette formule est valable pour un système à source ponctuelle au foyer d'une lentille parfaite. Le phénomène de diffraction en amplitude est donné par la transformée de Fourier de $f(x)$, $F(\nu)$ qui représente le spectre de fréquence spatiale dans l'équation 4.2.

$$F(\nu) = TF[f(x)] = \text{sinc}\left(\frac{\pi\nu l}{\lambda}\right) \times \text{peigne}\left(\frac{\nu}{\nu_0}\right), \text{ avec } \nu_0 = \frac{\lambda}{p} \quad (4.2)$$

La figure d'interférences représentée par $\text{peigne}\left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)$ est modulée par la figure de diffraction d'une fente $\text{sinc}\left(\frac{\pi\nu l}{\lambda}\right)$.

4.2.2 Théorie du filtrage par la pupille

Après la lentille, il suffit de considérer le spectre du réseau et de le multiplier par une fonction *porte* correspondant à l'ouverture numérique du système[84]. On a alors

$$G(\nu) = F(\nu) \times \text{porte}(\nu), \text{ avec } \text{porte}(\nu) = \text{Rect}\left(\frac{\nu}{NA}\right) \quad (4.3)$$

Ainsi, le système optique agit en tant que filtre passe-bas sur le spectre en fréquences qui la traverse. Seuls les ordres diffractés de fréquences inférieures à $\frac{NA}{\lambda}$

seront transmis par le système optique. Si l'on reprend l'exemple de la figure 4.1 et que l'on suppose que $\frac{NA}{\lambda} < \frac{3}{p}$, seuls les ordres 0, ± 1 et ± 2 seront transmis par la pupille. Ce phénomène est représenté sur la figure 4.2

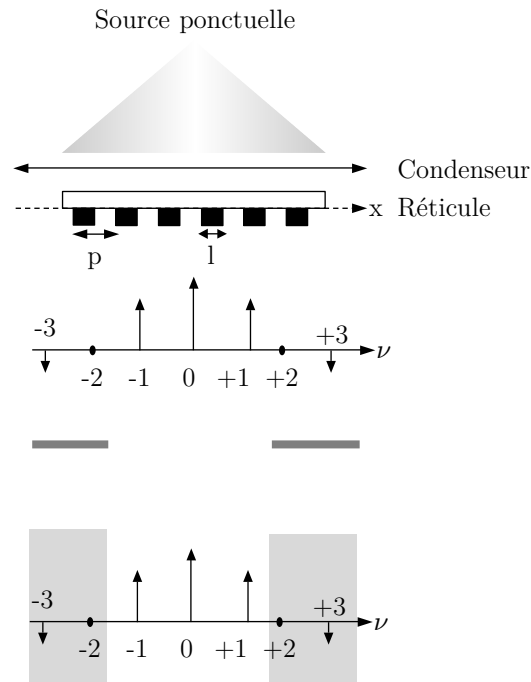


Figure 4.2 – Filtrage fréquentiel de la figure de diffraction par la pupille en supposant que $\frac{NA}{\lambda} < \frac{3}{p}$ sous une illumination cohérente ponctuelle et centrée.

On montre que l'amplitude de l'image est la transformée de Fourier inverse du spectre soit :

$$g(x') = TF^{-1}(G(\nu)) = TF^{-1}(F(\nu)) \otimes TF^{-1}(\text{porte}(\nu)) \quad (4.4)$$

avec, x' les coordonnées dans le plan de la plaque. On appelle $TF^{-1}(\text{porte}(\nu))$ la réponse impulsionnelle de l'objectif. On remarque par ce formalisme que l'amplitude de l'image n'est autre que l'amplitude de l'objectif convolué à la réponse impulsionnelle. On rappelle que le détecteur, ici la résine, est sensible à l'intensité de l'image I .

$$g(x') = TF^{-1}(F(\nu)) \otimes \text{sinc}\left(\frac{\pi x' NA}{\lambda}\right), \text{ avec } TF^{-1}(\text{porte}(\nu)) = \text{sinc}\left(\frac{\pi x' NA}{\lambda}\right)$$

$$g(x') = f(x) \otimes \text{sinc}\left(\frac{\pi x' NA}{\lambda}\right), \text{ avec } f(x) = TF^{-1}(F(\nu)) \quad (4.5)$$

Par conséquent, la formation de l'image sur la plaque, représentée sur la figure 4.3 s'exprime par :

$$g(x') = \text{Rect}\left(\frac{x'}{l}\right) \otimes \text{peigne}\left(\frac{x'}{p}\right) \otimes \text{sinc}\left(\frac{\pi x' NA}{\lambda}\right) \quad (4.6)$$

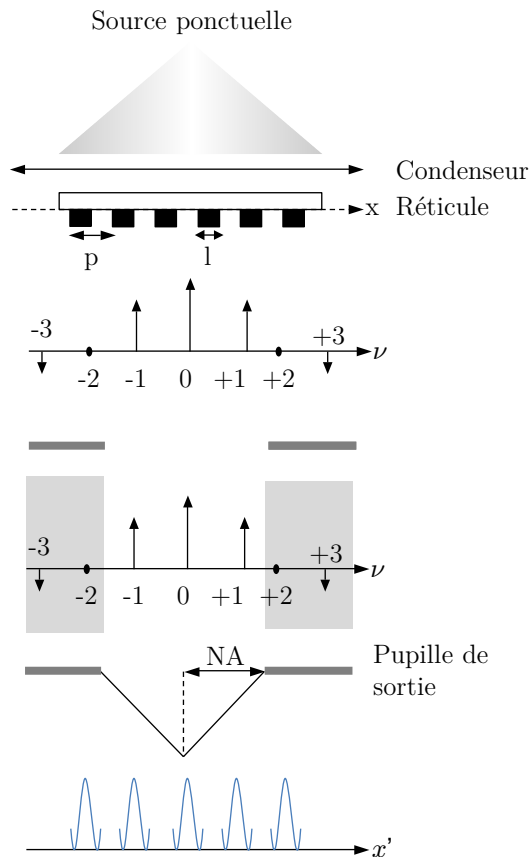


Figure 4.3 – Représentation de la formation de l'image $g(x')$ sur une plaque sous une illumination cohérente ponctuelle et centrée.

Pour obtenir une image correcte du réticule sur le substrat, la lentille doit au moins collecter l'ordre 0, qui correspond à la lumière non diffractée, et au moins un des ordres supérieurs qui sont porteurs de l'information des motifs du réticule[85].

Le plus petit motif imprimable peut être obtenu dans le cas où l'ordre 0 est situé au centre de la lentille et où les ordres -1 et $+1$ sont situés exactement en bord de lentille.

4.3 Optimisation de la méthode par les motifs

Dans cette section, nous allons étudier 2 motifs de base qui sont le motif périodique et le motif dense. Ces 2 motifs ont une réponse différente aux variations de la dose et du focus. Pour évaluer cette réponse, nous étudierons les courbes de Bossung de ces 2 motifs.

4.3.1 Etude des motifs périodiques

Pour l'étude de la figure de diffraction des motifs périodiques, trois réseaux de lignes parallèles et infinies sont considérés : pas dense, pas intermédiaire et pas relâché. Pour cette étude, nous nous placerons dans le cas d'une source ponctuelle centrée[86]. La figure de diffraction pour ces lignes peut être décrite dans la pupille de la façon suivante :

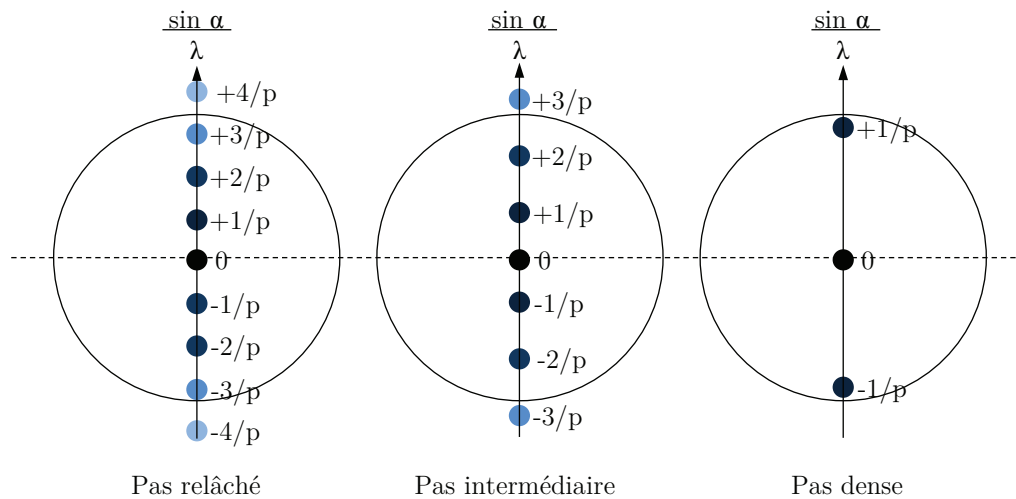


Figure 4.4 – Figure de diffraction pour 3 pas de réseaux différents en lumière cohérente.

Plus le pas du réseau est dense, plus le spectre de diffraction est large et moins la pupille capte d'ordres[87]. Sachant que théoriquement il suffit qu'une petite partie seulement d'au moins 2 ordres de diffraction soient captés par la pupille pour qu'une image se forme à la sortie du système optique, on en déduit que la résolution limite P_{min} du système en illumination conventionnelle est :

$$P_{min} = \frac{\lambda}{NA} \quad (4.7)$$

Dans le cas d'une source circulaire de rayon r , chaque point source forme sa propre image. On introduit la notion de cohérence partielle[88]. On définit alors la résolution limite du système par :

$$P_{min} = \frac{\lambda}{NA(1 + \sigma)} \quad (4.8)$$

avec σ , le facteur de cohérence partielle qui est défini comme étant le rapport du diamètre de l'image de la source lumineuse dans le plan de la pupille d'entrée du système optique sur le diamètre de cette même pupille d'entrée.

4.3.2 Etudes des motifs isolés

Dans le cas d'un motif isolé, représenté par une fente de largeur l infinie, la figure de diffraction est décrite par une fonction continue dans l'espace des fréquences[89] :

$$F(\nu) = TF[f(x)] = \text{sinc}\left(\frac{\pi\nu l}{\lambda}\right), \text{ pour un réseau à fond sombre} \quad (4.9)$$

$$F(\nu) = TF[f(x)] = \delta(\nu) - \text{sinc}\left(\frac{\pi\nu l}{\lambda}\right), \text{ pour un réseau à fond clair} \quad (4.10)$$

Les minimas de la fonction $F(\nu)$ sont obtenus pour les valeurs de ν telles que

$$\nu = \pm \frac{m}{l}, \text{ avec } m \text{ un entier positif} \quad (4.11)$$

La figure 4.5 illustre la figure de diffraction pour un motif isolé de longueur infinie présent sur un réseau à fond clair ou sur un réseau à fond sombre.

Remarque : Le plus petit motif imprimable est la réponse impulsionnelle du système.

4.3.3 Etude de la sensibilités des motifs à la défocalisation

La figure 4.6 permet de déterminer la sensibilité des 2 motifs par rapport au focus. Le motif périodique a une sensibilité de 10^{-4} , c'est-à-dire qu'une variation de $1nm$ de focus induit une variation de $10^{-4}nm$ sur le CD. Le motif isolé est 5 fois plus sensible que le motif périodique. Il est donc préféré pour utiliser la méthode de décorrélation[90]. Cependant, ce motif n'est pas mesurable par scattérométrie car

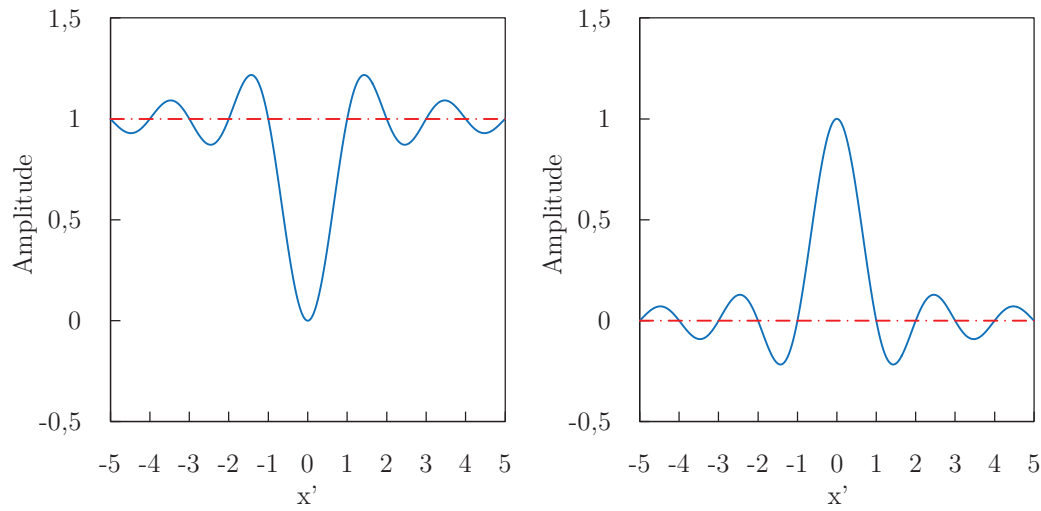


Figure 4.5 – Figure de diffraction pour un motif isolé pour un réticule à fond sombre (à gauche) et pour un réticule à fond clair (à droite).

il ne peut pas être représenté sous forme de réseau. En effet, la scattérométrie ne tolère que des mières de réseau de dimension $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$.

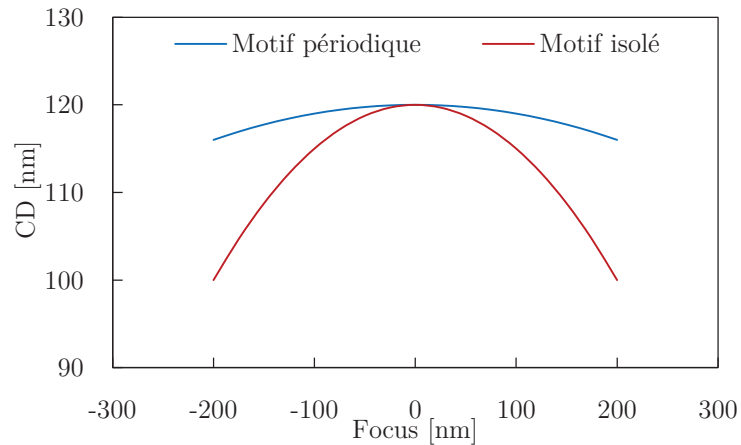


Figure 4.6 – Courbes de Bossung représentant la variation du CD pour les motifs périodiques et les motifs isolés en fonction du focus. Résultat obtenus en technologie CO40 et sur le niveau grille.

Comme dit dans le chapitre 2, la précision en dose dépend uniquement de la résine utilisé. Par conséquent, quelque soit le motif utilisé, la précision en dose sera la même.

4.3.4 Nécessité et rôle des effets de proximité optique

4.3.4.1 Définition des effets de proximité optique

L'ouverture numérique étant limitée, le nombre d'ordre de diffraction capturé par la pupille et participant à la formation de l'image aérienne est aussi limité. La qualité de l'image aérienne, dépendant du nombre d'ordre de diffraction formant l'image, présente des distorsions en fonction de l'environnement des motifs. On appelle les effets de proximité optique OPE³ la différence d'image aérienne de deux structures, au départ, identiques sur le réticule mais placées dans des environnements différents[91]. Il existe plusieurs types d'OPE :

- Bias isolé/dense : représente la différence en terme de CD entre un motif isolé et le même motif placé dans un réseau. La figure 4.7 représente l'allure typique de la variation de dimension d'une ligne en fonction de son environnement et du type d'illumination utilisé[92]. On parle alors de «Duty cycle».
- Linéarité : dans les mêmes conditions d'exposition, les CD mesurés sur la plaque présentent une non linéarité en fonction de la largeur des motifs sur le réticule. Celle-ci est d'autant importante que les CD sur le réticule sont petits.
- Retrait des bouts de ligne : la dégradation de la qualité de l'image s'exprime aussi par un retrait des fins de ligne. La longueur des motifs sur la plaque est plus petite que la longueur nominale sur le réticule. Celui est d'autant plus important que les fins de ligne sont placés dans un environnement où les motifs voisins sont très proches. Cette propriété sera utilisé plus tard pour créer un motif.
- Les arrondis de coin CR⁴ : l'absence des hautes fréquences spatiales dégrade aussi la définition des coins d'un motif dessiné à l'origine rectangulaire[11]. L'image obtenue est alors arrondie.

4.3.4.2 Correction des effets proximité optique

Comme nous l'avons vu précédemment, seule une petite partie des ordres est captée par la pupille⁵. L'image de la structure est reconstituée à partir de cet ensemble restreint de fréquences. Sur un réticule, il y a une multitude de CD différents et certains de ces CD sont mal résolus de part leurs réponses non linéaire. Les principaux effets à corriger sont le retrait des bouts de ligne, la perte de résolution aux coins, et le MEEF⁶ [93]. Le concept de MEEF est décrit dans l'annexe C. Pour

3. Optical Proximity Effect / Effet de proximité optique

4. Corner Rounding / Effet de coin

5. En général, l'ordre 0 et les ordres ± 1

6. Mask Error Enhancement Function / Fonction d'erreur du réticule

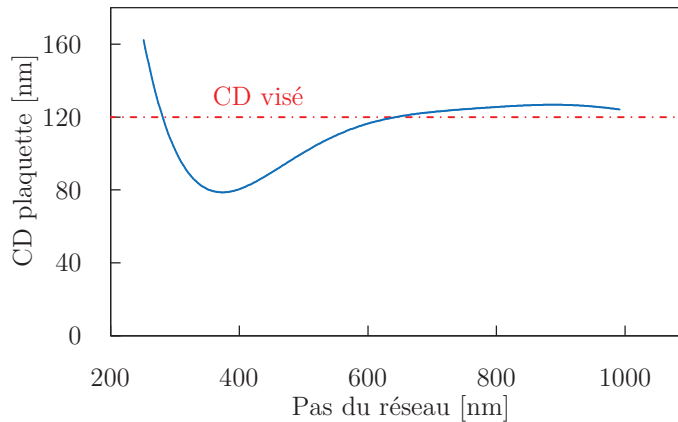


Figure 4.7 – Variation de la dimension d'une ligne de 120nm sur la plaque en fonction du pas du réseau. Le CD visé étant de 120nm.

compenser ces effets on applique ce que l'on appelle : OPC⁷ [94]. Cette correction est une optimisation de la géométrie des motifs sur réticule qui permet d'obtenir des motifs de meilleurs résolutions. Il existe deux types de correction :

- Le traitement correctif par règles géométriques[95] qui consiste à ajouter de la matière sur les coins convexes pour compenser la perte de résolution au moment de la formation d'image, à enlever de la matière sur les coins concaves ou à ajouter des motifs non résolus permettant d'obtenir une profondeur de champ optimale à proximité des motifs qu'ils protègent.
- Le traitement par modèles calibrés à partir de données expérimentales[96]. Ces modèles reproduisent l'impression dans la résine à partir d'un modèle optique et d'un modèle résine. Le traitement par modèle est un processus itératif au cours duquel la position des bords des motifs est ajustée en fonction des résultats de la simulation.

Sur la figure 4.8, on observe la différence entre deux circuits obtenus avec et sans OPC.

La correction des effets de proximité optique se fait donc en redimensionnant les motifs du réticule. Des modèles OPC permettent de trouver les corrections optimales à effectuer sur le réticule en prédisant la résolution des dimensions critiques à partir de ce réticule. Les techniques de redimensionnement sont dépendantes des types de motifs étudiés. Les principaux redimensionnement effectué par la technique OPC sont représentés sur la figure 4.9

Ces redimensionnements des motifs permettent donc d'améliorer la formation de l'image dans la résine. Par exemple, certaines corrections permettent de dé-

7. Optical Proximity Correction / Correction d'Effet de Proximité Optique

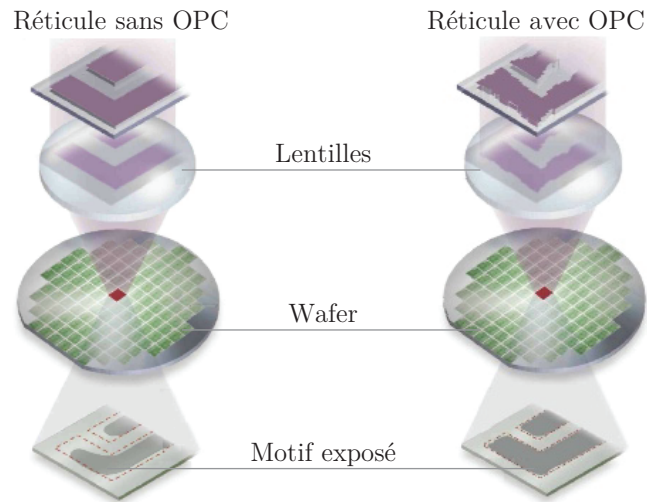


Figure 4.8 – Différence de motif exposé en utilisant un réticule sans correction d'effets de proximité (à gauche) et avec correction d'effets de proximité (à droite).

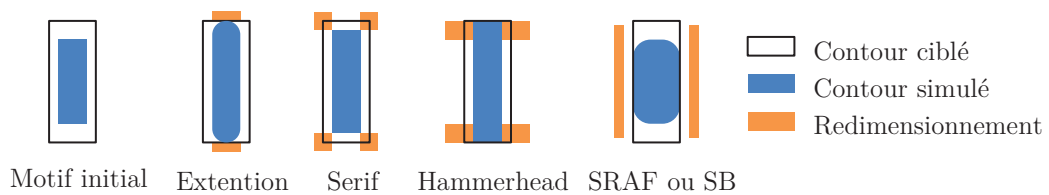


Figure 4.9 – Exemple de redimensionnement pour la correction des effets de proximités. Ces redimensionnement permettent une meilleure définition des motifs exposés.

sensibiliser le motif aux variations des paramètres photo-lithographiques. Pour notre étude, nous allons utiliser le phénomène inverse de l'OPC, c'est-à-dire dégrader la profondeur de champ de nos motifs pour le sensibiliser aux variations de dose et de focus.

4.3.5 Développement des nouveaux motifs

4.3.5.1 Utilisation de lignes non résolues

La densité des dessins des circuits intégrés jumelée à la diminution de la largeur des lignes aboutit à une limitation de la fenêtre des procédés. En effet, au sein d'un même niveau, on peut trouver des zones denses où se concentrent des motifs en réseau et des zones moins denses où se dégagent des motifs isolés. Ces deux types de zones n'ont pas les mêmes fenêtres de procédés et donc pas le même comportement lors de l'impression du motif sur la plaque. Ainsi, pour pouvoir uniformiser le

comportement d'un niveau entier, les opticiens ont eu l'idée d'ajouter des lignes non résolues appelées «Scattering Bars». Ces SB⁸ sont des lignes non résolues ajoutées aux lignes isolées sur le réticule pour améliorer le contraste de l'image dans le but d'augmenter les performances photo-lithographiques comme la DOF ou la latitude en énergie. Elles vont servir de «leurres» au niveau de la lumière pour assimiler une ligne isolée à un réseau.

La figure 4.10 représente la profondeur de champ d'un motif en fonction de la distance séparant les lignes non résolues et la ligne principale. L'éloignement des lignes non résolues est donc un élément critique[97]. Il en résulte que si nous souhaitons obtenir un motif sensible au focus, donc contraire au comportement des motifs utilisés en production, il suffit de placer les lignes non résolues de telle sorte que la profondeur de champ soit la plus faible possible. Pour déterminer le placement de ces lignes non résolues, nous avons simulé, à l'aide du logiciel EM-Suite[©] de la société Panoramic, la profondeur de champ du motif en fonction de l'éloignement des lignes non résolues.

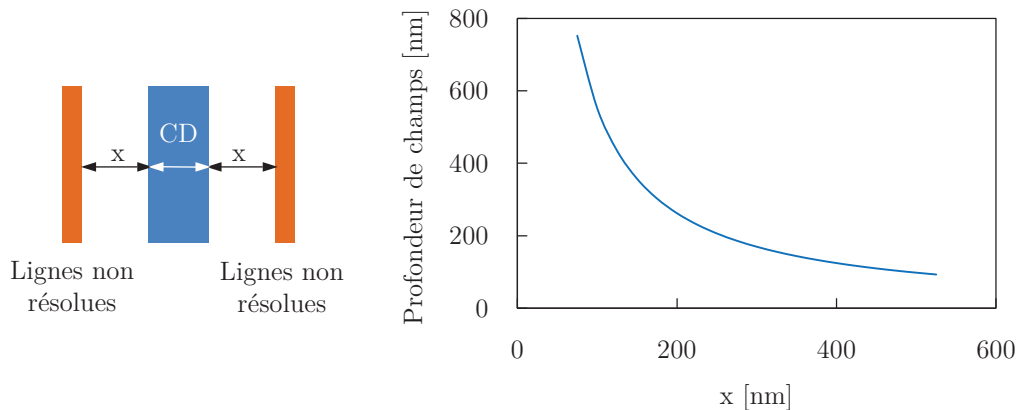


Figure 4.10 – Impact du positionnement des lignes non résolues sur la profondeur de champ pour un CD de 50nm et une ouverture numérique de 1.15.

4.3.5.2 Présentation du motif PMG

Des photo-lithographes d'IBM⁹ ont développé un motif PMG¹⁰ en utilisant des lignes non résolues placées de telles sortes que les ordres -2 et $+2$ soient nuls[98]. Ce motif est représenté sur la figure 4.11.

En production, on cherche à obtenir la plus grande fenêtre de procédé. Pour cela,

8. Scattering Bars / Lignes non Résolues

9. International Business Machine

10. Process Monitor Grating / Réseau de Suivi des Procédés

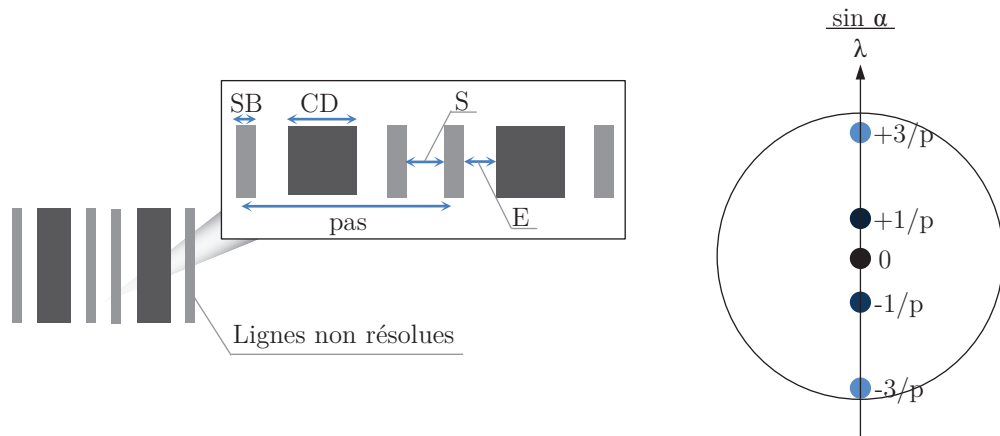


Figure 4.11 – Représentation du motif PMG. Sur la figure de droite, les ordres -2 et $+2$ sont à 0 .

les lignes non résolues sont placées au plus proche de la ligne centrale afin de réaliser un réseau dense.

Le motif PMG utilise ces lignes non résolues de manière strictement différente[99]. Ces lignes sont placées, au contraire, de telles sorte que la profondeur de champ du motif soit la plus faible possible. Le motif sera alors sensible au focus. La figure 4.12 illustre la différence existante entre un motif périodique classique, un motif de production utilisant des lignes non résolues et le motif PMG.

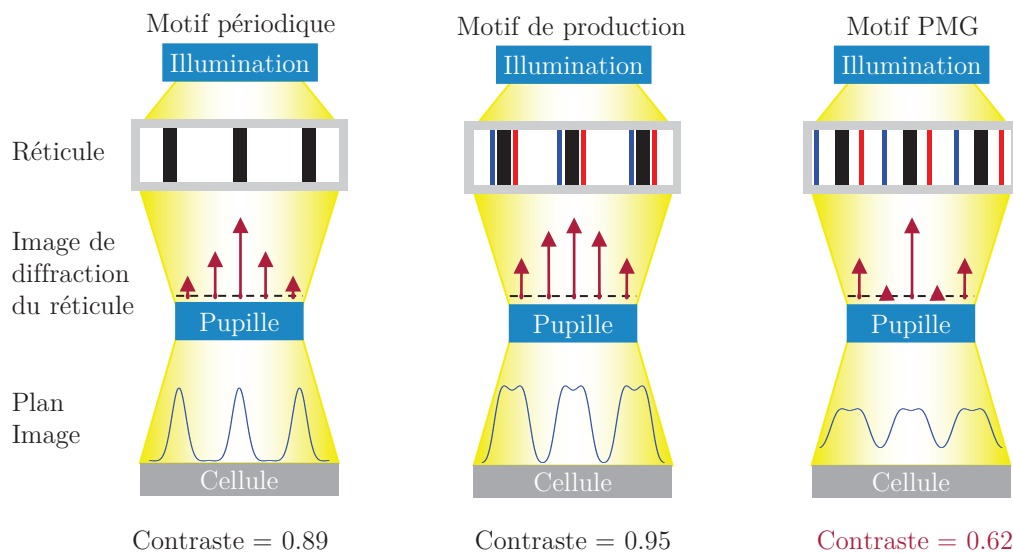


Figure 4.12 – Représentation de l'image formée par un motif périodique, un motif de production et le motif PMG. Le motif PMG présente le contraste le plus faible.

Le tableau 4.1 représente les dimensions des mires PMG implantés sur les niveaux active et grille du C045.

Nom du motif PMG	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
CD [nm]	30	60	80	110	170	42	70	104	190	232
SB [nm]	10	20	30	20	20	21	39	40	23	27
E [nm]	60	40	30	20	40	70	52	37	32	50
S [nm]	80	80	85	100	135	101	106	109	138	179
Pas [nm]	380	380	380	380	380	500	500	500	500	500

Tableau 4.1 – Dimensions des mires PMG.

Le motif idéal pour la décorrélation dose/focus est un motif très sensible au focus. Par conséquent, il est impératif de choisir un motif avec une profondeur de champ la plus faible possible. La figure 4.13 représente les profondeurs de champs des motifs D1 à D10 déterminées par simulation, par SEM et par scattérométrie. Nous avons évalué expérimentalement ces motifs que nous avons dessinés sur un réticule de test. Il est donc possible de vérifier nos simulations.

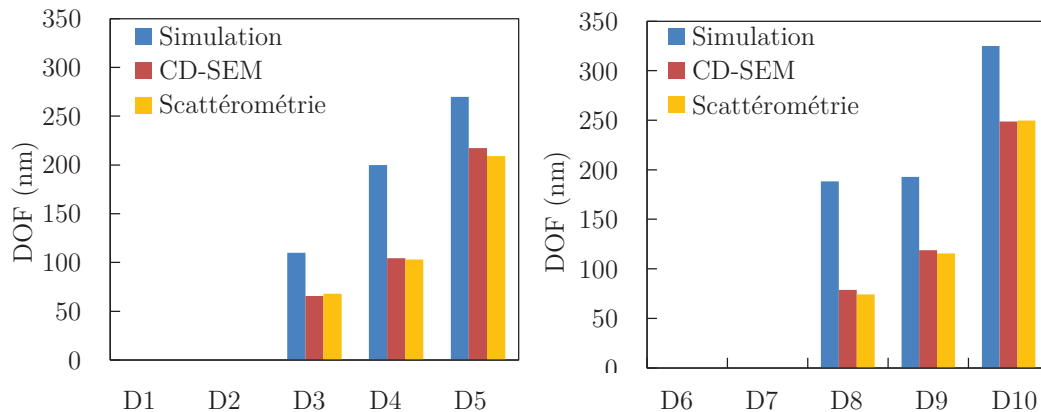


Figure 4.13 – Détermination de la profondeur de champs par simulation, par SEM et par scattérométrie des motifs D1 à D10. Résultats obtenus en technologie C040 et au niveau grille.

Il apparait clairement une différence entre la simulation et l'expérience. Cette différence vient du fait que nous avons simulé nos motifs avec une résine et une lentille parfaites. Certains motifs ont une profondeur de champ nulle. Ces motifs n'ont tout simplement pas été résolus lors de l'exposition. Les motifs s'impriment en fonction des conditions d'illumination propre à un niveau et à une technologie. Dès lors, on comprend dès maintenant qu'il faudra choisir un motif en fonction de la technologie et du niveau. Par exemple, le motif D2 avait une profondeur de champ non nulle en C045. En C040, ce n'est pas le cas. Le tableau 4.2, représente les résultats des

profondeurs de champ pour le niveau grille en C040.

Nom du motif PMG	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
Simulation	0	0	110	200	270	0	0	188	192	325
SEM [nm]	0	0	65	104	217	0	0	79	119	249
SCD [nm]	0	0	68	103	209	0	0	74	115	250

Tableau 4.2 – Profondeur de champs des motifs D1 à D10 par simulation, par SEM et par scattérométrie.

Par ce tableau, le motif le plus adéquat pour le niveau grille en C040 est le motif D3 car il possède une profondeur de champ la plus faible. On remarque cependant que la simulation ne correspond pas toujours à la réalité. Ceci s'explique par les aberrations de la lentille ou encore la planéité du réticule ou de la plaque. Ces mires sont toutes disponibles sur un réticule de test appelé NOVACD représenté sur la figure 4.14.

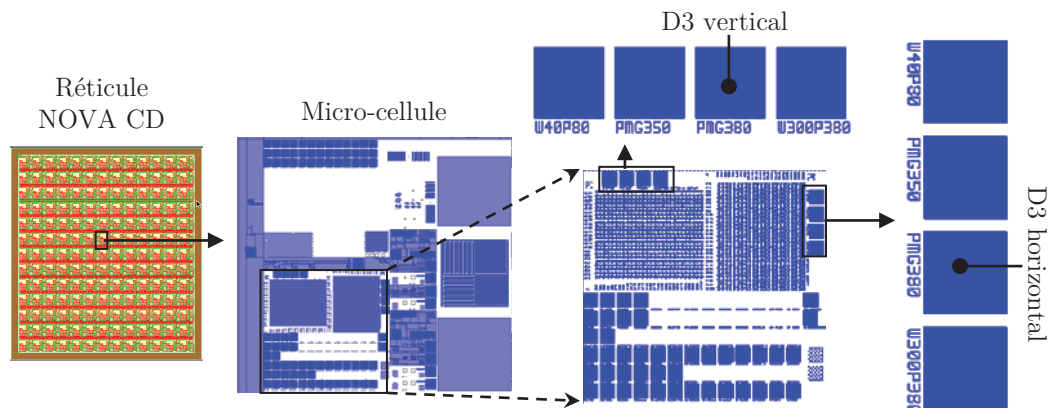


Figure 4.14 – Représentation du réticule NOVACD incorporant les mires D1 à D10 horizontales et verticales.

4.3.6 Optimisation des motifs pour la méthode FDO

Pour optimiser les motifs vus précédemment, on utilise des propriétés de la formation des images pour créer un motif idéal de décorrélation dose/focus.

4.3.6.1 Impact du focus sur les bouts de lignes

Considérons une ligne isolée avec une largeur proche de la résolution limite de l'équipement de photo-lithographie. Le but du procédé, est de garantir que cette ligne aura un CD en adéquation avec les spécifications. Cette ligne est considérée

comme étant uni-dimensionnelle, c'est-à-dire que la dimension importante, le CD, est mesurée perpendiculairement à cette ligne[100]. Cette considération ne tient pas compte du caractère bi-dimensionnel à la fin de la ligne. La figure 4.15 illustre le problème. Quand le procédé est ajusté pour donner un CD en spécification les bouts de lignes (LES¹¹) s'arrondissent.

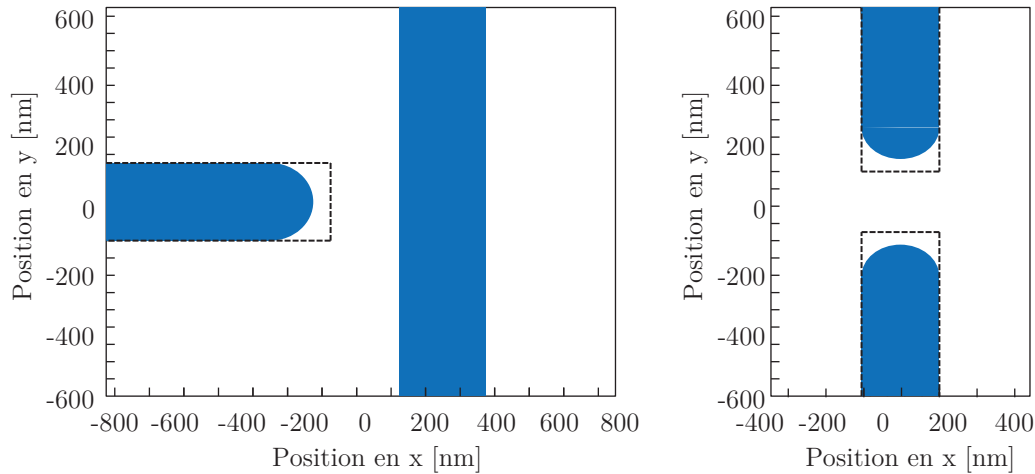


Figure 4.15 – Aperçu d'un motif de résine (en bleu) superposé sur le motif du réticule. La réduction des bouts lignes est causé par le focus.

Les variations du focus sur ces bouts de ligne impactent directement la forme tri-dimensionnelle[101]. Dans le cas d'une vue en coupe d'une ligne de résine, l'angle du motif de résine varie en fonction du focus. Par conséquent, les bouts de lignes sont plus sensibles au focus que les lignes elles-mêmes.

Cette propriétés sera mise à profit dans la création d'un motif extrêmement sensible au focus.

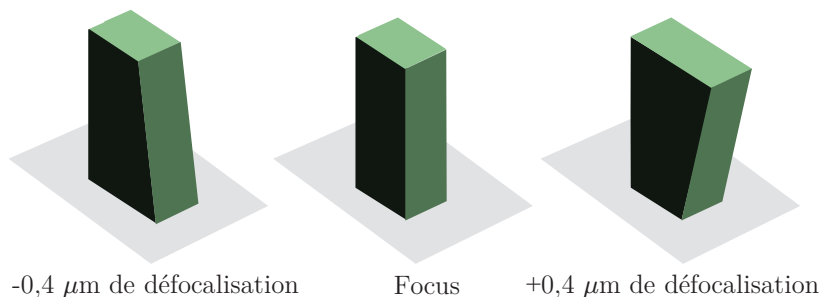


Figure 4.16 – Variations des bouts de ligne en fonction du focus. La pente de la résine dépend de la défocalisation.

11. Line End Shortening / Bout de Ligne

4.3.6.2 Utilisation des motifs diamants

Les motifs diamants utilise la technique des bouts de lignes développée dans la section précédente. La figure 4.17 représente le motif diamant pour un pas donné.

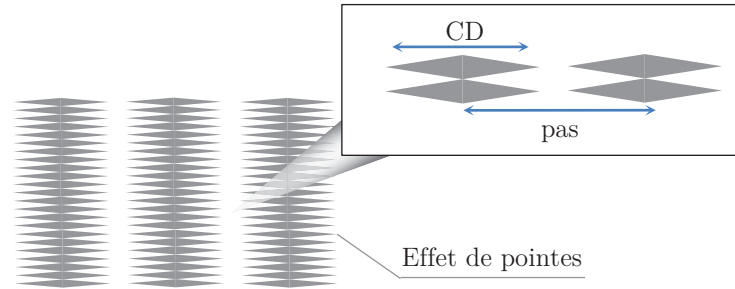


Figure 4.17 – Schématisation des motifs diamants utilisés pour déterminer le focus. Ce motif, une fois exposé, présente une forte contamination.

Ce motif est très intéressant pour la décorrélation dose/focus car ce motif est très sensible au focus. Cependant, les pointes, qui caractérisent ce motif, ont tendance à se détacher et à créer de la contamination. Par conséquent, ce motif ne peut pas être utilisé sur plaque de production.

4.3.6.3 Utilisation de motifs asymétriques

Les mires asymétriques représentées sur la figure 4.18 ont été développées par IBM[102].

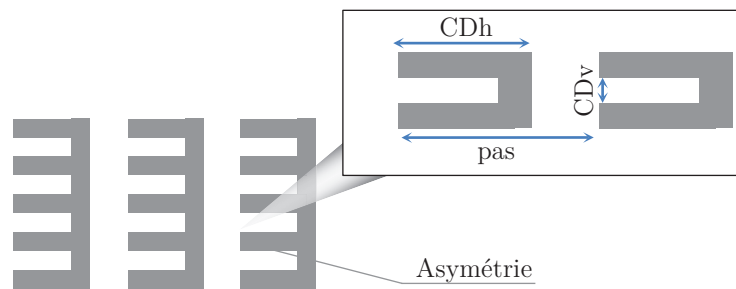


Figure 4.18 – Représentation des mires asymétriques développées par IBM. Ces mires peuvent être mesurées en utilisant l'outil métrologique Yieldstar[®] S-200.

Ce motif dissymétrise l'image aérienne lors de l'insolation de cette mire[103]. Par conséquent, cette mire permet de créer un profil de résine asymétrique c'est-à-dire que l'angle inférieur gauche de la résine est différent de l'angle inférieur droit. Le concept de cette mire est représentée sur la figure 4.19.

Cette technique permet de s'affranchir de l'impact des niveaux inférieurs de la

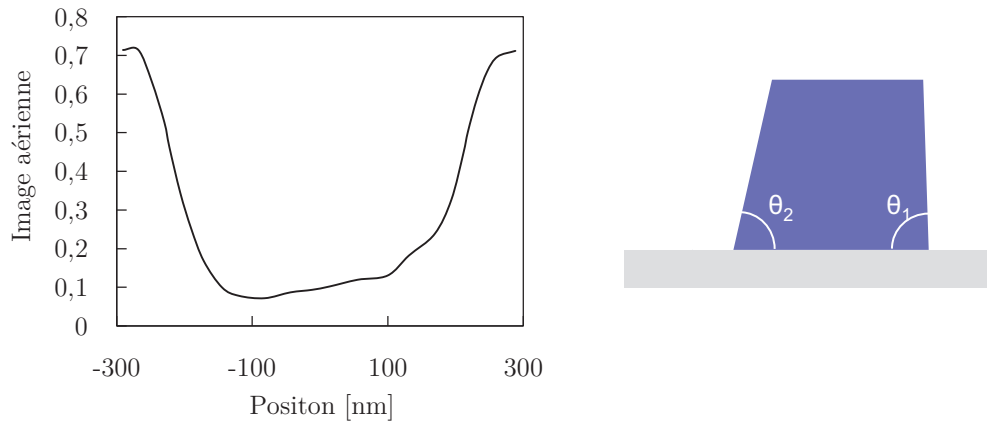


Figure 4.19 – Représentation de l'image aérienne de la mire asymétrique et de son profil de résine associé.

plaque lors de la création de librairie scattérométrique. En effet, la complexité des modèles de scattérométrie augmente en fonction des couches déposées sur la plaque. La variation des indices de ces couches génère une erreur sur le spectre récolté lors de la création des modèles. Par conséquent, les mesures effectuées par l'outil métrologique sont impactées par ces différentes couches. Pour mesurer ces 2 angles, IBM s'est muni d'un tout nouvel outil, la Yieldstar[®] S-200, capable de les déterminer. Malheureusement, STMicroelectronics ne possède pas actuellement cet outil.

4.3.6.4 Génération de motifs à profil asymétriques dans la résine

La génération de motifs à profil asymétriques dans la résine a été développée chez STMicroelectronics pour mesurer les pentes de la résine du motif sans utiliser l'outil Yieldstar[®] S-200. Le principe, représenté sur la figure 4.20, est de créer 3 motifs. Le premier possède une dissymétrie à gauche, le deuxième ne possède pas de dissymétrie et le troisième possède une dissymétrie à droite.

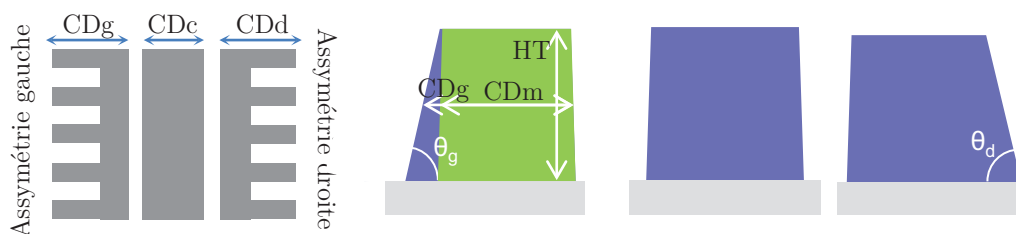


Figure 4.20 – Représentation de la génération de motifs à profil asymétriques dans la résine.

Pour déterminer la mesure de l'angle inférieur gauche, il suffit de soustraire la mesure du CD de gauche à la mesure du CD de droite comme le montre les équations 4.12 et 4.13 :

$$\tan\theta_g = \frac{HT}{2(CD_g - CD_m)} \quad (4.12)$$

$$\tan\theta_d = \frac{HT}{2(CD_d - CD_m)} \quad (4.13)$$

avec, CD_g le CD du motif de gauche, CD_m , le CD du motif du milieu, CD_d le CD du motif de droite, θ_g , l'angle inférieur gauche de la résine et θ_d l'angle inférieur droit de la résine. Cette méthode n'a pas été expérimentée faute de temps mais présente cependant des avantages considérables.

4.3.6.5 Utilisation du pas interdit

Lorsque que l'on essaie d'imprimer des réseaux de pas denses à relâchés, on s'aperçoit que la profondeur de champ la plus faible est obtenue pour un pas de réseau intermédiaire. La figure 4.21 illustre ce phénomène pour des réseaux de lignes de $80nm$ de largeur sur le réticule (sans tenir compte du facteur de réduction = à 4), de pas variant de 300 à $1500nm$ sous les conditions d'illumination suivantes : $NA = 0.8$, illumination quadripolaire : $\sigma_{in} = 0,55$, $\sigma_{out} = 0,85$. La profondeur de champ minimale est atteinte pour des pas intermédiaires de l'ordre de 500 à $600nm$. Ces pas sont couramment appelés «pas interdits» car ce sont ceux pour lesquels la fenêtre de procédé est la plus faible[104].

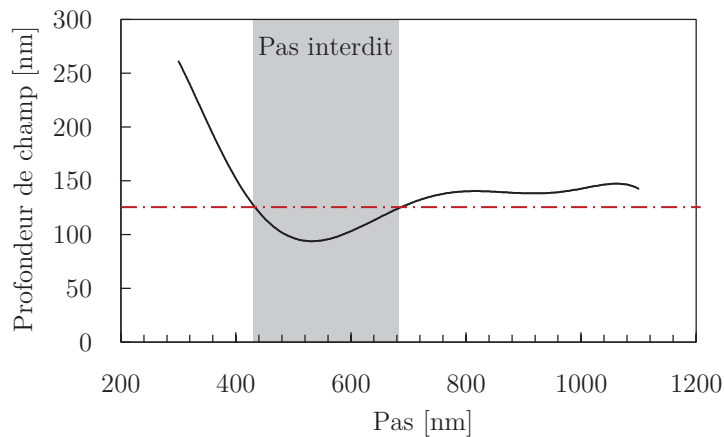


Figure 4.21 – Définition de la zone de pas interdit. Cette zone est définie pour la profondeur de champ la plus faible.

Ce phénomène est attribué au fait que pour ces pas particuliers, les ordres ± 1 de la figure de diffraction se superposent au centre de la pupille. Alors, dans ce cas-là, les

interactions entre les ordres sont asymétriques par rapport à l'axe optique et ainsi, la profondeur de champ est réduite[105]. L'asymétrie entre les interactions induit également une perte de contraste et de résolution lors de la reconstitution de l'image à cause de la différence de chemin optique entre les ordres se recombinaut deux-à-deux. Pour cette raison, la largeur d'une ligne imprimée aux conditions nominales du procédé varie en fonction du pas de réseau.

Cette propriété sera utilisé dans le chapitre suivant.

4.3.6.6 Présentation du motif Focus Dose Pattern

Le motif FDP¹², représenté sur la figure 4.22 est un motif construit à partir de phénomènes physiques propre au focus. En effet, il réunit plusieurs techniques qui dégradent l'image en fonction du focus[72]. Comme le motif PMG, le motif FDP utilise des lignes non résolues pour dégrader le contraste. On ajoute aussi des bout lignes qui sont extrêmement sensible au focus comme nous l'avons démontré dans la section 4.3.6.1. Enfin, ce motif utilise la notion de pas interdit qui est fonction de la technologie et du niveau.

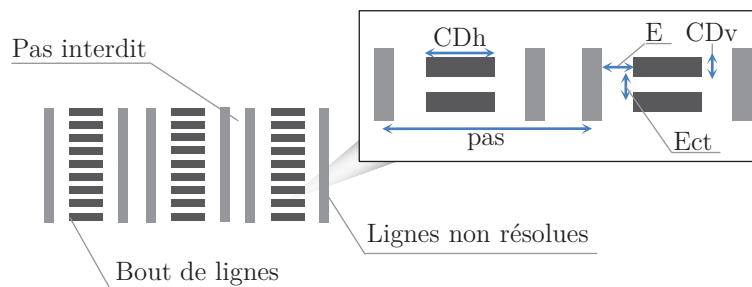


Figure 4.22 – Création du motif FDP. Ce motif utilise les lignes non résolues, les bouts de lignes et la technique du pas interdit.

4.3.6.7 Sélection du motif de décorrélation dose/focus

Parmi les motifs présentés, nous avons étudié les courbes de Bossung et les profondeurs de champs des 4 motifs les plus pertinents à savoir :

- Motif périodique.
- Motif isolé.
- Motif PMG.
- Motif FDP.

12. Focus Dose Pattern / Motif Dose Focus

La figure 4.23 représente les courbes de Bossung pour les 4 motifs étudiés. Il apparaît clairement que le motif FDP est le plus sensible au focus avec une sensibilité déterminée à 0,1 près, c'est-à-dire qu'une variation de 1nm de focus induit une variation de 0,1nm sur le CD. La précision de la scattérométrie étant de 0,5nm sur le CD, le motif FDP permet donc de déterminer le focus à 5nm près.

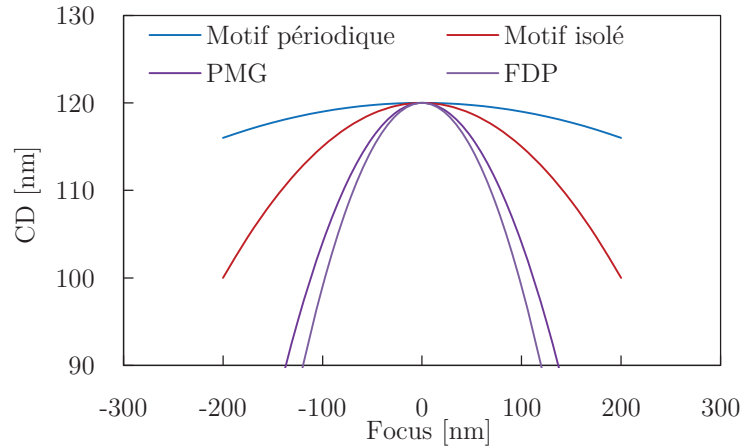


Figure 4.23 – Courbes de Bossung représentant la variation du CD pour les motifs de références, le motif PMG et le motif FDP en fonction du focus.

La détermination des focus pour les 4 motifs est représentée sur la figure 4.24. En prenant en compte la précision de l'outil métrologique, on remarque donc que le focus ne dépend pas du motif utilisé.

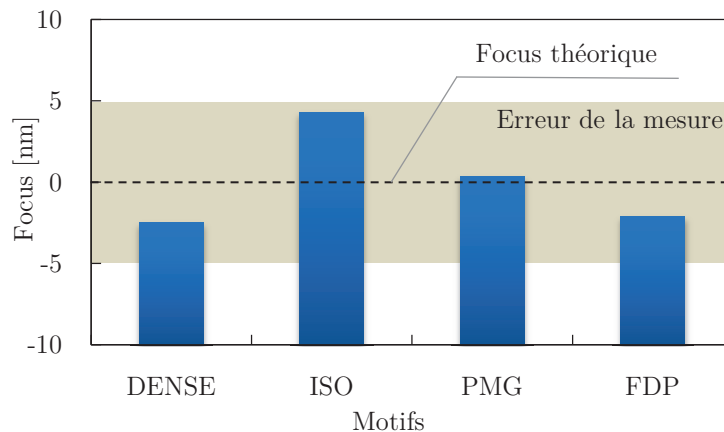


Figure 4.24 – Détermination du focus pour les 4 motifs. La valeur du focus ne dépend pas de la géométrie du motif sur réticule.

Seules, la sensibilité et la profondeur de champ dépendent du motif utilisé. La figure 4.25 représente la profondeur de champ et la sensibilité de chaque motif.

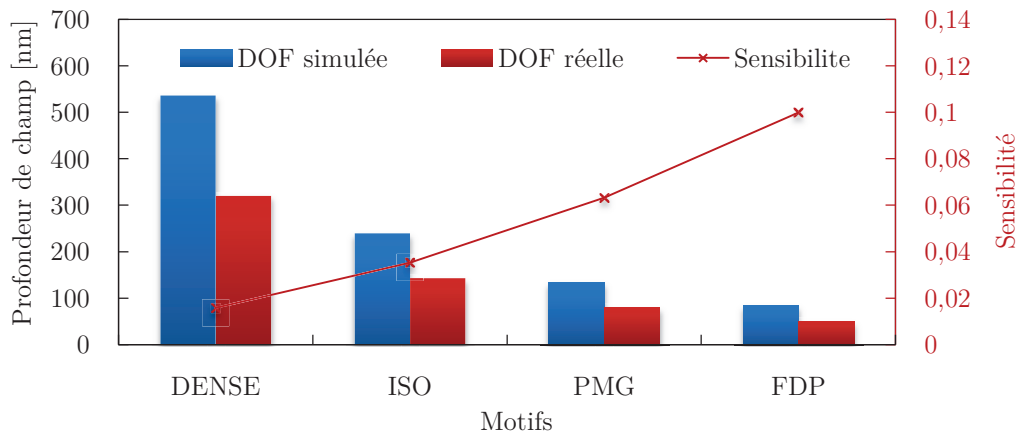


Figure 4.25 – Représentation de la profondeur de champ et de la sensibilité des motifs étudiés.

Comme on peut le constater, le motif FDP présente la profondeur de champ la plus faible et la sensibilité au focus la plus grande. Il est donc le candidat idéal pour la décorrélation dose/focus.

4.3.6.8 Limitation sur la création des motifs - Impact de la mesure

Pour créer la mire idéale, nous avons donc utilisé le motif FDP couplé avec un pas grand pour se rapprocher d'un motif isolé. En effet, nous avons démontré lors de tests expérimentaux qu'un motif isolé est 5 fois plus sensible qu'un motif dense. Le premier motif FDP expérimenté possédait un pas de $1,4\mu m$ soit, 7 fois le CD. Par simulation, ce motif présente une excellente sensibilité avec une erreur sur le focus de l'ordre de $3nm$. Pour vérifier ce résultat, nous avons réaliser une FEM sur une plaque de silicium nu et sur une plaque de production. Le but est de retrouver les valeurs du focus en utilisant la méthode de décorrélation présentée dans le chapitre 3. La variation du focus étant strictement la même sur celles-ci, nous nous attendions à retrouver une signature identique sur les 2 plaques. La figure 4.26 montre une incohérence entre les mesures sur silicium et les mesures sur niveau. En effet, les signatures présentes sur les 2 plaques sont différentes.

Pour expliquer ce phénomène, il est important d'étudier les caractéristiques des équipements de mesure. L'équipementier préconise un minimum de 150 lignes dans une mire scattérométrique pour obtenir une précision de l'ordre de $1nm$ sur le CD[106]. Les bibliothèques scattérométriques étant plus complexe à créer sur niveau, il est impératif de respecter les spécifications de l'équipementier pour obtenir des mesures fiable. Avec un pas de $1,4\mu m$ la mire FDP comptait 35 lignes seulement. La mesure sur le niveau grille est donc faussée en raison du peu de ligne que compte

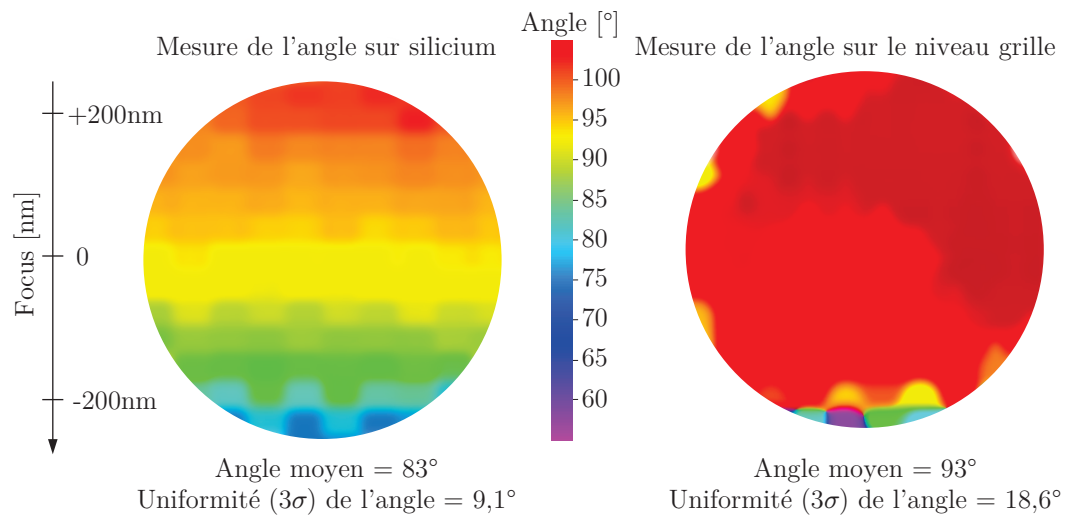


Figure 4.26 – Représentation de l'angle inférieur de la résine du motif FDP sur silicium et sur le niveau grille. Les mesures ont été réalisées sur l'outil scattérométrique Q-SCD.

la mire.

Sur un autre outil scattérométrique, nous obtenons les résultats représentés sur la figure 4.27

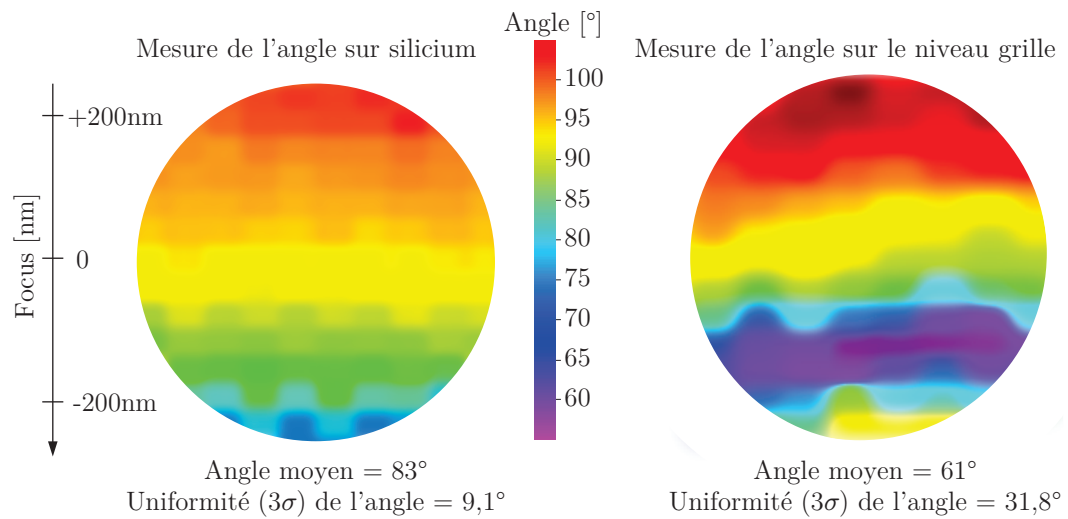


Figure 4.27 – Représentation de l'angle inférieur de la résine du motif FDP sur silicium et sur le niveau grille. Les mesures ont été réalisées sur l'outil scattérométrique Yieldstar®.

La signature intra-plaque sur niveau grille correspond à la signature intra-plaque sur silicium. Cependant, la variabilité de l'angle du motif sur niveau grille est 3,5 fois plus importante que la variabilité de l'angle du motif sur silicium. Les couches présentes sur le niveau grille induisent une variabilité supplémentaire sur l'angle

inférieur de la résine.

4.3.6.9 Optimisation de la métrologie

La création d'une mire est une technique délicate. En effet, outre la simulation, il faut impérativement tenir compte des procédés et des outils de métrologie. Concernant les outils de métrologie, ceux-ci possèdent des limites quant aux nombres de lignes ou de densité. La figure 4.28 présente un nouveau concept de création de mire.

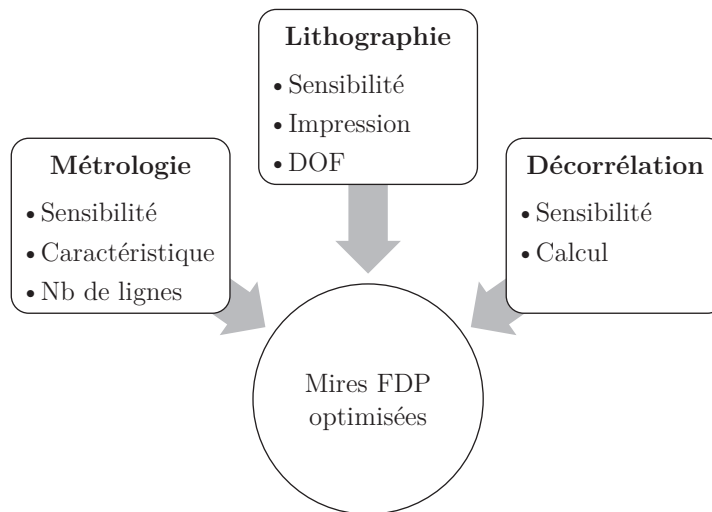


Figure 4.28 – Concept de création de mire scattérométrique en prenant en compte les spécificités des outils et des calculs.

En utilisant ce concept, nous avons créé une mire spécifique à l'atelier patterning c'est-à-dire en tenant compte des références des équipements de la salle blanche. Le tableau 4.3 représente les dimensions des mires FDP implantés sur 50% des niveaux de la technologie C028.

C028	ACTI	GATE	CNT	LIN	VIA
CDh [nm]	120	120	140	165	140
CDv [nm]	40	40	30	55	30
Ect [nm]	20	20	20	20	20
Pas [nm]	300	300	260	300	260
E [nm]	180	180	120	135	120
Rapport	0,4	0,4	0,54	0,55	0,54
Nombre de lignes	133	133	133	133	133

Tableau 4.3 – Dimension des mires FDP pour les 5 niveaux de production en technologie C028.

Ces mires ont été implantées sur les réticules C028. Le positionnement de ces mires est crucial pour déterminer les effets intra-champ. La figure 4.29 représente

les 2 réticules «active» et «grille» incorporant les motifs FDP.

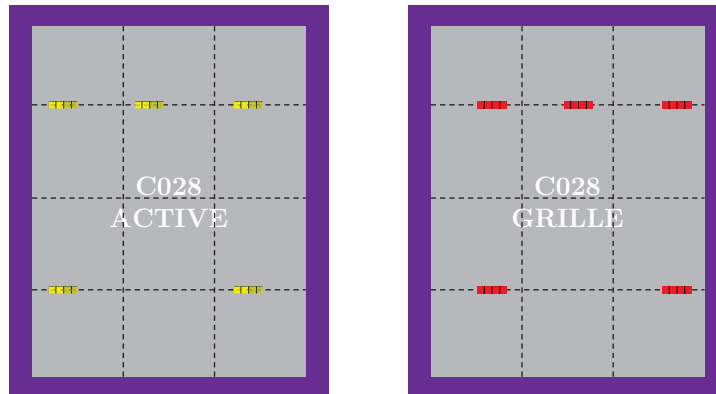


Figure 4.29 – Exemple d’implantation des mires FDP sur les réticules C028 active et grille. Ces réticules ont été utilisés pour déterminer la dose et le focus sur lot de production.

Les résultats expérimentaux seront présentés dans le chapitre 7.

4.4 Conclusion

Jusqu’à présent, nous nous sommes intéressés à la formation des images aériennes ce qui nous a conduit à développer des moyens de l’optimiser pour obtenir une image aux propriétés conformes à celle que l’on cherche à obtenir. Dans la résine, les motifs que l’on désire réaliser doivent être les plus verticaux possibles pour permettre la définition nette des zones destinées aux étapes post-photo-lithographiques, comme la gravure ou l’implantation ionique, et celles qui doivent être protégées par la résine. Cette verticalité dépend essentiellement du focus du scanner. Dans ce cadre, nous allons étudier, dans le chapitre suivant, la précision et la méthode de définition du focus dans l’outil de photo-lithographie.

Chapitre 5

De la théorie à la pratique : Application au scanner

5.1 Introduction

Dans le chapitre 1, nous avons présenté l'outil de photo-lithographie de manière générale. Dans ce chapitre, le scanner Twinscan[®] d'ASML sera présenté en détail. Nous nous intéresserons plus particulièrement à la détermination de la dose et du focus par l'outil. Nous présenterons également les procédures de calibration des paramètres et nous détaillerons les systèmes capables de déterminer avec précision la dose et le focus.

5.2 Présentation du système Twinscan[®]

Les Twinscan[®] de la société ASML[107] représentés sur la figure 5.1 sont des scanners de type step-and-scan[108]. Ils sont composés de 2 parties bien distinctes :

- Une partie métrologie qui assure les mesures de tous les points clés comme l'alignement ou encore la topologie de la plaque.
- Une partie exposition qui insole les cellules.

L'image du réticule est réalisée en projetant une section rectangulaire du réticule sur la plaque au travers de l'objectif. L'image totale est obtenue en déplaçant le réticule et le support de la plaque dans des directions opposées à une vitesse $v_{Balayage}$ alors que la lentille et l'illuminateur sont fixes. Dans un premier temps, une cartographie de la plaque est déterminée. Ces données cartographique permettront de compenser les erreurs de topologie et de projeter l'image au focus lors de l'exposition. Parallèlement, il existe un système d'alignement qui garantit une superposition

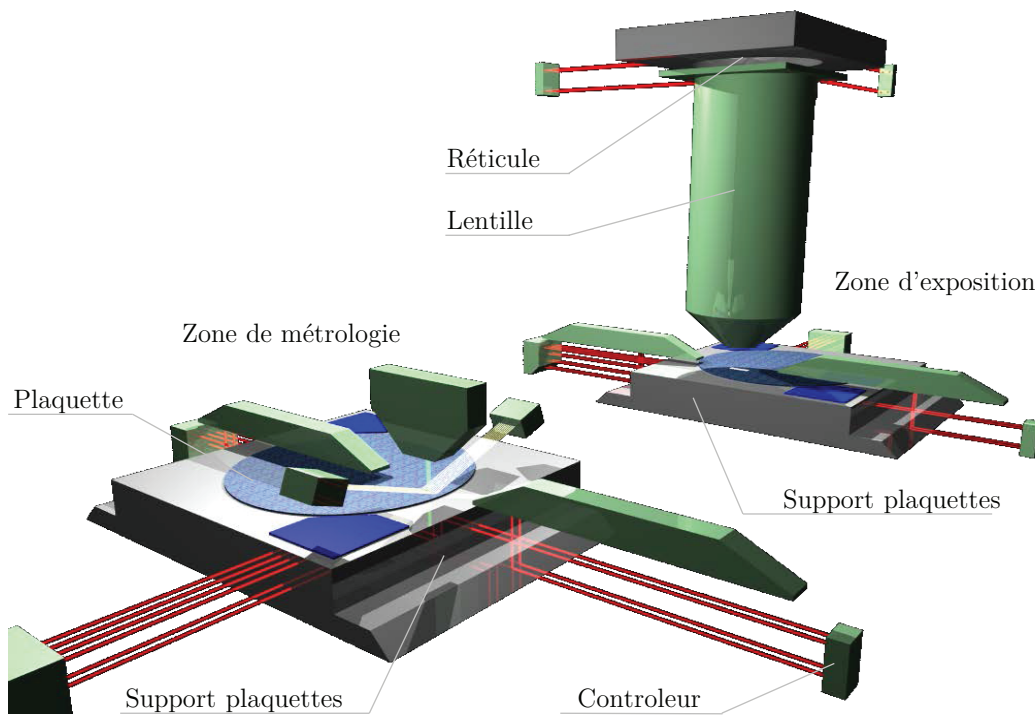


Figure 5.1 – Représentation schématique d'un système *Twinscan*[®] de la société ASML. Le système est composé de 2 supports de plaques bien distincts.

optimales des niveaux[109]. Ce système ne sera pas décrit dans ce manuscrit.

5.2.1 Séquence d'une plaque dans le système Twinscan

Lorsque la plaque est recouverte de résine, celle-ci est placée sur un support de plaque. A ce moment, la position de la plaque est «grossièrement» connue. Avant d'effectuer des mesures précises, la position du support doit être calibré au zéro de référence. Lorsque cette étape est terminée, une cartographie tri-dimensionnelle de la topologie de la plaque est effectuée. Cette information est utilisée pendant la correction relative au plan focal de la lentille lors de l'exposition de la plaque. Ensuite, une grille d'alignement est définie afin de déterminer au mieux le placement du niveau par rapport au niveau précédent. Une fois les étapes d'image et de mesure d'alignement terminées, le support se déplace vers le module d'exposition. Le support est de nouveau initialisé et l'exposition tient compte des données récoltées par le module de métrologie dont, en ce qui nous concerne, la planéité de la plaque. Pendant que les supports des plaques se déplacent, d'autres activités sont exécutées en parallèle dans le but d'optimiser le débit des plaques[110]. La séquence d'une plaque représente toutes les étapes qu'une plaque subit pendant l'étape de photo-lithographie.

Cette séquence est représentée sur la figure 5.2

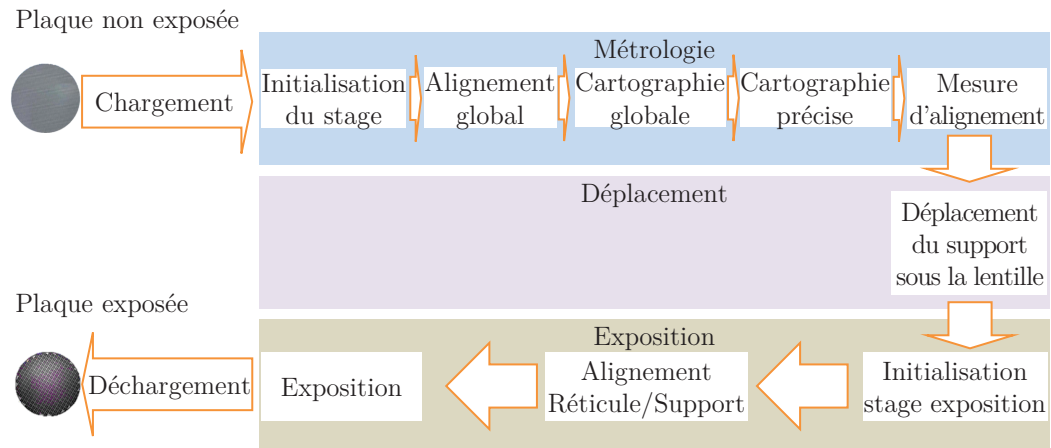


Figure 5.2 – Séquence d'une plaque lors de l'exposition dans l'équipement de photo-lithographie.

5.2.2 Présentation de la zone de métrologie d'un Twinscan®

La zone de métrologie, représentée sur la figure 5.3, est composée d'un capteur d'alignement, d'un capteur de niveau et d'un capteur d'image de transmission[111]. Cette zone doit garantir d'une part l'alignement entre deux niveaux et d'autre part une mesure précise de la topologie de la plaque. Dans cette partie, seul cet aspect est considéré. Avant toutes mesures, le scanner doit s'assurer que le support de la plaque est parfaitement perpendiculaire à l'axe optique. La zone de métrologie permet donc de réaliser l'assiette du support de la plaque. Le plan de référence de la mesure MRP¹ est alors réalisé[112]. Ce plan est référencé sous z_{MRP} .

5.2.3 Présentation de la zone d'exposition d'un Twinscan®

Après le déplacement du support, la plaque se retrouve sous la lentille pour l'exposition. Une assiette est de nouveau réalisée afin de garantir une bonne planéité du support des plaques dans la zone d'exposition[113]. Le FRP² est alors déterminé. Cette valeur est référencé sous z_{FRP} . La plaque est alors exposée en tenant compte des différentes mesures de topologie réalisées lors de la séquence métrologique. La zone d'exposition est représentée sur la figure 5.4.

1. Measurement Reference Plane / Plan de Référence de la Mesure

2. Focus Reference Plane / Plan de Référence du Focus

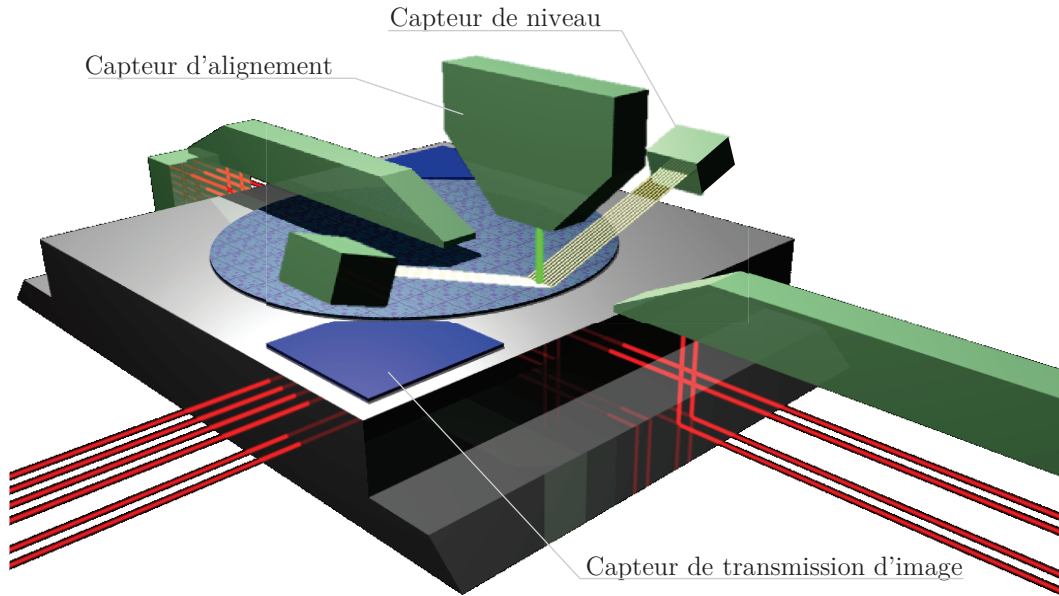


Figure 5.3 – Schématisation de la zone de métrologie permettant de déterminer l'assiette de la plaque.

5.3 Méthode de calibration des paramètres photo-lithographiques du scanner

Lors de l'installation d'un scanner, celui-ci doit être calibré dans le but d'optimiser les étapes de photo-lithographie. Pour optimiser les performances des machines de photo-lithographies, les fabricants de scanner ont mis en place des systèmes, électroniques, optiques et mécaniques, afin de réduire les dispersions des paramètres photo-lithographique et d'améliorer le centrage de ceux-ci[114]. Cependant, les performances du système peuvent dériver et entraîner un décentrage du focus et/ou de la dose. Pour continuellement centrer le focus et la dose dans la fenêtre des procédés il devient nécessaire de suivre le plan focal et l'énergie. Ces suivis sont réalisés sur chacun des scanners. Des tests sont alors mis en place, permettant de connaître le focus et la dose d'exposition des scanners en chaque point de la cellule et, à chaque instant.

Ces tests, utilisant différents éléments qui permettent au scanner de calibrer les paramètres photo-lithographique, sont décrit avec précision dans la section suivant.

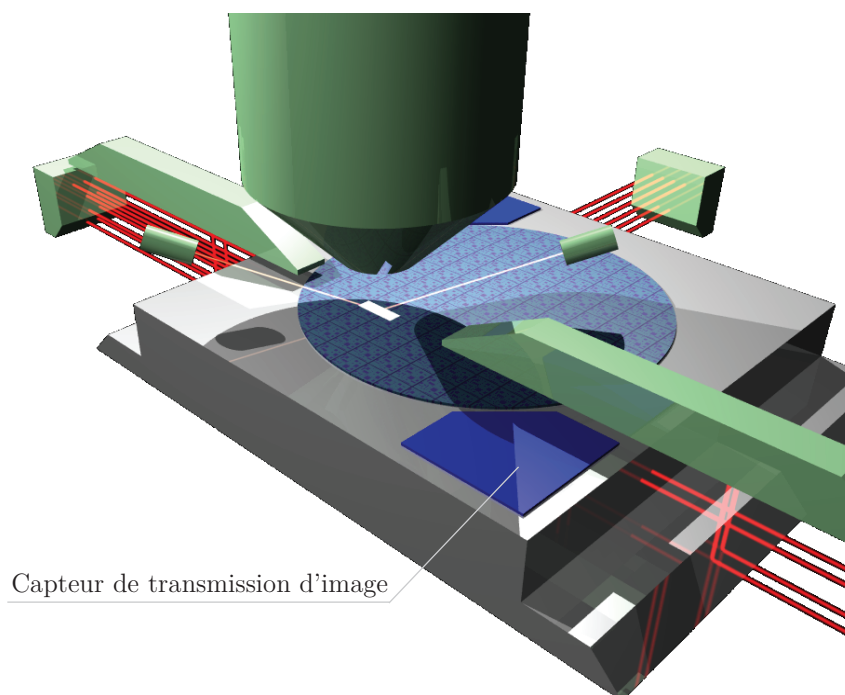


Figure 5.4 – Schématisation de la zone d'exposition. Le support de la plaque se trouve sous la lentille d'exposition.

5.4 Méthode de calibration de la dose d'exposition d'un scanner

5.4.1 Description des capteurs d'énergie

Le système d'ajustement d'énergie est composé de 2 capteurs représentés sur la figure 5.5 [115].

La calibration de ces capteurs consiste à appliquer une dose d'énergie commune à l'ensemble du parc, à travers un unique réticule, dédié à cette tâche. Le personnel de production vérifie par la suite que la dimension critique des lignes de résine exposée reste dans les spécifications. Dans le cas d'un résultat où un fort écart est constaté, et confirmé par une seconde mesure, nous devons alors recalibrer l'intensité du laser à travers les facteurs de conversion d'un couple de capteurs intégrés à l'outil d'insolation : Capteur d'intensité et Capteur d'énergie. Nous allons tenter d'en expliquer le principe d'une façon sommaire. Le capteur d'énergie ES³ est situé en amont de la lentille de projection et du réticule. Il est en charge de mesurer l'intensité du laser durant l'insolation de la plaque. Grâce à ces mesures d'intensité,

3. Energy Sensor / Capteur d'Energie

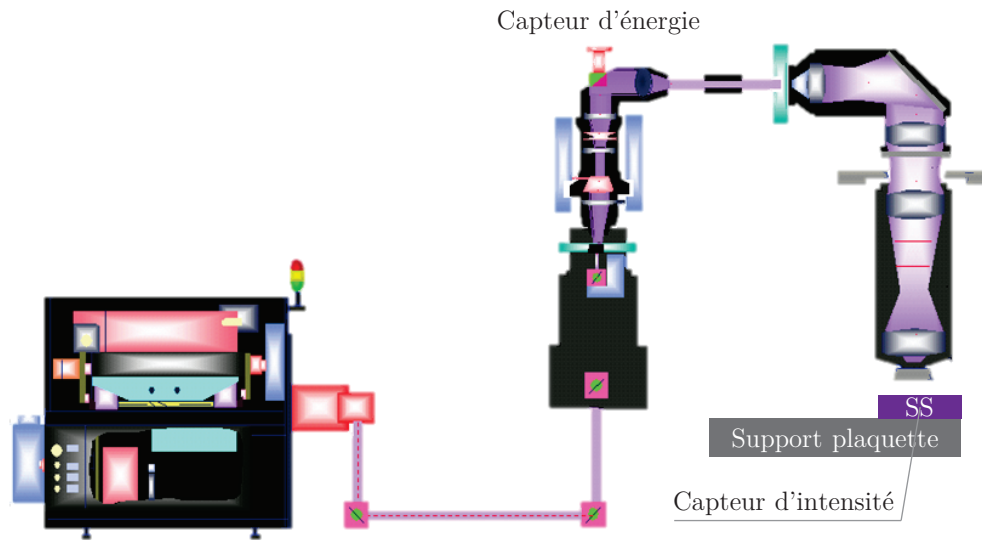


Figure 5.5 – Système d’ajustement de dose faisant intervenir le capteur d’intensité et le capteur d’énergie.

la dose d’énergie délivrée par le laser est asservie à la valeur souhaitée par une boucle de retour. C’est pour calibrer ce capteur, dont les mesures ne tiennent pas compte des phénomènes d’absorption qui ont lieu dans la lentille, que le capteur d’intensité SS⁴ prend tout son intérêt[116]. Ce dernier est en effet positionné sur le même support que la plaque. La calibration est réalisée hors ligne, et revient à ajuster le facteur de conversion du capteur ES de sorte que l’énergie déposée dans la résine corresponde à celle mesurée par le capteur SS.

5.5 Méthode de calibration du plan focal d’un scanner

La calibration du plan focal nécessite un système de mise au point extrêmement complexe. L’association de plusieurs éléments permet de définir le plan focal dans la résine. Dans les sections suivantes, nous allons décrire la séquence de mise au point dans l’équipement de photo-lithographie.

5.5.1 Définition de la référence mécanique du focus

Le capteur de transmission d’image TIS⁵ représenté sur la figure 5.6 est un ensemble comprenant un composant optique et une série de réseaux qui peut mesurer la position de l’image aérienne et l’alignement du réticule dans la zone de métrologie

4. Spot Sensor / Capteur d’Intensité

5. Transmission Image Sensor / Capteur de Transmission d’Image

et dans la zone d'exposition[117]. Chaque support de plaque possède 2 TIS et chaque TIS possède 2 marques d'alignement pour le réticule.

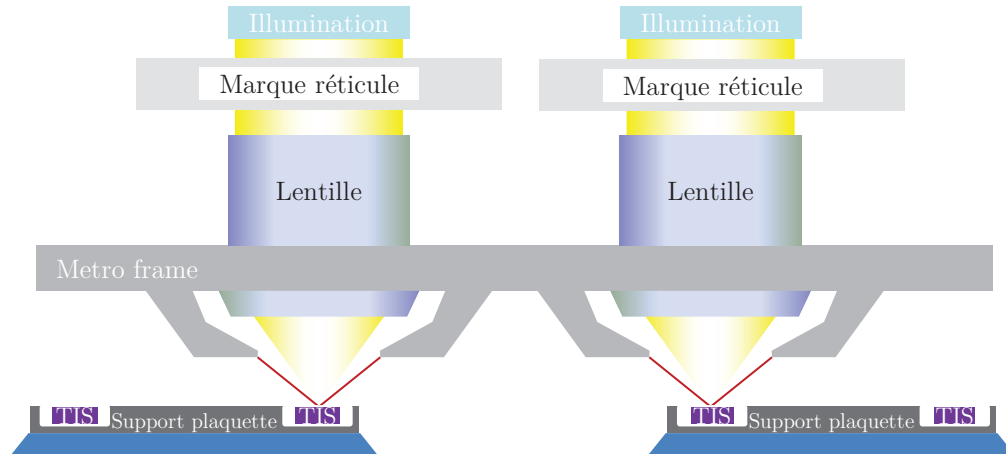


Figure 5.6 – Détermination de la référence mécanique du focus en utilisant les capteurs de transmission d'image des supports des plaques.

Pour déterminer l'image aérienne, la lumière est transmise à travers les marques TIS du support réticule et est détectée par les capteurs TIS disposés sur le support de la plaque. En balayant l'axe optique z , le capteur TIS détermine la position en z_{TIS} du support de la plaque pour laquelle l'intensité lumineuse est la plus importante[118]. La référence mécanique du focus est alors connue. A partir de ces résultats, le plan de l'image aérienne FRP est connue.

5.5.2 Définition de la référence focale dans la résine

Le test FOCAL⁶ est un test interne à l'équipement et ne fait appel à aucun traitement et mesure extérieure. Il est utilisé pour le suivi et le contrôle du système de mise au point du scanner[119]. L'objectif principal de ce test est de déterminer le plan focal de l'image dans la résine.

C'est la référence absolue de l'équipement.

Le test FOCAL est réalisé dans les situations suivantes :

- Pour calibrer une nouvelle machine.
- Après une opération de maintenance sur l'équipement.
- Pour un suivi et un contrôle du focus.
- Pour diagnostiquer un problème de focus.

A STMicroelectronics, ce test est appliqué généralement tous les 6 mois pour s'assurer que le système n'a pas trop dérivé de sa valeur de consigne. L'inconvénient

6. FOCus Calibration by using ALignment / Détermination du Focus par Mesure d'Alignement

majeur de ce test est qu'il nécessite l'arrêt total du cluster privant ainsi la production de l'équipement.

5.5.2.1 Déroulement de la calibration du test

Le test FOCAL est basé sur l'évolution d'une différence d'alignement en fonction du focus. Le system d'alignement du scanner permet de mesurer l'écart entre 2 marques d'alignement et de le transformer en écart de focus[120]. Un réticule spécifique comportant 19×13 marques d'alignement est nécessaire pour réaliser le test. La marque standard est composé d'un bloc puis de lignes et d'espaces proche de la résolution critique théorique de l'équipement. Ce réticule est exposé sur une plaque de silicium vierge et recouverte d'une résine qui est toujours la même. Pour imprimer la marque correctement, il faut donc se placer dans les conditions de focus optimales. En effet, dans ces conditions, la marque sera parfaitement reproduite sur la plaque et il sera alors possible de mesurer la différence d'alignement entre le bloc, et les lignes. Cette différence d'alignement est fonction du focus, et la valeur du focus, sera définie pour une différence d'alignement maximale.

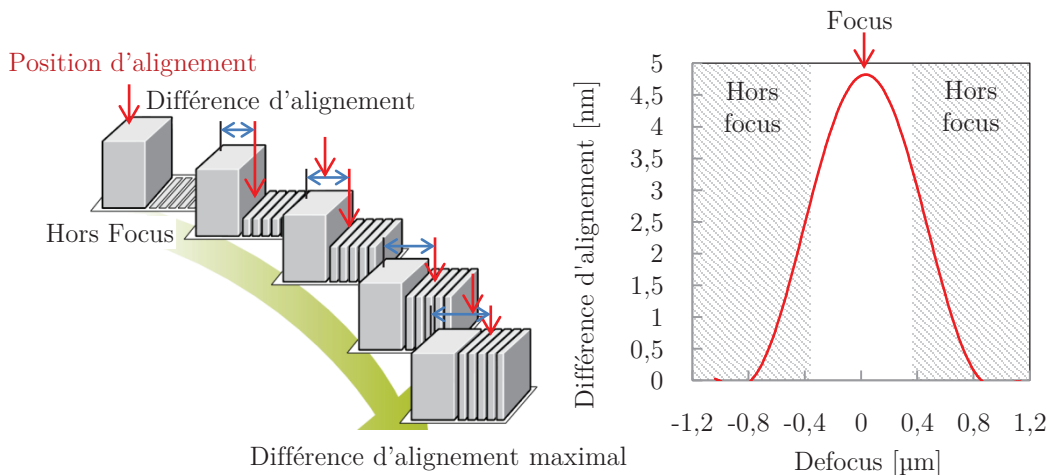


Figure 5.7 – Principe du test focal. Le focus est déterminé pour un écart d'alignement maximal entre le bloc et les lignes.

Ce focus est défini comme étant le zéro de l'équipement pour un type et une épaisseur de résine, un procédé, un réticule et des conditions d'exposition[121]. Cette valeur est référencé sous z_{FOCAL} . Il s'agit bien d'une référence car le résultat de la mesure de z_{FOCAL} n'est pas appliqué. Cependant, en fonction de l'état d'avancement du circuit intégré, il sera nécessaire d'appliquer une compensation en focus par rapport au focus référence, pour compenser l'effet de la hauteur des couches

inférieures.

5.5.3 Définition du focus en tout point de la plaque

Lors de la fabrication des circuits intégrés, des couches de différents matériaux, caractérisés par leurs indices et par leurs topographies, sont déposées sur les plaques de silicium. Le capteur de niveau LS⁷, représenté sur la figure 5.8, est un système permettant de déterminer la topographie globale de la plaque. Ce système est composé d'une optique de projection et d'une optique de détection qui sont capable de mesurer, à l'aide d'un module d'acquisition de données, la topographie de la plaque[122].

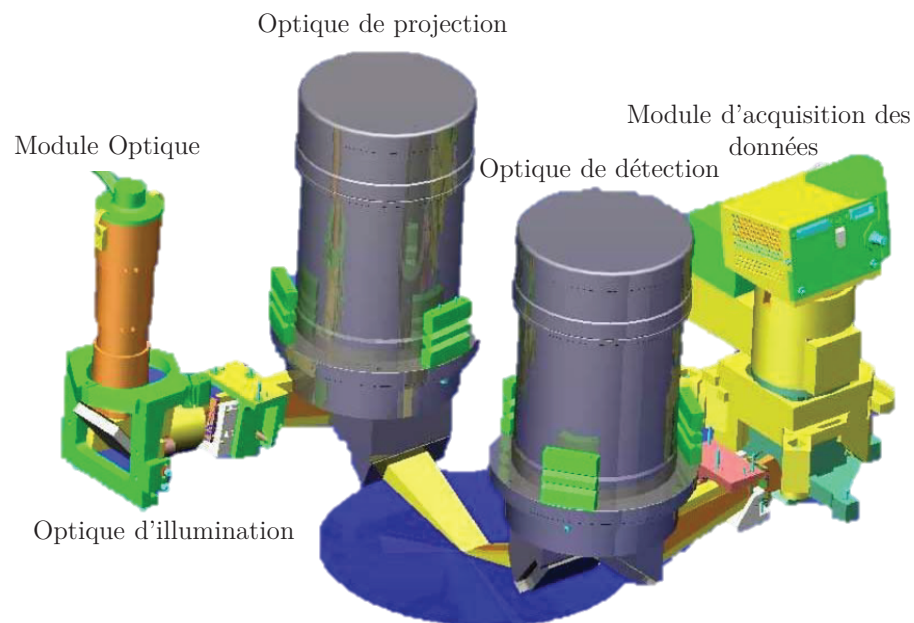


Figure 5.8 – Représentation du capteur de niveau comprenant les modules optiques et les modules d'acquisition de données.

Une fois la mesure de la topographie terminée, le scanner va exposer la plaque en utilisant la valeur du focus préalablement définie par l'utilisateur et les valeurs de la topographie mesurée par le LS. Le support de la plaque va alors suivre les données du LS en actionnant des micro-moteurs placés sous le support de la plaque. La figure 5.9 représente une cartographie d'une plaque mesurée par le capteur de niveau. Ces valeurs sont référencées sous z_{LS} .

Cependant, les couches de matériaux peuvent causer deux types de problèmes spécifiques[123]. Le premier, est lié à la topographie de la cellule qui peut contenir

7. Level Sensor / Capteur de Niveau

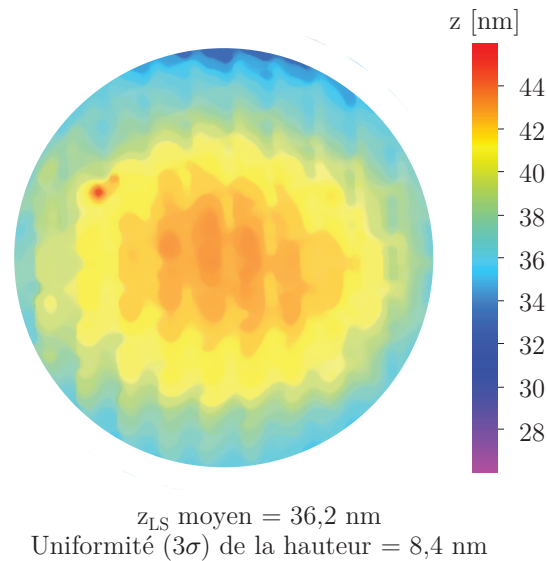


Figure 5.9 – Mesures de la topographie de la plaque à l'aide du capteur de niveau. Ces données sont transférées au serveur informatique pour l'exposition.

des différences de hauteur sur une courte distance. Le capteur de niveau n'est pas conçu pour détecter ces différences d'amplitude et la perte de données locales peut être problématique en termes de focus. Le second problème, est lié aux matériaux eux-mêmes et plus particulièrement à leurs indices de réfraction et d'absorption. Le capteur de niveau est un outil de mesure purement optique et, par conséquent, son rayon pénètre dans les couches inférieures de la plaque. Les indices des matériaux varient et peuvent donc entraîner des imperfections au niveau de la mesure de topographie de la plaque. Ces problèmes génèrent donc une erreur lors de la mesure de la topographie de la plaque. Par conséquent, comme la détermination du focus dans le matériau dépend des informations récoltées par le capteur de niveau, la dimension critique présentera un décentrage et une dispersion en fonction de l'erreur du capteur de niveau.

5.5.4 Amélioration de la détermination du focus par pression d'air

AGILE⁸ est un système de mise à niveau nouvellement développé qui utilise un manomètre à pression d'air pour améliorer les performances du focus. Un système de pression d'air nommé AirGauge est donc utilisé pour mesurer la topographie de la résine. Ce système est placé dans la zone de métrologie et il mesure la «sur-

⁸. AirGauge Improved process LEveling / Amélioration de la Détermination du Focus par Pression d'Air

face mécanique» de la plaque. L'avantage majeur de cet outil est lié au fait que ces mesures n'interagissent pas avec les niveaux inférieurs vu qu'il n'existe aucune interaction optique entre ce dispositif de mesure et les couches de matériaux[124]. Combiné avec le capteur de niveau, AGILE[®] permet donc de mesurer avec précision la topographie de la plaque sans tenir compte du type de produit. Ces valeurs sont référencées sous z_{AGILE} .

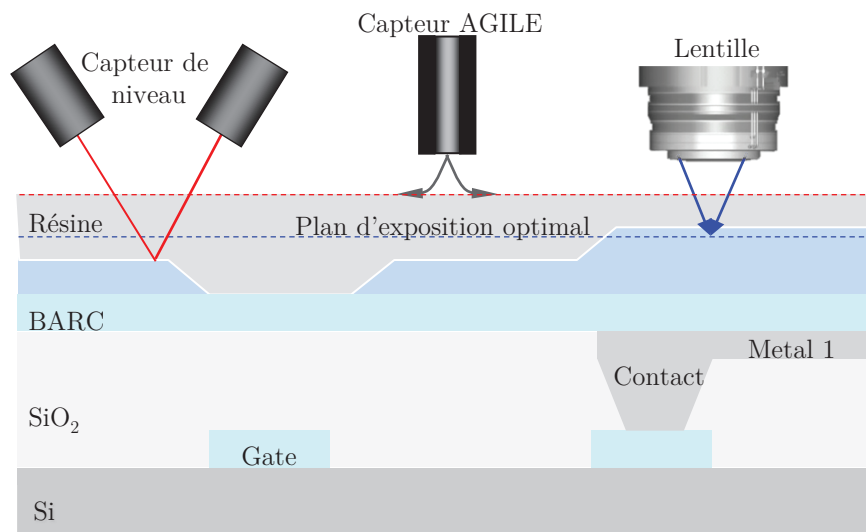


Figure 5.10 – *Avantage de la détermination du focus par pression d'air par rapport au capteur de niveau.*

5.5.5 Liens entre toutes ces calibrations

Toutes ces méthodes de calibrations ont un lien entre-elles. Elles permettent de déterminer le focus pour chaque procédé. La première étape consiste à déterminer une image aérienne en utilisant les marques TIS. L'équipement connaît donc la position en z_{MRP} . Ensuite, le capteur de niveau mesure en tout points de la plaque les variations de hauteur de la résine. La cartographie tri-dimensionnelle z_{LS} est alors déterminée pour chaque plaque. Cette cartographie est aussi ajustée par le capteur de pression d'air z_{AGILE} qui compense les erreurs du LS. Pour connaître le focus dans la résine, le scanner va alors se servir de ces deux positions compensées par le focus de l'équipement pour une résine de référence z_{Focal} . L'équation 5.1 détermine la position du focus dans la zone de métrologie[125].

$$Focus = z_{MRP} + z_{LS} - z_{Focal} + z_{AGILE} \quad (5.1)$$

Dans la zone d'exposition, une compensation caractérisée par les courbes de Bossung, notée $z_{Bossung}$ permet de déterminer la position du plan focal dans la résine du procédé[126]. Le focus est alors déterminé par l'équation 5.2 :

$$Focus = z_{FRP} + z_{LS} - z_{Focal} + z_{AGILE} + z_{Bossung} \quad (5.2)$$

Le focus étant connu en tout point de la cellule, le scanner va pouvoir ajuster le focus à l'aide des micro-moteurs contrôlant la hauteur du support de la plaque.

Pour bien comprendre le mécanisme de mise au point de l'équipement, la figure 5.11 retrace les principales étapes pour déterminer le focus[127]. La figure du haut explique comment le focus est déterminé dans la zone de métrologie. La figure du bas est une représentation schématique de la détermination du focus dans la zone d'exposition.

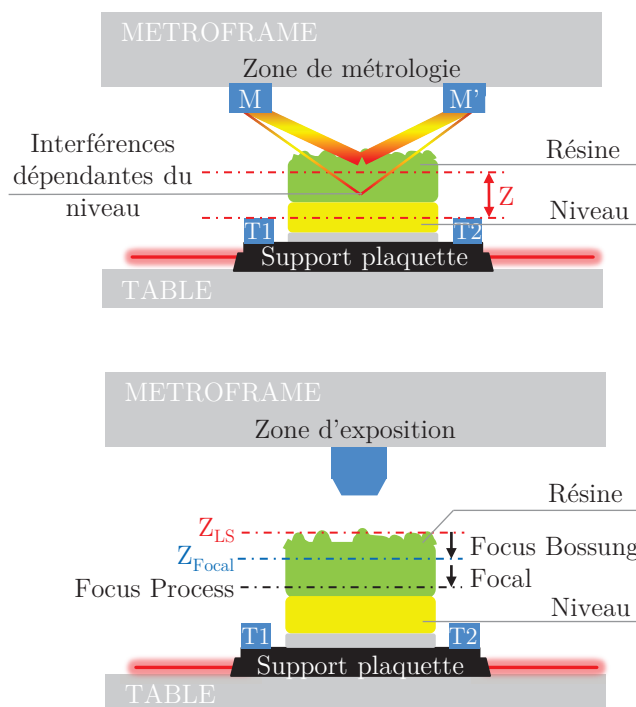


Figure 5.11 – Détermination de la position du plan focal dans la zone de métrologie et dans la zone d'exposition.

5.5.6 Détection des zones défocalisées

La détection des zones défocalisées CS⁹ identifie les point hors focus causés par des particules sur le support des plaques. Ces particules ont toujours été un problème pour les photo-lithographes. Ces particules peuvent s'accumuler sur le support lorsqu'il se trouve dans la zone de métrologie en raison des étapes antérieures des plaques[128]. Les particules sont ensuite transférées dans la zone d'exposition. Lors de l'exposition, ces particules situées sous la plaque vont générer une zone défocalisée qui dégrade fortement les motifs. Ce phénomène est représenté sur la figure 5.12. Depuis l'installation de la version 3.3.0 du logiciel de gestion de l'équipement, le suivi des zones défocalisées est en mesure de minimiser l'impact de ce problème par la détection. Si la mise au point du site dépasse les limites de spécification définies par l'utilisateur, l'erreur qui en résulte est signalée comme une tache particulaire.

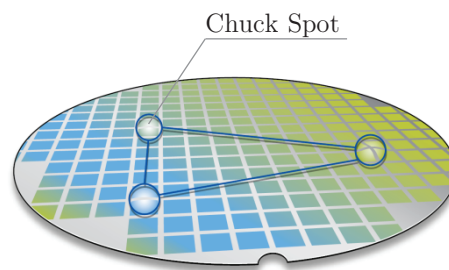


Figure 5.12 – Représentation des zones défocalisées causés par la contamination particulaire. Ces points causent des variations géométriques importantes sur les motifs.

Dans la suite du manuscrit, les mesures en focus excédants les spécifications de l'équipement seront considérées comme des zones défocalisées causés par la contamination.

5.6 Correction des paramètres photo-lithographique

Le scanner ne dispose pas de système de correction interne de la dose et du plan focal. La dose est vérifiée et ajustée en utilisant le couple de capteur d'intensité et de capteur d'énergie. Le focus est uniquement ajusté tous les 6 mois en effectuant le test FOCAL. Ces 2 paramètres doivent donc impérativement être suivis et réajustés sur chaque lot de production pour assurer une bonne uniformité CD. Aujourd'hui, les tests développés chez STMicroelectronics assure un lien entre le CD et la dose d'exposition. Il devient donc nécessaire de contrôler et de corriger les 2 paramètres de l'équipement afin de garantir un CD en spécification.

9. Chuck Spot / Zones Défocalisées

5.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents éléments du scanner dans son ensemble, ce qui nous a permis d'insister sur l'importance du couple dose/focus utilisé lors de l'exposition. Les capteurs optiques et mécaniques dans les zones de métrologie et d'exposition ont été décrits. Le scanner dispose d'un arsenal particulièrement complet et complexe pour déterminer la dose et le focus. Il peut garantir les valeurs de ces paramètres avec une grande précision. Malheureusement, il ne peut pas garantir la valeur finale de la dimension critique. Il est donc important de créer un lien entre la valeur du CD et la valeur de la dose et du focus de l'équipement. Ce lien, déterminé dans le chapitre 3, va être essentiel puisqu'il sera désormais possible d'ajuster le focus et la dose en fonction du CD. Le but du chapitre suivant est de quantifier l'impact sur le CD de la dose et du focus. Cela permettra de mettre en évidence le rôle de chacun de ces paramètres sur la dimension critique des motifs créés.

Chapitre 6

Validation de la méthode FDO

6.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats de décorrélation dose/focus obtenus en utilisant les scanners présentés dans le chapitre précédent. Suite à la création du motif FDP extrêmement sensible aux variations de dose et de focus et à la création du système d'équation développé dans le chapitre 3, nous avons procédé à l'évaluation des performances photo-lithographiques de l'outil. L'utilisation des autres méthodes de décorrélation dose/focus nous permettra de valider les résultats de la méthode FDO. Comme il a été montré antérieurement, les paramètres photo-lithographique agissent sur le CD à mi-hauteur et sur la pente de la résine des motifs imprimés. Le but de nos recherches est de comprendre les mécanismes induisant des variabilités et des décentrages en terme de CD afin de pouvoir les minimiser. De plus, des analyses cartographiques poussées de la dose et du focus ont été effectuées afin d'adresser les causes des variations dimensionnelles.

6.2 Représentation de la dimension critique

6.2.1 Définition de la variabilité intra-plaque

Dans l'industrie de la micro-électronique, le procédé est caractérisé par la mesure du CD sur une plaque. L'analyse de la moyenne et de la variance permettent de mettre en évidence des signatures caractérisées par les procédés ou les équipements[129]. On cartographie alors la plaque comme sur la figure 6.1 pour mieux comprendre les effets impactant le CD.

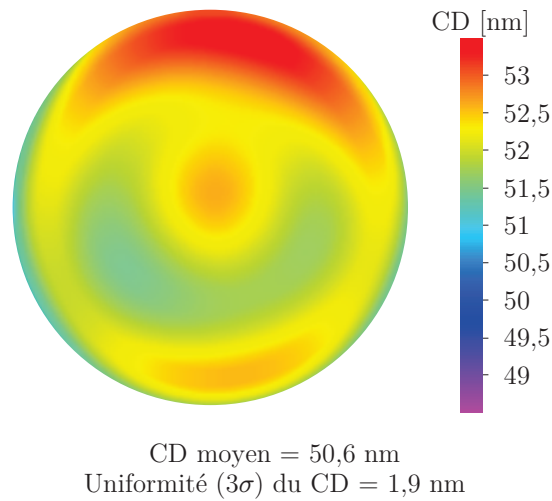


Figure 6.1 – Représentation intra-plaque du CD grille pour la technologie C040.

6.2.2 Définition de la variabilité intra-champs

La variabilité intra-champs représentée sur la figure 6.2, correspond à 3 fois l'écart type du CD mesuré sur une même structure. Selon les coordonnées qu'elle occupe dans la cellule, cette variabilité est principalement liée à l'étape de photolithographie[130].

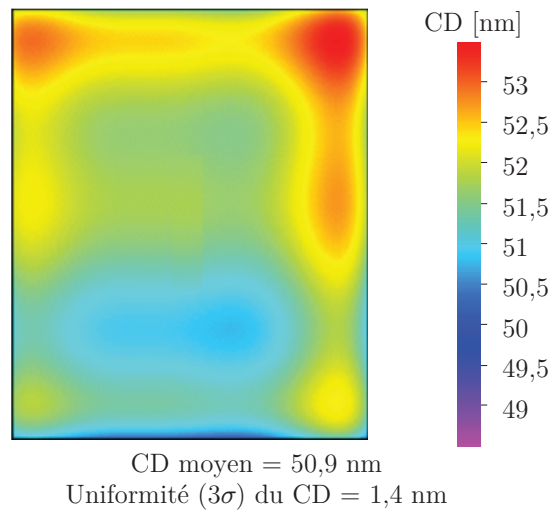


Figure 6.2 – Représentation du CD grille dans le champ image pour la technologie C040.

6.2.3 Analyse de l'uniformité de la dimension critique

De manière générale, lorsque l'on étudie une cartographie du CD intra-plaque, la première étape consiste à séparer les variabilités intra-plaque, intra-champ et résiduelles[131]. De cette façon, il est plus pratique d'adresser les causes des variabilités. La figure 6.3 détaille cette marche à suivre.

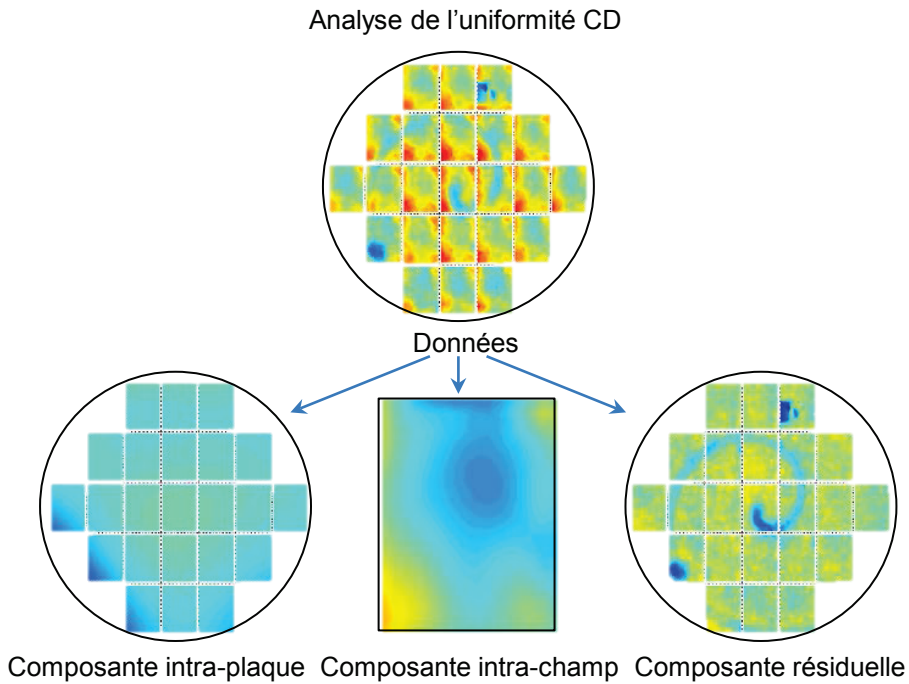


Figure 6.3 – Analyse de l'uniformité de la dimension critique. Les mesures de CD se divisent en 3 composantes.

Le but de la décorrélation dose/focus est d'obtenir pour chaque paramètre photolithographiques les 3 composantes à partir de l'analyse des uniformités.

6.3 Validation de la méthode sur Silicium

La première étape de la validation sur silicium ne s'effectue sur des plaques divisées en 2 parties. Ces plaques sont constituées de puces exposées à dose et à focus différents et de puces exposées dans les conditions optimales déterminées par une FEM de calibration. Pour valider notre méthode, nous comparons le focus déterminé par la FEM et le focus déterminé par notre méthode. La figure 6.4 représente la propriété de cette plaque ainsi que les résultats de corrélation entre le focus déterminé par FEM et le focus décorrélé.

Le coefficient de corrélation est $R^2 = 0,97$. Nous pouvons donc conclure sur le

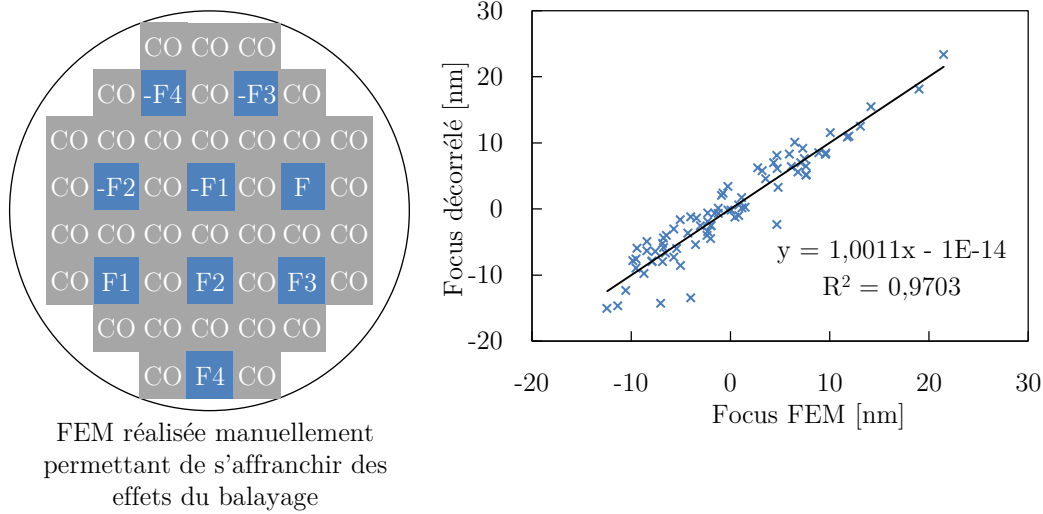


Figure 6.4 – Représentation de la plaque de validation sur silicium à gauche et du résultat de la corrélation à droite. CO^1 représente les conditions d'expositions optimales et $\pm F_i$ représentent des pas de focus différents pour déterminer la sensibilité du CD au focus.

fait que la méthode de décorrélation détermine le focus comme s'il était déterminé par une FEM.

Pour valider notre méthode sur silicium, une corrélation entre la méthode FDO et les méthodes NPW et Baseline[®] a été réalisée. La figure 6.5 représente cette corrélation. En moyenne, le coefficient de corrélation $R^2 = 0,85$ pour chaque paramètres. La corrélation n'est pas parfaite car les motifs ne sont pas positionnés aux mêmes coordonnées dans la cellule.

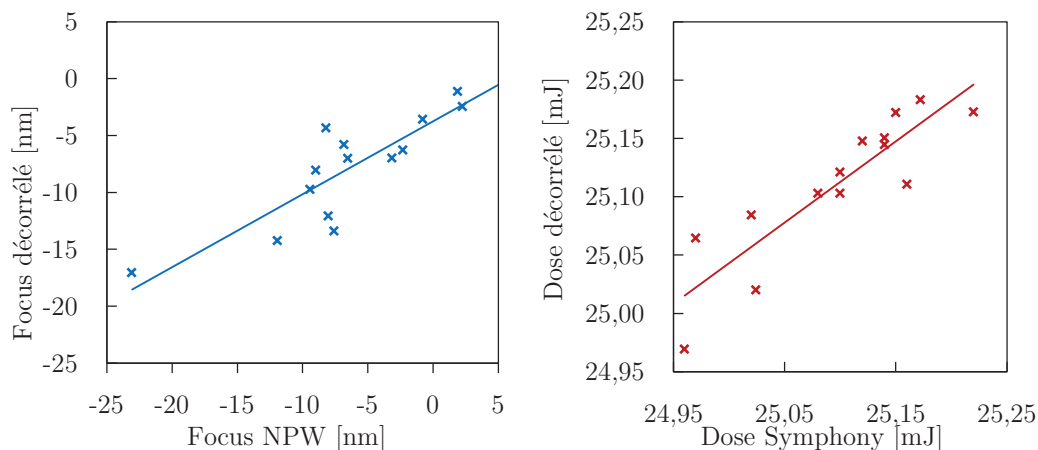


Figure 6.5 – Corrélation entre d'une part le focus décorrélé et le focus déterminé par le test NPW, puis, d'autre part la dose décorrélée et la dose déterminée par le logiciel de régulation.

6.4 Quantification des effets liés à la dose d'exposition

Les effets liés à la dose d'exposition agissent principalement sur la largeur du motif. En mesurant cette géométrie de la résine, il est possible de quantifier les variations de la dose dans une cellule, sur une plaque ou dans un lot.

6.4.1 Impact du capteur d'énergie sur la dimension critique

Les effets 1 sur $i_{\text{éléments}}$, où $i_{\text{éléments}}$ représente un nombre d'éléments multiples du cluster, sont relativement nombreux en photo-lithographie en raison des doubles supports de plaques du scanner[132] mais surtout du grand nombre de modules de la piste (environ 60). Ces effets sont repérés lors de la mesure de la dimension critique du motif. Dès lors, les ingénieurs retracent le chemin des plaques pour trouver la source ponctuelle du problème. La figure 6.6 montre clairement un effet plaque 1 sur 2 sur le CD. A l'aide de la décorrélation dose/focus, nous avons déterminé que cet effet est lié à la dose d'exposition. En effet, la dose présente également un effet plaque 1 sur 2.

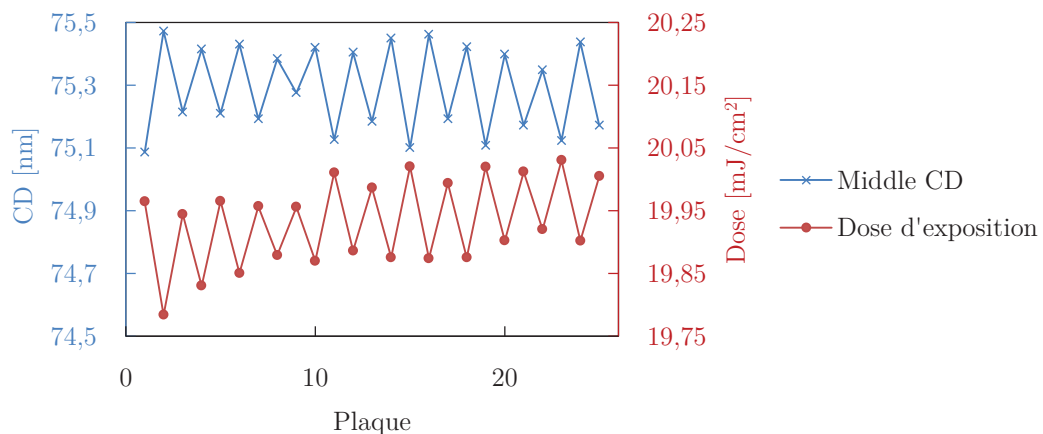


Figure 6.6 – Impact du dérèglement du capteur d'énergie sur la dimension critique. Un effet 1 sur 2 est visible.

Comme nous l'avons vu dans la section lié au capteur d'énergie, ce dispositif permet de créer une référence sur l'outil de photo-lithographie. Lorsque ce capteur est dérèglé, il ne renvoie pas la bonne information au scanner. L'énergie d'exposition est alors différente et le CD est donc logiquement impacté. Le capteur d'énergie d'un des supports de la plaque est alors mis en cause.

Les 2 capteurs des 2 supports plaque ont alors subit une vérification. La figure 6.7 montre, qu'après maintenance, la dimension critique et la dose d'exposition ne présentait plus d'effet.

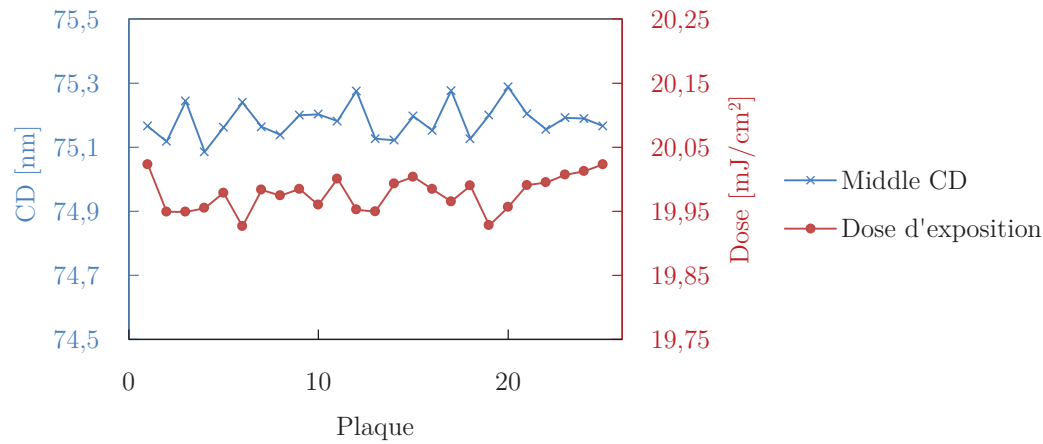


Figure 6.7 – Mesure du CD et de la dose d'exposition après maintenance sur le capteur d'énergie. L'action sur le capteur a amélioré l'uniformité du CD.

Le gain en terme de centrage et de variabilité est représenté dans le tableau 6.1. La réduction de la variabilité du CD a été réduite de 35%.

Avant maintenance				Après maintenance			
CD		Dose		CD		Dose	
Moy [nm]	3 σ [nm]	Moy [nm]	3 σ [nm]	Moy [nm]	3 σ [nm]	Moy [nm]	3 σ [nm]
75,3	0,51	19,93	0,22	75	0,32	19,98	0,15

Tableau 6.1 – Valeur moyenne et variabilité du CD et de la dose d'exposition avant et après maintenance du capteur d'énergie.

A noter que la correction du capteur d'énergie n'a pas impacté le focus.

6.4.2 Quantification de la non-uniformité de la dose

En production, l'énergie d'exposition est fixée pour chaque plaque. Celle-ci peut être quantifiée à l'aide de la décorrélation dose/focus. Suivant la résine utilisée, la variation du CD peut être comprise entre 0,6nm et 0,9nm. La figure 6.8 montre le résultat de la décorrélation dose/focus sur une plaque de silicium.

L'énergie d'exposition présente une variabilité de l'ordre de 0,15mJ/cm². Cet effet est lié non seulement au scanner mais aussi à la piste[133]. En effet, les fours et les modules de développement ont un impact direct sur l'épaisseur mais aussi sur la largeur de la résine et, par conséquent, sur le calcul de la décorrélation. L'avantage de ce phénomène est qu'il est maintenant possible de corriger les variations de la piste par une compensation en dose.

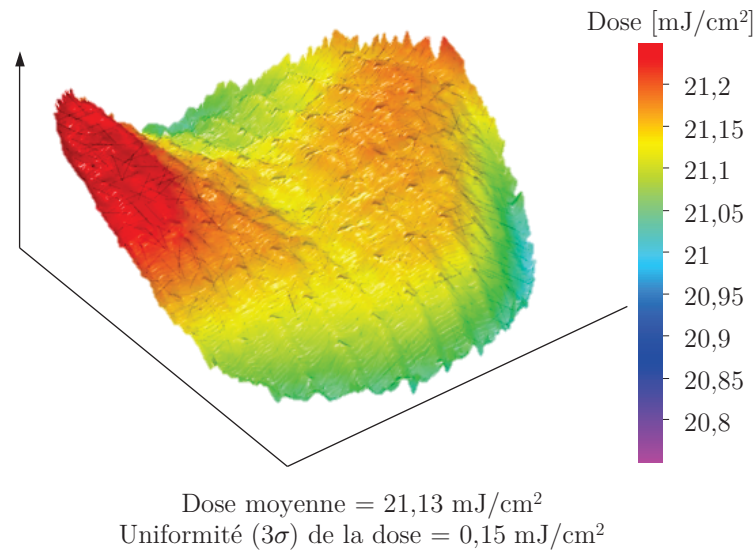


Figure 6.8 – Représentation de la dose sur une plaque de Silicium. L'effet «papillon» est caractéristique d'une non-uniformité de la température des fours de la piste.

6.4.3 Quantification de l'effet piste

L'effet de la piste n'a pas directement d'impact sur la dose et le focus. Cependant, il impacte directement sur le centrage ou sur la variation du CD intra-plaque. Cette variation sera détectée comme une variation de dose et/ou de focus car notre système de déconvolution ne prend pas en charge la variable piste. Cependant, l'expertise des ingénieurs de la piste peut nous renseigner sur les effets de cet équipement. La figure 6.9 montre clairement un effet du développeur. En effet, cet effet de couronne est lié à l'apport du développeur sur la plaque[134].

La piste du scanner 1700i est composée de 7 fours. Ces fours, sont normalement étalonnés entre eux pour fournir la température spécifiée sur la plaque. On parle alors de «matching» des modules de la piste. Il arrive, cependant, qu'un des fours se dérègle au cours du temps. Cela provoque une variation sur le CD, et donc, par décorrélation, sur la dose. Il est donc important de pouvoir dissocier les erreurs réelles de la dose et les erreurs fictives causées par certains modules de la piste. La figure 6.10 représente l'effet du dérèglement du four sur la dose.

Une réflexion est alors possible sur ce sujet. Les erreurs de la piste pourraient être compensées par la dose et le focus sur le scanner. Seulement, cet axe de travail n'est pas toléré dans un environnement industriel. L'idéal étant, en effet, de corriger la source du problème.

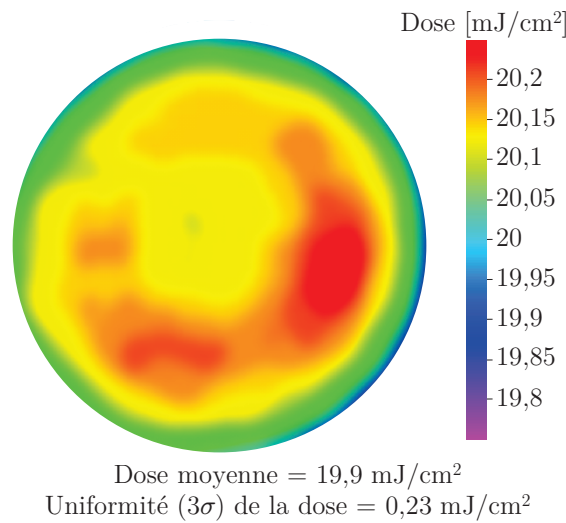


Figure 6.9 – Représentation de l'uniformité de la dose sur une plaque de Silicium. La non-uniformité de la dose est due à la variabilité de la température des fours de la piste.

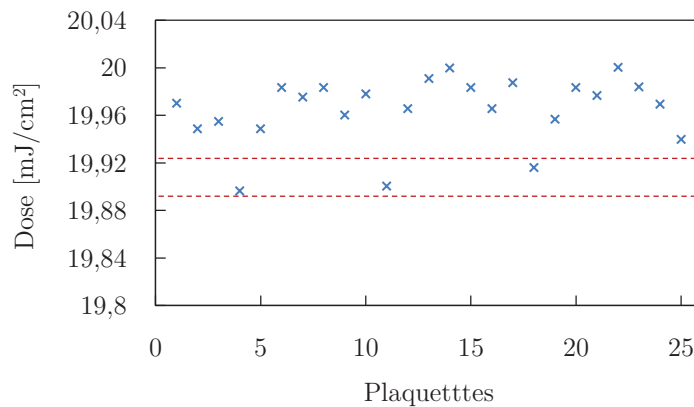


Figure 6.10 – Représentation de l'effet 1 sur 7 caractérisé par une température différente de la cible sur l'un des fours de la piste.

6.4.3.1 Détermination de la lumière parasite

La rugosité des lentilles formant le système optique, bien qu'égal à quelques fractions de la longueur d'onde, conduit à la diffusion de l'énergie dans les cellules voisines. Ce phénomène est connu sous le nom de flare², et, en général, il dégrade le contraste de l'image aérienne et donc réduit la fenêtre de procédé[135]. La figure 6.11 montre l'impact de la lumière parasite sur le CD. Après décorrélation, on remarque

2. Lumière parasite

qu'il s'agit d'une erreur locale en dose, qui a pour origine la lumière parasite issue de l'exposition de la cellule voisine.

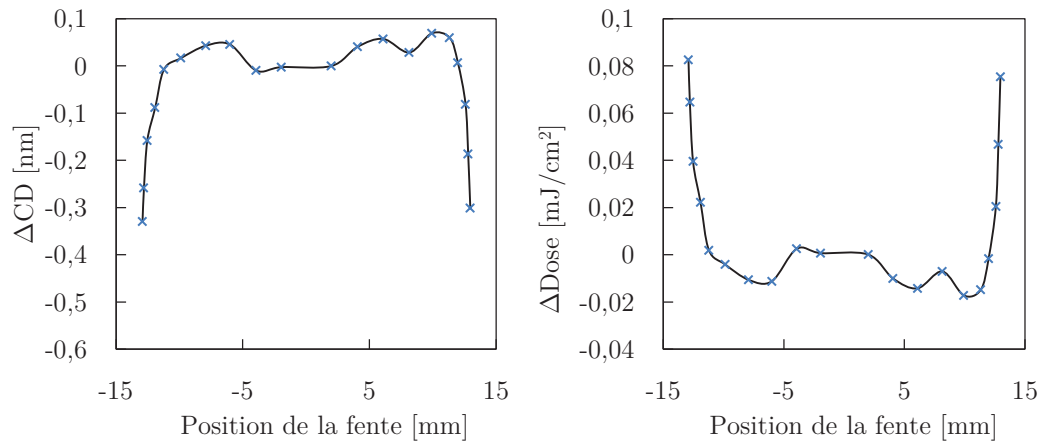


Figure 6.11 – Représentation du ΔCD dans la fente. L'erreur en dose mesurée provient de la lumière parasite.

Pour compenser cet effet, le fabricant de scanner a développé l'outil DoseMapper[®] qui est capable de réguler la dose à l'intérieur même d'une cellule[136].

6.4.4 Comparaison du suivi en dose entre la méthode FDO et Symphony[®]

STMicroelectronics utilise un système de suivi de la dose sur lot de production à travers un logiciel de régulation Symphony[®]. Pour valider notre méthode nous avons comparé les valeurs du logiciel de régulation et les valeurs données par la décorrélation dose/focus. Nous avons effectué cette comparaison sur des lots de production en technologie C045. Cette validation a été effectuée sur 6 mois pour prouver la robustesse de la méthode. La figure 6.12 indique que les 2 suivis coïncident à une compensation prêt. Cette compensation est uniquement due au fait que les mires de mesures n'ont pas la même position sur le réticule.

La méthode FDO en dose est donc validée et acceptée au sein de STMicroelectronics.

6.5 Quantification des effets liés au focus

Les effets liés au focus agissent principalement sur la pente du motif mesuré. Ces effets peuvent être facilement quantifiable en utilisant la méthode de décorrélation et la mesure par scattérométrie. Les contributeurs du focus sont très nombreux. Nous nous attacherons seulement aux contributeurs des éléments photo-lithographiques.

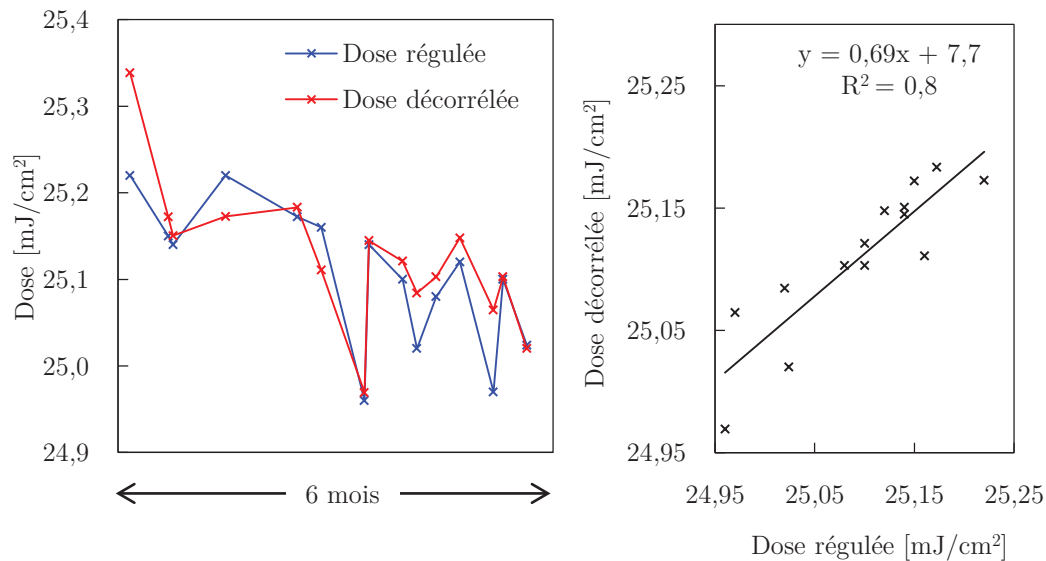


Figure 6.12 – Comparaison en dose entre les valeurs du logiciel de régulation et les valeurs données par la méthode FDO en technologie C045.

D'autres contributeurs comme la pression ou l'environnement de la salle blanche peuvent impacter le centrage et la variabilité du focus. Ce type de contributeur est corrigé en interne par le scanner si celui-ci en tient compte.

6.5.1 Définition de la déviation du plan image

Toutes variations dans le système global qui proviennent des effets des éléments photo-lithographiques comme les planéités des plaques et des réticules, les températures, les aberrations optiques, mais aussi, l'inclinaison du réticule, le déplacement de la plaque lors du balayage, les variations de longueur d'onde, le couchage et le développement de la résine, génèrent une déviation du plan de l'image[34]. Cette déviation est alors définie comme étant une surface quadratique de différence de chemin optique. On parle alors de surface d'image. L'écart entre le plan de l'image et la surface de l'image est un phénomène qui se répercute directement dans la résine photosensible. L'IPD³ est défini comme étant une différence entre le focus maximum et le focus minimum

$$IPD = |Max[F_{Max}(Fv_{C_x}; Fh_{C_x})] - Min[F_{Min}(Fv_{C_x}; Fh_{C_x})]| \quad (6.1)$$

avec, Fv_{C_x} le focus d'un support plaque déterminé en utilisant la mire FDP verticale et Fh_{C_x} le focus d'un support plaque déterminé en utilisant la mire FDP

3. Image Plane Deviation / Déviation du Plan Image

horizontale.

6.5.2 Détermination des aberrations du système optique

Les systèmes de photo-lithographie ont évolué vers une plus grande résolution et la qualité de l'optique de projection est une préoccupation croissante. Les aberrations peuvent causer des distorsions du front d'onde. Celles-ci se traduisent par des déplacements des motifs et/ou un décalage du focus dans l'image aérienne[13]. Dans un système optique idéal, représenté sur la figure 6.13, un point dans le plan objet produira une onde sphérique parfaite dans la pupille de sortie. Le point dans le plan objet sera alors identique au point dans le plan image.

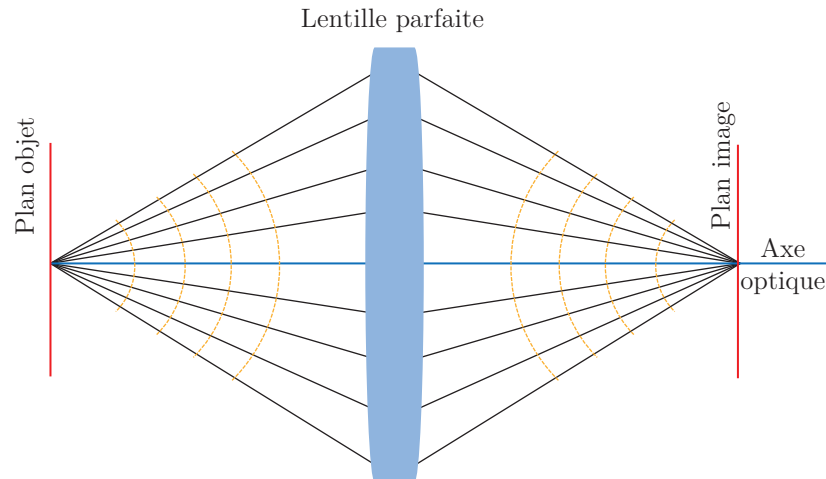


Figure 6.13 – *Système optique idéal.* Le front d'onde de la pupille de sortie est symétrique au front d'onde de la pupille d'entrée. L'image du point source est donc parfaitement reproduite dans le plan image.

Les aberrations optiques d'un objectif, représentées sur la figure 6.14 causent des déviations de l'onde sphérique dans la pupille de sortie. Ces aberrations peuvent être le résultat d'une imprécision au niveau de l'alignement des différents éléments de la colonne optique, ou elles sont propres au système optique lui-même[137].

L'écart par rapport à la surface d'onde idéale (également appelé erreurs de chemin optique) est défini comme étant une fonction polynomiale dont chaque terme est caractérisé par les polynômes de Zernike [138]. Ce front d'onde réel $W(\rho, \theta)$, où (ρ, θ) sont les coordonnées polaires dans la pupille circulaire, peut être exprimé en une somme de polynômes de Zernike Z_j à indices a_j pairs liés au focus plus une somme de polynômes de Zernike à indices impairs liés au déplacement de l'image :

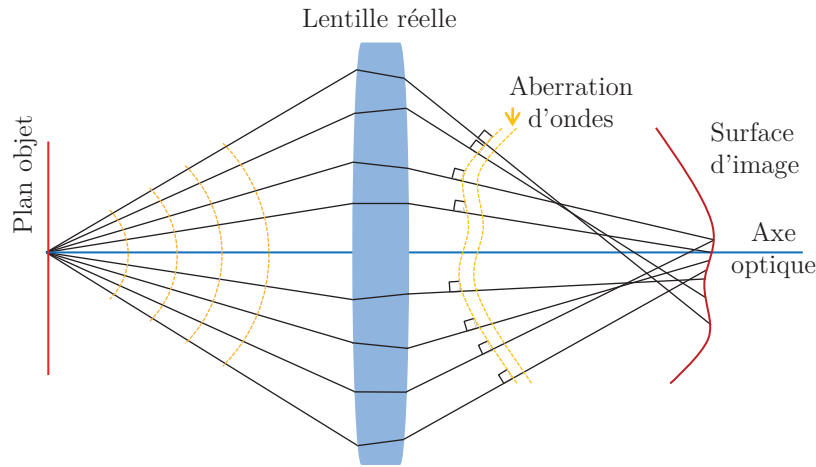


Figure 6.14 – *Système optique réel. Le front d'onde subit des distorsions dues aux aberrations optiques de la lentille. L'image n'est donc pas parfaitement reproduite.*

$$W(\rho, \Theta) = \sum_{\substack{j=1 \\ j=2p \\ \text{focus}}}^{\infty} a_j Z_j(\rho, \Theta) + \sum_{\substack{j=1 \\ j=2p+1 \\ \text{déplacement de l'image}}}^{\infty} a_j Z_j(\rho, \Theta) \quad (6.2)$$

En photo-lithographie, les aberrations optiques affectent directement la dimension critique et le déplacement de l'image. En effet, toutes les aberrations réduisent le contraste de l'image aérienne et, par conséquent, la profondeur de champ. De plus, elles dépendent du type d'illumination et du type de structures utilisé sur le réticule.

Les aberrations optiques sont classées en deux catégories :

- Aberrations chromatiques qui dépendent de la variation de la longueur d'onde de la source[139]. Ce cas sera traité dans la section 6.4.6.
- Aberrations monochromatiques qui affectent la lumière d'une seule longueur d'onde et qui impactent l'alignement et/ou le focus et/ou la dose[140]. Ce type d'aberration sera détaillé dans les sections ci-dessous.

Chaque aberration a un effet particulier sur l'image formée par la lentille. Les dernières générations de scanners peuvent compenser ces aberrations en optimisant la position des lentilles de la colonne optique. La plupart des aberrations optiques ne sont pas corrigées mais elles sont mesurées sur le stage de métrologie afin de pouvoir les quantifier et les suivre. En effet, lors de la livraison d'un équipement, les aberrations optiques font l'objet de tests d'acceptances fournis par le fournisseur de l'objectif (Zeiss). Ces tests, permettent de caractériser chaque élément de la machine et de fournir, au fabricant de semi-conducteur, des limites de fonctionnement et des précisions de paramètres. Le fait de mesurer ces aberrations permet donc de vérifier

que les valeurs des aberrations sont bien comprises dans les limites des spécifications.

6.5.2.1 Influence de l'astigmatisme sur la latitude du focus.

L'astigmatisme est défini comme étant une distance géométrique entre le focus pour un motif horizontal et le focus pour un motif vertical comme montré sur la figure 6.15

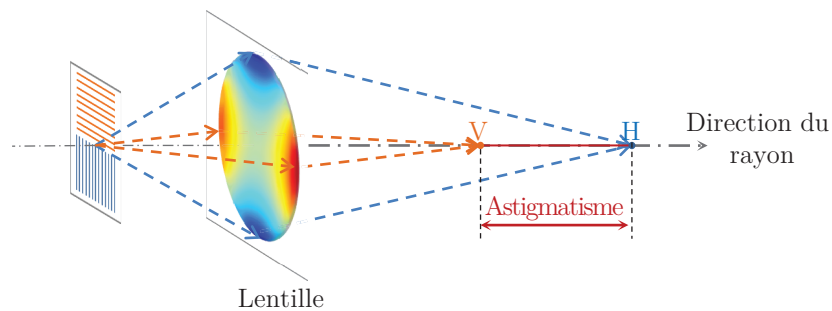


Figure 6.15 – Représentation de la distance algébrique définissant l'astigmatisme géométrique.

L'astigmatisme, qui est donc fonction de l'orientation, est due à une différences de chemin optique dans la courbure de la lentille entre des lignes horizontales et des lignes verticales embarquées sur les réticules[141]. L'effet de cette différence de chemin optique sur les performances d'imagerie génère donc à la fois un décalage du point focal et une différence entre les CD horizontaux CD_h et les CD verticaux. CD_v Les réticules présentant ces 2 types de structures, il en résulte que la profondeur de champ globale sera égale à la profondeur de champ la plus faible entre les lignes horizontales et verticales. Des différences de performances seront alors obtenues suivant l'orientation des motifs sur le réticule.

Pour analyser qualitativement cette aberration, le fabricant de machine de photolithographie possède un outil capable de déterminer la valeur de l'astigmatisme pour chaque équipement. Un réticule contenant des mires horizontales et verticales est insolé, puis, la différence des focus est déterminée :

$$\Delta focus = F_h - F_v \quad (6.3)$$

avec, F_h le focus déterminé pour un motif horizontal et F_v le focus déterminé pour un motif vertical

Le tableau 6.2 présente les spécifications de l'astigmatisme pour les scanners à immersion.

Pour mesurer l'astigmatisme, il est impératif d'utiliser des mires spécialement

	XT : 1700i		NXT : 1950i	
	Moyenne	Range	Moyenne	Range
Astigmatisme [nm]	-7.1	12.5	-0.1	7.4

Tableau 6.2 – Spécification du fabricant sur l’astigmatisme géométrique pour 2 équipements de génération différente.

conçues pour mesurer ces aberrations[142]. En générale, on choisit des motifs en fonction de l’outil de métrologie. La figure 6.16 représente les 4 motifs utilisés en fonction de l’outil de mesure.

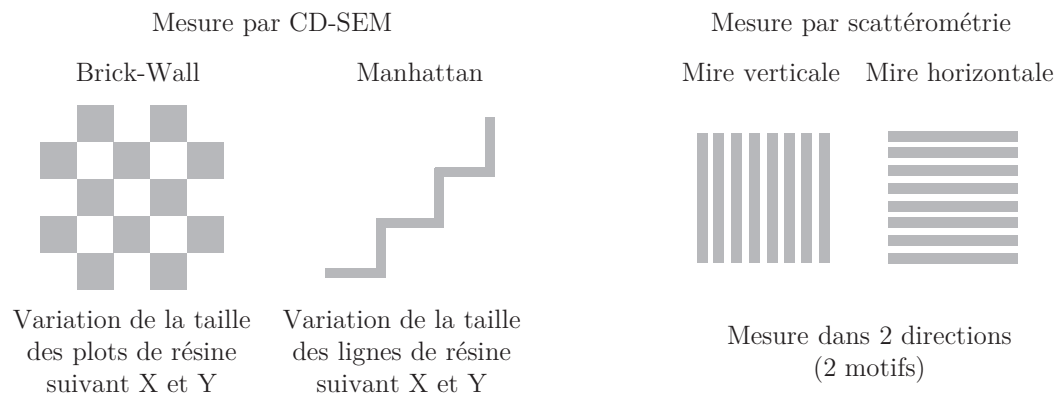


Figure 6.16 – Représentation des mires utilisées pour mesurer l’astigmatisme en fonction de l’outil de mesure.

La figure 6.17 représente la détermination de l’astigmatisme par la méthode de décorrélation, baseliner[®] et le test NPW. Les signatures sont très proches. En effet, on retrouve un fort astigmatisme sur les bords gauche et droit de la cellule. Cependant, la variabilité de l’astigmatisme déterminé par baseliner[®] est la plus petite en raison d’un échantillonnage trop faible et d’un réticule ne couvrant pas le champ image maximal. L’échantillonnage de baseliner[®] est aujourd’hui équivalent au test NPW.

La méthode de décorrélation FDO offre une signature plus complète que le test NPW et baseliner[®] en raison d’un échantillonnage important (90 points dans la cellule). La variabilité en focus de la méthode FDO est plus importante que la variabilité du test NPW. Par conséquent, la méthode FDO est capable de déterminer l’astigmatisme avec une meilleure précision que le test NPW.

6.5.3 Caractérisation de l’échauffement des éléments de photo-lithographie

Les températures des éléments et les pressions des chambres d’exposition du scanner ont un impact considérable sur la fenêtre des procédés. En effet, suivant les

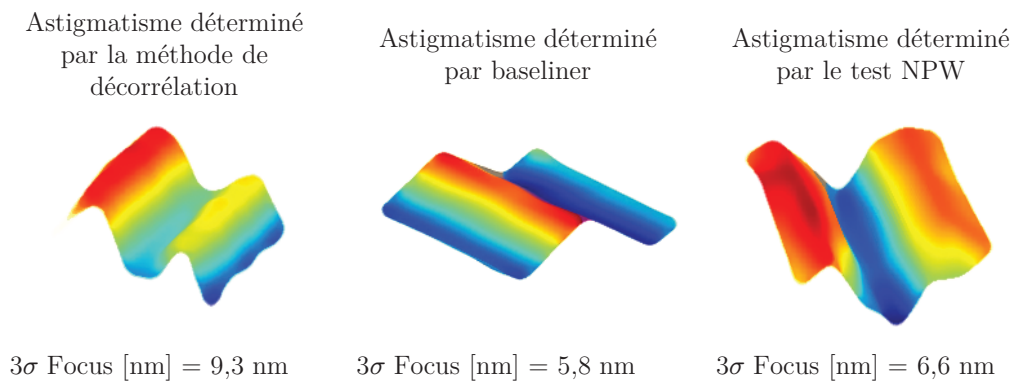


Figure 6.17 – Représentation de l'astigmatisme par la méthode décorrélation, baseliner[®] et le test NPW.

températures, les caractéristiques des éléments évoluent et contribuent donc à faire varier le focus.

6.5.3.1 Echauffement du réticule

Lorsqu'un réticule est insolé, celui-ci tend à absorber l'énergie provoquant ainsi la dilatation du réticule. La conséquence directe de cet échauffement est une augmentation des erreurs de superposition[143]. Il n'existe actuellement aucune étude sur les effets de l'échauffement du réticule sur le focus et il est aujourd'hui impossible de dire si ce phénomène impacte sur la position du focus dans la résine.

6.5.3.2 Echauffement de la lentille

Au cours du procédé photo-lithographique, de nombreuses plaques sont exposés à des énergies d'expositions différentes et provoquent l'échauffement de la lentille. Les caractéristiques et la forme de celle-ci évoluent générant une distorsion du front d'onde. Le focus et le facteur de grandissement sont alors affectés[144]. Les scanners actuels sont équipés de lentilles motorisées, contrôlées par le logiciel du scanner, pour compenser cet échauffement.

La figure 6.18 montre la dégradation du focus entre la première plaque et la dernière plaque d'un même lot. La différence du focus entre la première et la dernière plaque est de l'ordre de 15nm. Au niveau C028 contact, cette différence de focus impacte la profondeur de champ de l'ordre de 13%.

Le scanner possède un système interne de compensation de l'échauffement de la lentille. Cette option nommée Aritm[®] permet d'ajuster le focus en fonction de la température de la lentille[145]. Pour quantifier le gain de cette option, 2 lots de 25

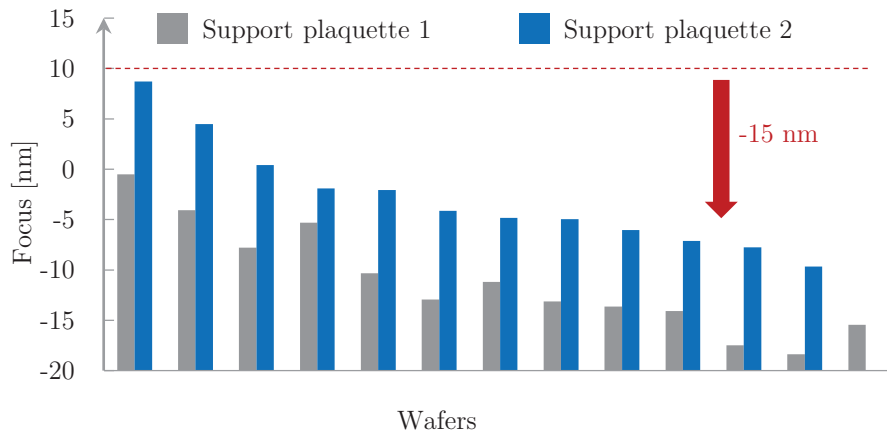


Figure 6.18 – Impact du dérèglement du capteur d'énergie sur la dimension critique. La diminution du focus est produite par l'échauffement de la lentille.

plaques ont été exposés en activant et en désactivant cette option.

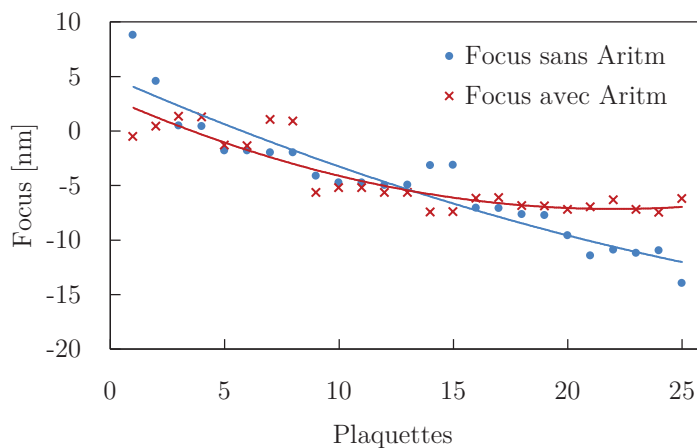


Figure 6.19 – Représentation du focus avec et sans Aritm[®]. L'option activé permet un gain en variabilité focus de l'ordre de 31%.

La figure 6.19 représente les valeurs du focus avec et sans l'option Aritm[®]. Le gain en terme de variabilité du focus est proche de 31%. Cette option est aujourd'hui activée sur les lots de production.

Il est possible de corriger l'échauffement de la lentille par la méthode de décorrélation. L'effet de l'échauffement de la lentille peut être modélisé par un polynôme d'ordre 2. Il est donc possible de compenser l'échauffement de la lentille en changeant le focus de consigne de l'équipement au fur et à mesure du passage des plaques. Les résultats sont présentés sur la figure 6.20

Cet aspect de la méthode décorrélation est très délicate à mettre en place. En

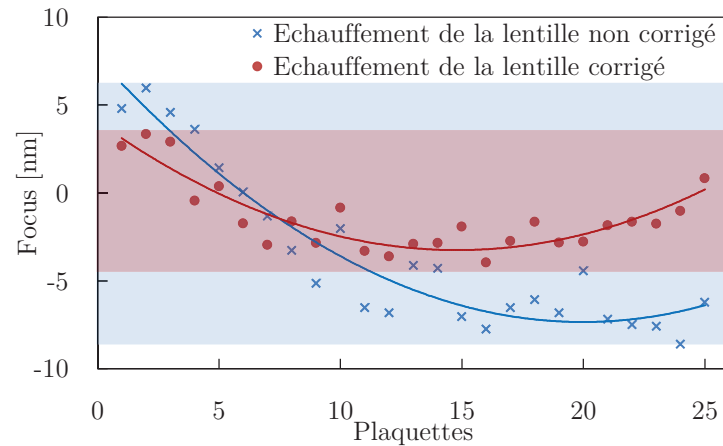


Figure 6.20 – Correction de l'impact sur le focus de l'échauffement de la lentille par la méthode FDO.

effet, les coefficients du polynôme caractérisé par l'échauffement de la lentille varient. Ils dépendent de la température initiale de la lentille et donc de son utilisation. Il est donc difficile de mettre en place ce type de correction.

6.5.3.3 Echauffement de la résine et du substrat

En raison de la relativement grande énergie qui arrive sur la plaque, celle-ci va avoir tendance à chauffer. Les caractéristiques de la plaque et de la résine peuvent être modifiées par un chauffage excessif. Les conséquences possibles de ces énergies élevées sont des dilatations locales ou globales du substrat mais aussi la modification de la sensibilité de la résine[146]. Peu d'études sur les effets d'échauffement des résines lors de l'exposition ont été faites, c'est pourquoi, les résultats sont difficilement prévisibles.

6.5.4 Etude de la planéité des éléments photo-lithographiques

L'industrie des semi-conducteurs prévoit que la demande d'amélioration de la planéité du réticule, du substrat et des supports des plaques sera en nette augmentation ces prochaines années. En effet, avec la photo-lithographie par immersion, l'exigence de la planéité est devenue très stricte en raison de la forte ouverture numérique des optiques. Les différentes planéités de ces éléments créent une différence $\delta z_{\text{éléments}}$ sur l'axe optique impactant directement le focus.

6.5.4.1 Impact de la planéité du réticule

Généralement, les fournisseurs de réticules précisent la planéité des réticules en fournissant les mesures d'épaisseur du quartz. Les irrégularités du réticule sont dues au polissage du quartz, à la dispersion de la hauteur de chrome et aussi, au stress provoqué par le dépôt des pellicules⁴ [147]. Une topologie de 11 réticules est présentée sur la figure 6.21. Avec la réduction des fenêtres de procédé, la planéité du réticule est devenue une composante importante dans le budget du focus. Beaucoup de travaux ont été publiés sur divers aspects de la planéité du réticule et sur l'impact de la distorsion de l'image. Pour corriger cet effet, ASML a développé une fonction RSC⁵ permettant de compenser la planéité du réticule. Les écarts d'altitudes linéaires de la surface du réticule sont mesurés grâce au marques TIS du support du réticule. Avec l'option de correction de forme du réticule, il est possible de mesurer les écarts d'altitudes non linéaires de la surface de réticule[148]. Cette fonction utilise un système de marques RSC, mesurés par les capteurs TIS, qui permet, lors de l'exposition, de compenser les irrégularités du réticule. A titre d'information, 600nm de différence de hauteur du réticule, provoque une défocalisation de 30nm sur plaque.

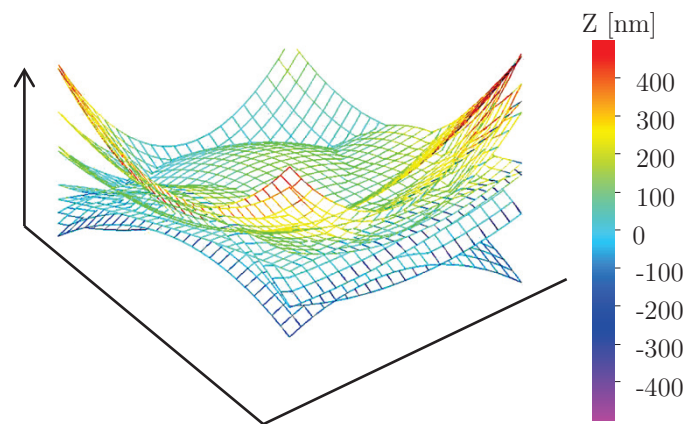


Figure 6.21 – Planéité des réticules basé sur la mesure RSC du scanner. La différence de hauteur atteint ici 600nm.

6.5.4.2 Etude de la planéité du substrat

D'importantes variations de la topographie des substrats génèrent principalement des erreurs de focus et peuvent particulièrement dégrader la fenêtre de procédé et

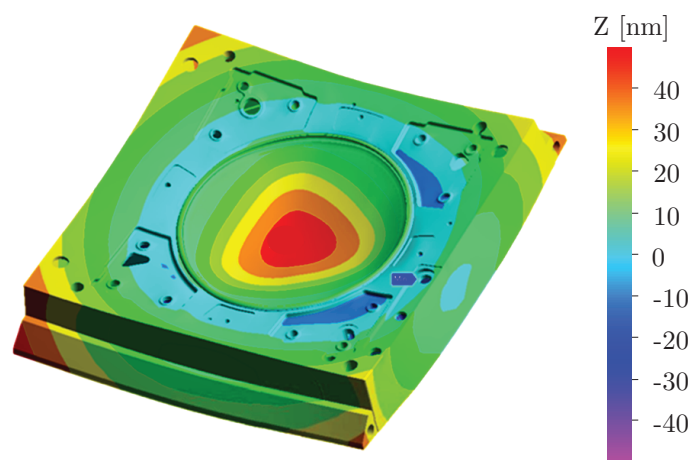
4. Film déposé à quelques nanomètres du quartz de façon à ce que les éventuelles poussières tombant sur le réticule soient défocalisées et non résolues dans la résine

5. Réticule Shape Correction / Correction de Forme du Réticule

ainsi conduire à des pertes de rendement potentielles[149]. Afin d'éliminer la dépendance de la planéité de la plaque, les outils de photo-lithographie actuels possèdent des systèmes de correction agissant sur l'inclinaison de la plaque. Lors de l'exposition, le support de la plaque va donc suivre la topographie de la plaque mesurée au préalable afin d'en minimiser les imperfections.

6.5.4.3 Présentation de la planéité du support de la plaque

Dans un outil photo-lithographique à immersion, le mécanisme d'immersion IH⁶ laisse, à la fin de l'exposition d'une cellule, un peu d'eau sur la plaque. Cette eau va s'évaporer peu à peu : l'eau liquide restante se refroidit ce qui peut déformer le support de la plaque en raison de la différence de leurs coefficients de dilatation[150]. Ainsi, lors du procédé, le support de la plaque subit une déformation en forme de bol qui peut atteindre 100nm. Cette déformation, représentée sur la figure 6.22, se produit uniquement sur le stage d'exposition car la mesure sur le stage de métrologie est sèche. Par conséquent, la déformation du support de la plaque, quand elle n'est pas corrigée, génère des erreurs de nivellement sur le stage d'exposition.



Hauteur moyenne = 5,3 nm
Uniformité (3σ) de la hauteur = 24,8 nm

Figure 6.22 – Représentation de la déformation du support de la plaque en forme de bol qui peut atteindre 100nm.

La déformation du support de la plaque dépend de multiples facteurs qui sont soit liés à la machine d'exposition (type de support de la plaque, température du support de la plaque, ...), soit liés aux procédés (température de l'eau, température de la résine, ...). Cette déformation est seulement reproductible si tous les facteurs

qui sont mentionnés ci-dessus restent constants. Si cet effet est reproductible, alors il peut être mesuré et corrigé. Pour cela, la machine d'exposition est équipée du test LVT⁷ permettant ainsi de déterminer la déformation du support de la plaque[151]. Pendant l'exposition, le LVT applique une correction en z_{LVT} représenté sur la figure 6.23, pour compenser la déformation du support de la plaque sur lequel la plaque est exposée.

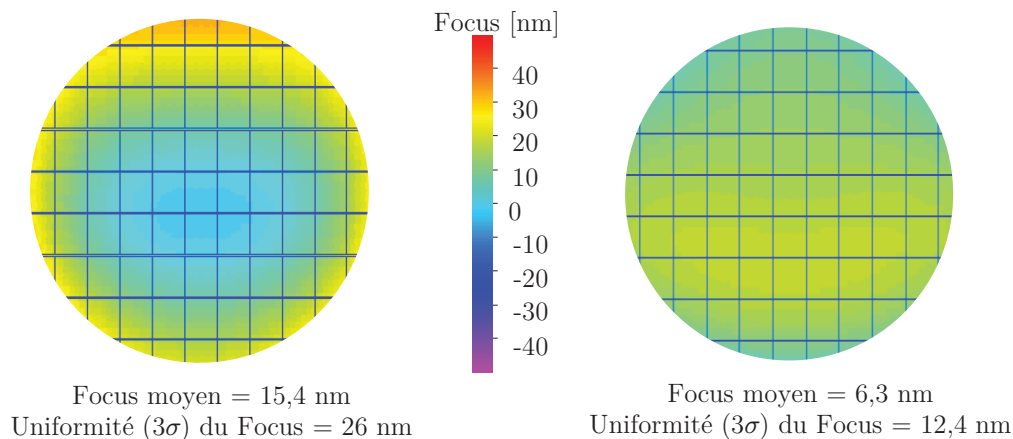


Figure 6.23 – Valeurs du focus sans correction du LVT (à gauche) et avec correction du LVT (à droite).

6.5.5 Mise en évidence du balayage de la cellule par la méthode FDO

Dans l'équipement de photo-lithographie les cellules peuvent être scannés dans 2 sens : soit de bas en haut, soit de haut en bas. Pendant ces phases, le support de la plaque et le support du réticule subissent des phases d'accélération et des phases de décélération[152]. Pendant ces phases, le focus a tendance à varier comme le montre la figure 6.24.

Plus précisément, la variabilité du focus, représentée sur la figure 6.25, est de $5,7nm$ en moyenne. Cette variabilité impacte la dimension critique suivant le motif utilisé.

6.5.6 Impact de la variation de l'indice du milieu de propagation sur le focus

La position du focus sur l'axe optique dépend également des indices des milieux de propagation. En photo-lithographie, le milieu de propagation représente l'air,

7. Leveling Verication Test / Test de Vérification du Niveau

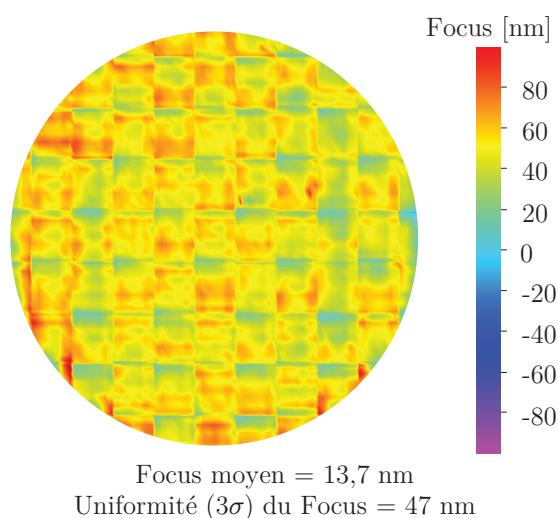


Figure 6.24 – Représentation de l'effet du balayage sur une plaque. Le focus dépend du sens du balayage du scanner.

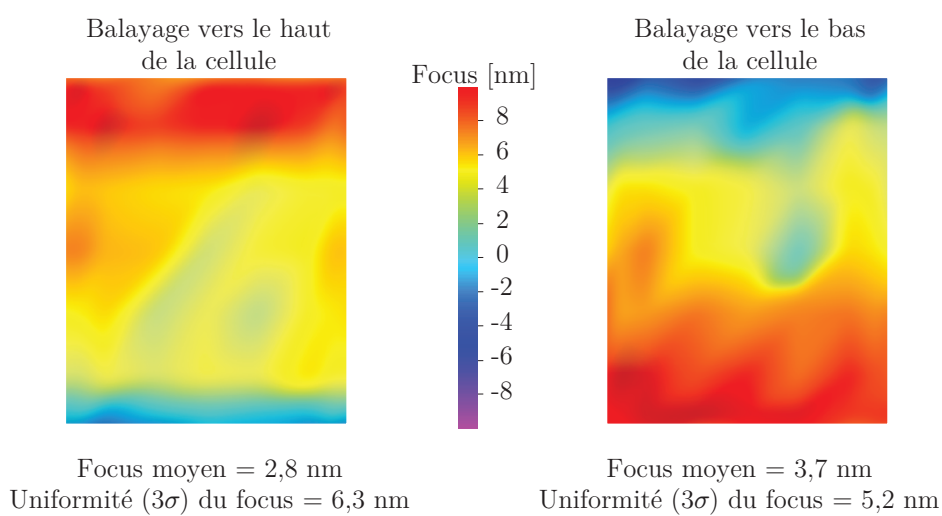


Figure 6.25 – Effet du balayage vers le haut et vers le bas de la cellule sur le focus. La variabilité du focus s'élève en moyenne à 5,7nm. La signature en focus de la cellule dépend des phases d'accélération et de décélération.

l'eau et la résine. Ci-dessous, nous allons étudier les causes des variations des indices. Nous verrons par la suite, que les variations d'indice provoquent des variations de focus.

6.5.6.1 Impact de la longueur d'onde sur l'indice du milieu de propagation

La longueur d'onde de la source du scanner est fixée à $193nm$. Seulement, celle-ci varie en raison des imperfections de la source laser. La figure 6.27 représente la variation de l'indice de l'eau en fonction de la longueur d'onde de la source $\frac{\delta n}{\delta \lambda}$ avec δn la variation de l'indice et $\delta \lambda$ la variation de la longueur d'onde[153].

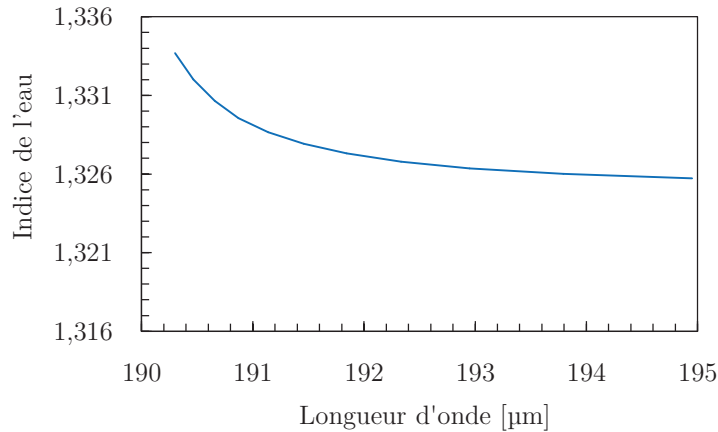


Figure 6.26 – Variation de l'indice du milieu en fonction de la longueur d'onde. L'indice de l'eau dépend de la longueur d'onde [J. A. Hoffnagle, 1999].

6.5.6.2 Impact de la température du milieu de propagation

Globalement, la température influe directement sur les performances des éléments de l'outil de photo-lithographie. Plus précisément, la température peut impacter l'indice du milieu de propagation : l'air, l'eau et la résine[154]. Le graphique 6.27 représente la variation de l'indice de l'eau en fonction de la variation de la température $\frac{\delta n}{\delta t}$ avec δt la variation de la température. Sur le graphique, nous remarquons que l'indice de l'eau diminue lorsque la température augmente.

L'équation 6.4 permet de comprendre facilement comment l'indice de l'eau influe sur le focus.

$$Focus = \frac{Epaisseur\ eau}{2 \times n_{eau}} + \frac{Epaisseur\ résine}{2 \times n_{résine}} \quad (6.4)$$

6.5.7 Impact du capteur de mesure du scanner

La méthode de décorrélation dose/focus nous a également permis de mettre en avant des chutes de focus en bord de plaque. Ce problème était suspecté en observant

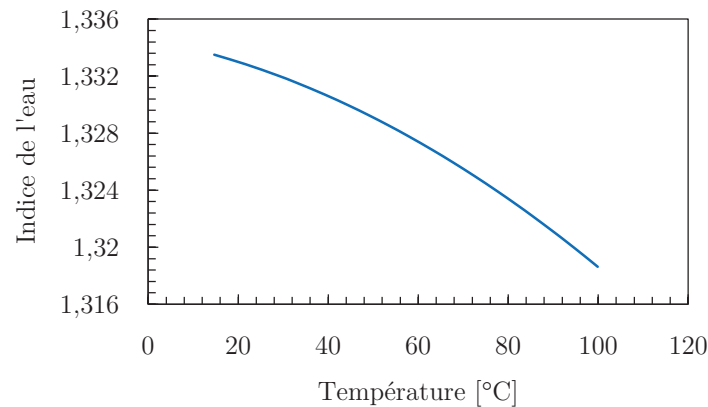
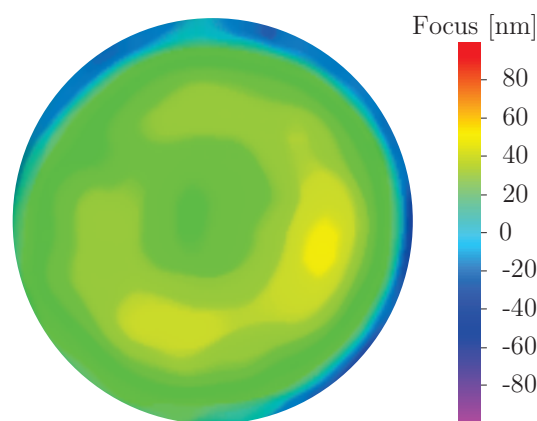


Figure 6.27 – Variation de l'indice de l'eau en fonction de la température [B. Smith, 2004].

une baisse des rendements en bord de plaque pour les technologies C040 et C045. Une analyse d'une plaque, représentée sur la figure 6.28, a permis de représenter le focus intra-plaque. Cette chute de focus en bord de plaque a d'abord été mis sur le compte d'un problème du support plaque du scanner. Suite au changement de ce support, le problème persistait toujours. Le fournisseur de scanner a alors détecté un problème d'algorithme lors de la mesure de planéité de la plaque. En effet, en bord de plaque, une partie du capteur mesurait dans le vide mais les valeurs étaient tout de même injectées dans le produit de convolution réalisé par l'algorithme.



Focus moyen = 5,9 nm
Uniformité (3σ) du Focus = 58 nm

Figure 6.28 – Analyse du focus intra-plaque. Les chutes de focus en bord de plaque sont à l'origine des baisses de rendements.

6.5.8 Comparaison du suivi en focus par la méthode FDO

De la même façon que la dose a été suivie durant 6 mois, les valeurs en focus déterminé par la méthode FDO ont également été comparés aux valeurs du test NPW. La figure 6.29 indique que les 2 suivis coïncident.

La méthode FDO est donc validée et acceptée au sein de STMicroelectronics pour les 2 paramètres photo-lithographiques.

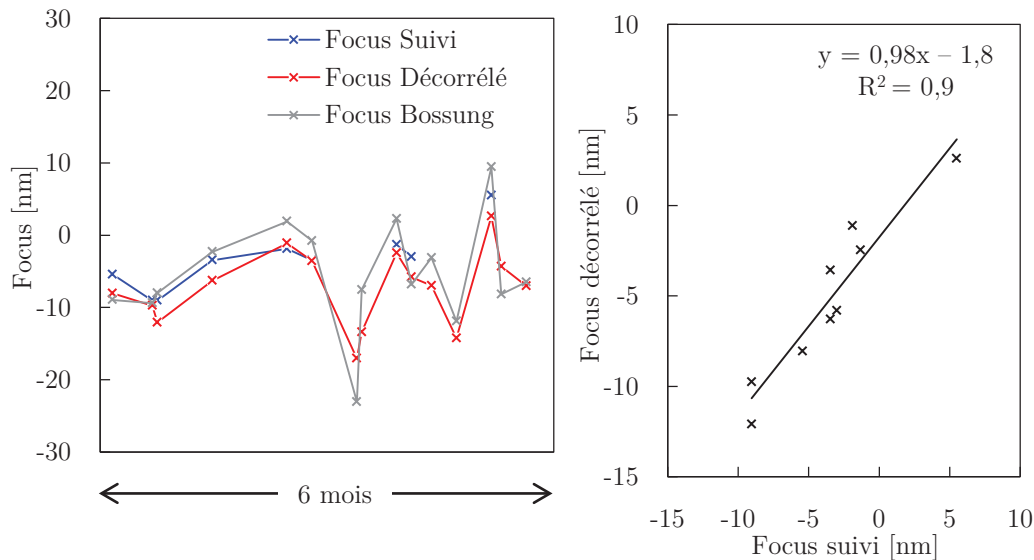


Figure 6.29 – Comparaison entre les valeurs du logiciel de régulation et les valeurs données par la méthode FDO en technologie C045.

Pour aller plus loin, nous avons voulu comparer le focus intra-champ déterminé par la méthode décorrélation, le focus intra-champ déterminé par baseliner[®] et le focus intra-champ déterminé par le test NPW. La figure 6.30 représente les signatures focus intra-champ du scanner 1700i.

Les signatures sont très semblable même si l'échantillonnage est différent. Dans les 3 cas, on retrouve bien un focus faible au centre-haut de la cellule et un focus fort à droite de la cellule. Une demande d'augmentation des points de mesure pour le test NPW a été requise dans le but d'obtenir une signature plus précise du focus intra-champ. Compte-tenu des temps cycle très sévère, notre demande a été rejeté.

6.5.9 Validation du focus par comparaison

La signature du focus intra-plaque est proportionnelle aux mesures du capteur LS du scanner. En effet, dans le chapitre précédent, nous avons vu que le focus de l'équipement était calculé en fonction du capteur LS. Par conséquent, toute varia-

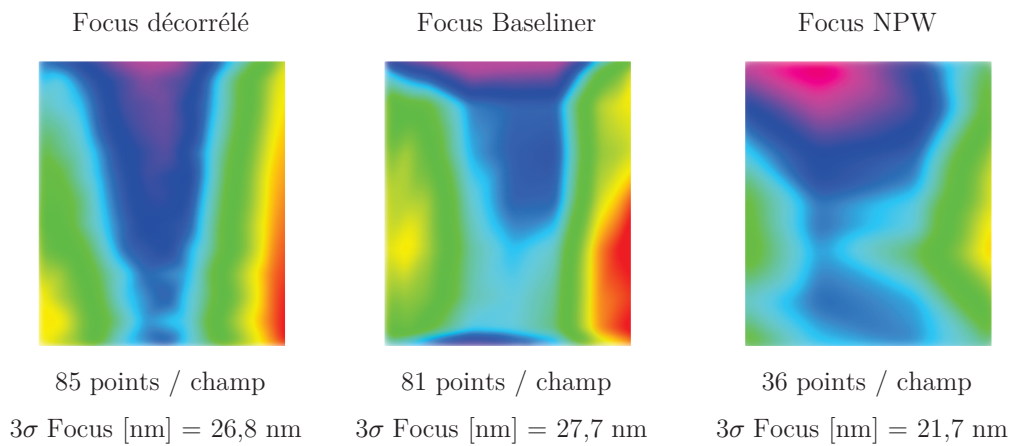


Figure 6.30 – Comparaison du focus dans la cellule en utilisant les 3 méthodes de détermination du focus.

tion mesuré par le capteur LS se répercutera sur la mesure du focus[122]. Le focus déterminé par la méthode de décorrélation doit donc mesurer les mêmes variations que celles mesurées par le capteur LS. La figure 6.31 permet de comparer la signature déterminé par le capteur LS et la signature déterminé par la méthode FDO.

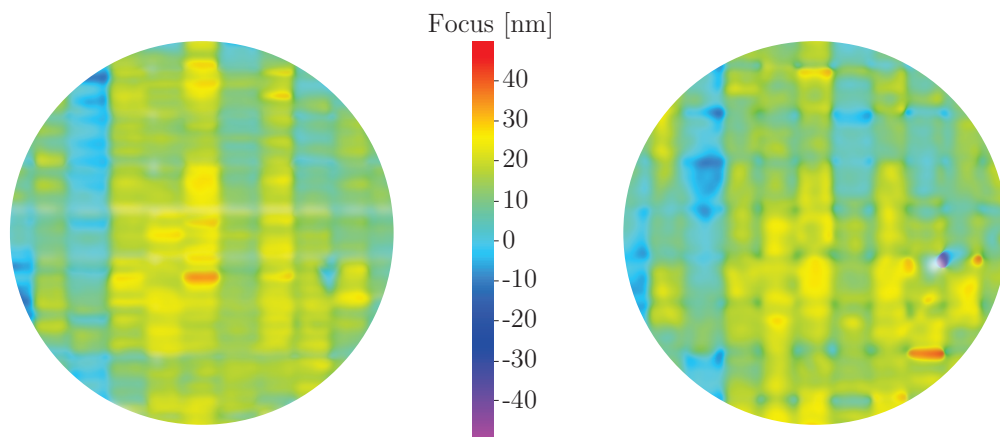


Figure 6.31 – Comparaison des mesures du focus par la méthode de décorrélation à gauche et par le capteur de niveau à droite.

Globalement, les 2 signatures sont semblables. Une droite de corrélation représentée sur la figure 6.32 permet de calculer le coefficient de corrélation $R^2 = 0,973$.

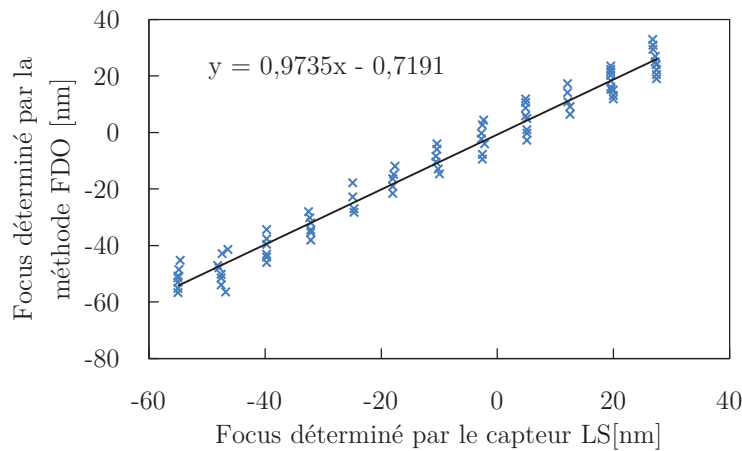


Figure 6.32 – Corrélation entre le focus déterminé par la méthode FDO et le focus déterminé par le capteur de niveau.

6.6 Caractérisation des nouveaux équipements

En 2011, la société STMicroelectronics s'est doté d'un nouveau scanner (ASML NXT 1950i) permettant de réaliser des motifs avec une résolution de $22nm$ [155]. La société ASML fournit l'équipement et des spécifications concernant le CD, la dose, le focus et l'alignement. Pour valider les valeurs de l'équipementier, une campagne de caractérisation de cet équipement a été mise en place. La figure 6.33 regroupe les variabilité du CD, de la dose et du focus intra-plaque. La figure 6.34 regroupe les variabilité du CD, de la dose et du focus intra-champ.

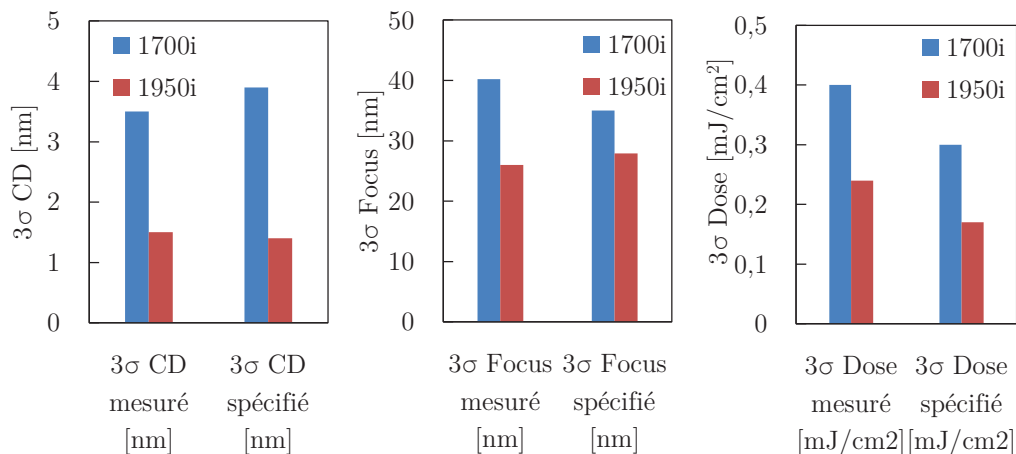


Figure 6.33 – Etude de la variabilité *intra-plaque* du CD, de la dose, et du focus pour le scanner 1950i. Comparaison des valeurs mesurées et des valeurs spécifiées pour 2 générations de scanner dans les mêmes conditions d'illumination.

En utilisant la méthode de décorrélation dose/focus, nous avons été en mesure

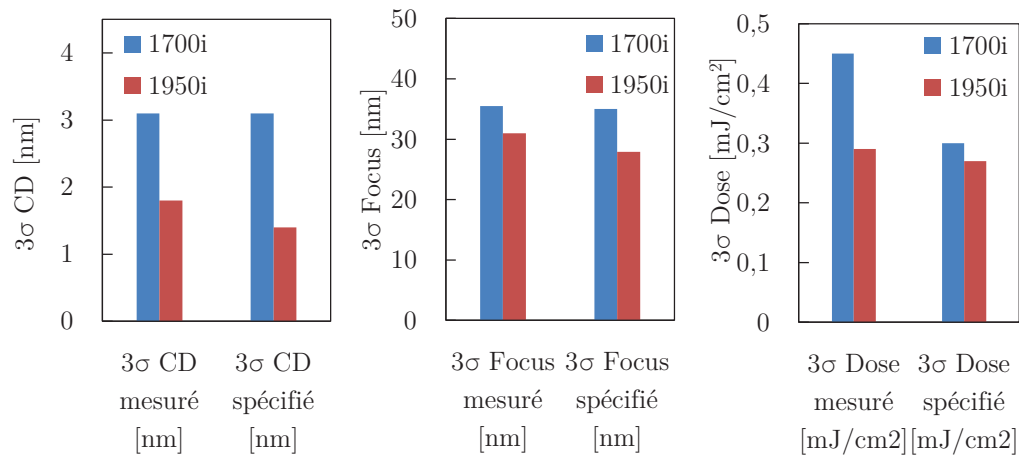


Figure 6.34 – Etude de la variabilité *intra-champ* du CD, de la dose, et du focus pour le scanner 1950i. Comparaison des valeurs mesurées et des valeurs spécifiées pour 2 générations de scanner dans les mêmes conditions d'illumination.

d'accepter l'équipement pour une mise en production. Nous avons pu également déterminer les progrès en terme de variabilité des paramètres photo-lithographique entre le scanner 1700i et le scanner 1950i. En moyenne, la variabilité de la dose et du focus a été réduite de 41%.

Les signatures intra-plaque et intra-champ peuvent montrer des indications primordiales pour les nouveaux équipements. En effet, ces signatures peuvent mettre en évidence des problèmes ou des imperfections liées par exemple aux supports des plaques, à la lentille, etc ...

La figure 6.35 montre, par exemple, une amélioration de l'uniformité du CD de près de 63%. On remarque également une amélioration de la gestion du CD en bord de plaque.

La figure 6.36 montre une gestion différente du focus entre le scanner 1700i et le scanner 1950i. En effet, des zones de défocalisation apparaissent dans le deuxième cas. Cependant, on note une amélioration de la dispersion en focus intra-plaque de l'ordre de 50%.

La figure 6.37 illustre une amélioration de l'uniformité de la dose de près de 24%. Cependant, des zones apparaissent clairement sur la plaque exposée sur le 1950i. Aucune signature scanner n'a été identifiée. Les photo-lithographes se sont alors penchés sur des effets liés à la piste. En effet, les températures des fours n'étaient pas correctement étalonnées. Une action sur la température a été décidée au vue de ces résultats. Par contre, l'effet du balayage, présent sur le 1700i a été corrigé sur 1950i

La figure 6.38 montre une signature CD intra-champ différente principalement

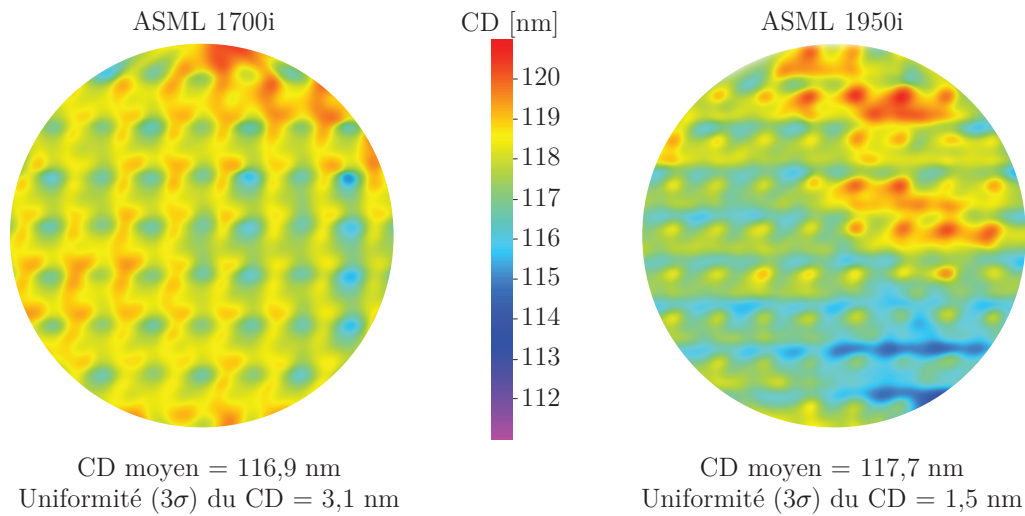


Figure 6.35 – Comparaison des signatures du CD intra-plaque entre le scanner 1700i et le scanner 1950i. Comparaison des valeurs mesurées et des valeurs spécifiées pour 2 générations de scanner dans les mêmes conditions d'illumination.

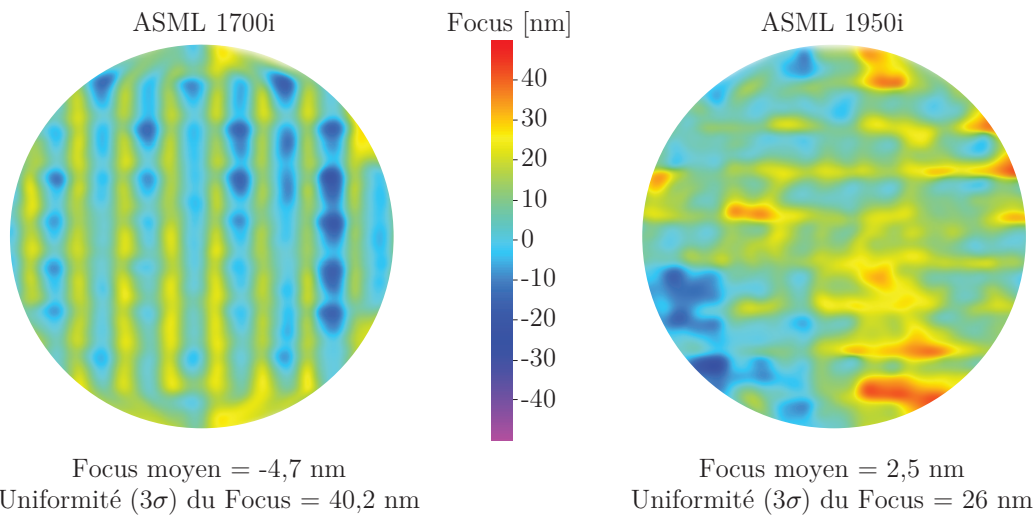


Figure 6.36 – Comparaison des signatures du focus intra-plaque entre le scanner 1700i et le scanner 1950i. Comparaison des valeurs mesurées et des valeurs spécifiées pour 2 générations de scanner dans les mêmes conditions d'illumination.

due à la lentille. En effet, comme nous l'avons vu dans la section 6.5.2, les aberrations optique génère une variabilité CD à l'intérieur même de la cellule. Le gain en terme de variabilité CD intra-champ est de 48%.

On remarque par ailleurs une signature due au réticule. En effet, sur le coin haut droit, la variation du CD est exactement la même. Pour éradiquer ce phénomène, la solution consisterait à retirer la variation du CD du réticule à la variation du CD

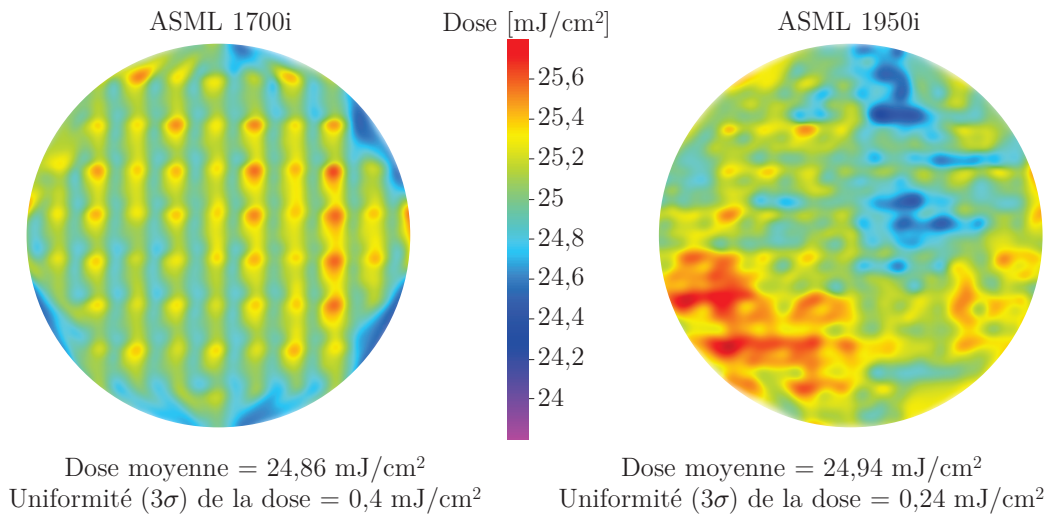


Figure 6.37 – Comparaison des signatures en dose intra-plaque entre le scanner 1700i et le scanner 1950i. Comparaison des valeurs mesurées et des valeurs spécifiées pour 2 générations de scanner dans les mêmes conditions d'illumination.

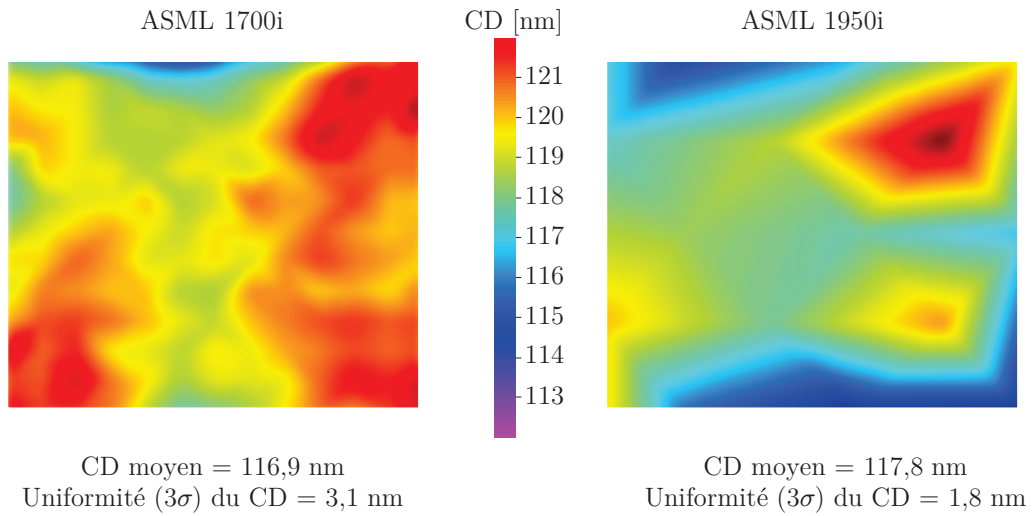


Figure 6.38 – Comparaison des signatures du CD intra-champ entre le scanner 1700i et le scanner 1950i. Comparaison des valeurs mesurées et des valeurs spécifiées pour 2 générations de scanner dans les mêmes conditions d'illumination.

mesuré comme le montre l'équation 6.5.

$$CD_{\text{décorrélé}} = CD_{\text{mesuré}} - \frac{\Delta CD_{\text{réticule}}}{4} \quad (6.5)$$

Cette équation a été utilisée pour déterminer l'astigmatisme dans la section 6.5.2.1.

La figure 6.39 montre une déviation du plan de l'image différente. En effet, les aberrations de la lentille du scanner 1950i ont été travaillées. L'uniformité dans la fente est donc meilleure sur le 1950i, malgré une vitesse de balayage plus importante.

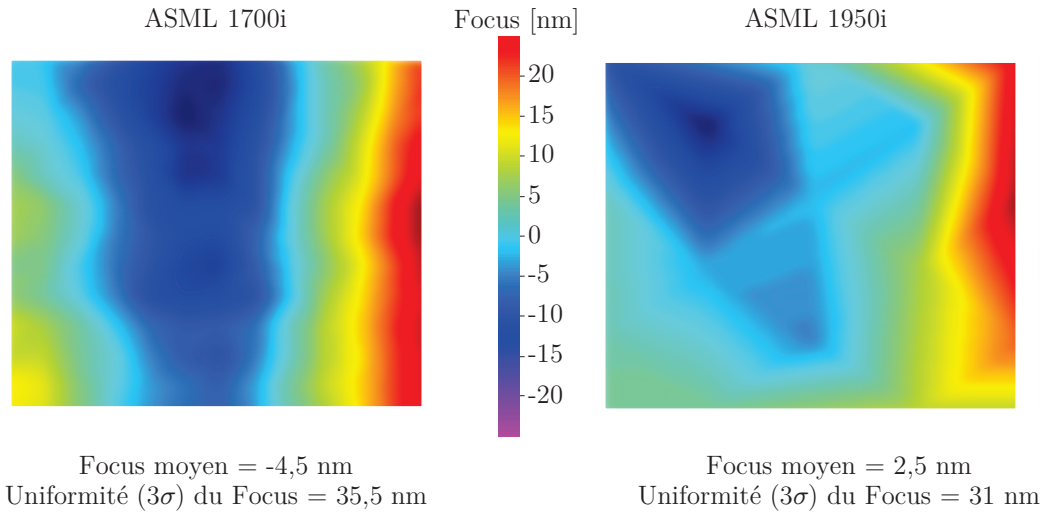


Figure 6.39 – Comparaison des signatures du focus intra-champ entre le scanner 1700i et le scanner 1950i. Comparaison des valeurs mesurées et des valeurs spécifiées pour 2 générations de scanner dans les mêmes conditions d'illumination.

La figure 6.40 montre une amélioration de l'uniformité de la dose de près de 34%.

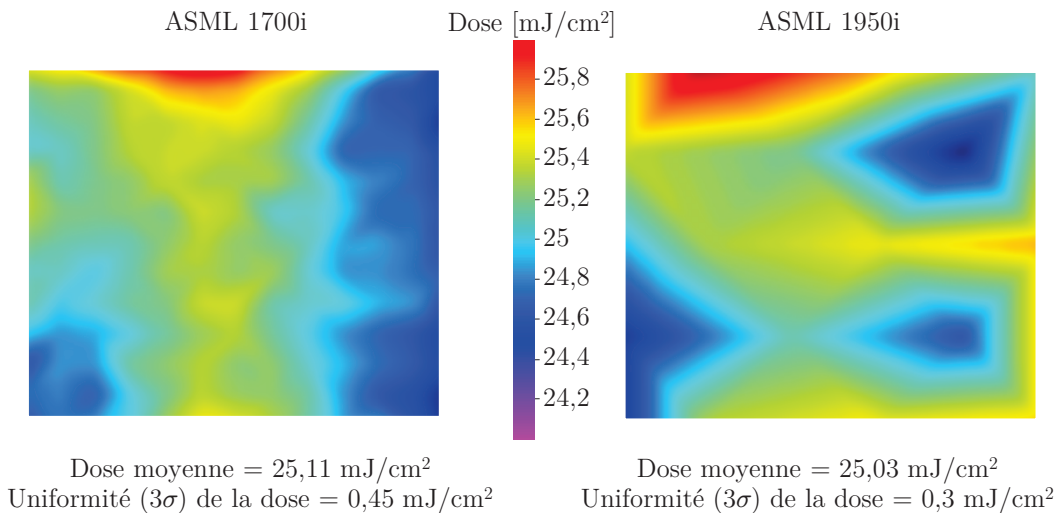


Figure 6.40 – Comparaison des signatures en dose intra-champ entre le scanner 1700i et le scanner 1950i. Comparaison des valeurs mesurées et des valeurs spécifiées pour 2 générations de scanner dans les mêmes conditions d'illumination.

On remarque une signature en haut et en bas de la cellule qui est due à de la

lumière parasite. Cette lumière est issue de l'exposition de la cellule du dessus. Un projet nommée straylight travaille sur la réduction de cette lumière.

6.7 Compensation des erreurs en dose et en focus

Dans les sections précédentes, nous avons utilisé la méthode de décorrélation pour détecter une grande partie des effets de la dose et du focus qui impacte le centrage et la variabilité du CD. Connaissant les erreurs en dose et en focus, il est donc possible de compenser ces erreurs en ajustant la valeur de la dose et du focus lors du procédé de la plaque. La figure 6.41 décrit le dispositif utilisé en manuel pour contrôler et corriger la dose et le focus sur plaque de test. Les premiers tests sont uniquement réalisés sur silicium.



Figure 6.41 – Présentation de la boucle de régulation manuelle permettant d'activer la décorrélation dose/focus sur lot de test.

Pour quantifier le gain obtenu en terme de variabilité CD par la méthode FDO, nous allons comparer les valeurs des variabilités de la géométrie de la résine avec et sans compensation en dose et en focus. Pour cela, on mesure les CD et l'angle inférieur de la résine pendant 6 mois sur des plaques de test. On calcule pour chaque lot la correction de dose et de focus que l'on applique sur le lot suivant. Les résultats de l'activation de la méthode FDO sont représentés sur la figure 6.42. Globalement, la variabilité des 4 paramètres de la résine a été réduite de 50%.

La méthode FDO est donc indispensable pour les technologies futures comme le 20nm. En effet, l'ITRS préconise un contrôle de l'uniformité du CD de l'ordre de 1nm.

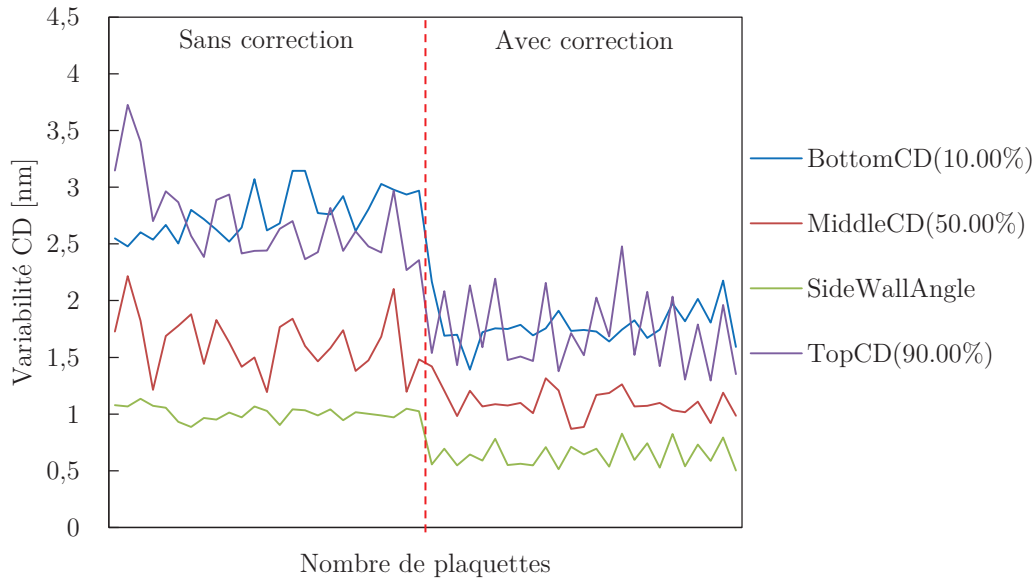


Figure 6.42 – Résultat des variabilités de la géométrie de la résine sans correction et avec correction des paramètres photo-lithographiques. Résultats obtenus sur silicium nu en utilisant les condition d’illumination du niveau active en technologie C040.

6.8 Précision de la méthode FDO sur Silicium nu

L’annexe A décrit de façon détaillé les statistiques et les types d’erreurs. Nous nous intéresserons ici uniquement à la détermination de la précision de la méthode. La précision d’une méthode est donnée par le rapport entre la variation d’un paramètre mesurée Δy pour une variation donnée d’un paramètre machine Δx :

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (6.6)$$

La précision de la méthode FDO, déterminée par une FEM de calibration, se caractérise par la précision en dose S_{Dose} et en focus S_{Focus} . Elle dépend, du motif et de la résine utilisés. On définit alors les sensibilités en dose et en focus par l’équation 6.7 :

$$S_{Dose} = \frac{\Delta CD}{\Delta Dose} \quad S_{Focus} = \frac{\Delta CD}{\Delta Focus} \quad (6.7)$$

Sur silicium, on estime la précision de la méthode en dose à $S_{Dose} = 5nm/mJ$ et en focus à $S_{Focus} = 0,2nmCD/nmF$

6.9 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons tout d'abord caractérisé le centrage et la variabilité du CD intra-plaque et intra-champs. Nous avons ensuite quantifié les effets de la dose et du focus sur la dimension critique en calculant l'impact des variations des paramètres photo-lithographique sur le CD. Nous avons pu mettre en évidence des signatures sur la plaque et dans la cellule. La méthode de décorrélation nous a permis de compenser ces effets en modifiant la valeur d'entrée dans l'outil de photo-lithographie.

La méthode FDO est donc validée et acceptée au sein de STMicroelectronics. La dernière étape est donc tout naturellement de transférer cette méthode sur lot de production. Le chapitre 7 présente donc l'application de la technique sur des plaques comprenant un empilement complexe.

Chapitre 7

Intégration de la méthode FDO dans une boucle de régulation

7.1 Introduction

STMicronics dispose en production d'un système de boucle de régulation capable de réguler la dose et l'alignement pour la photo-lithographie. Pour avoir un procédé dont les caractéristiques sont les moins variables possibles et les plus proches de la cible, il a été décidé d'optimiser la boucle de régulation actuelle avec la méthode FDO. Le but de ce chapitre est donc d'intégrer le paramètre focus dans la boucle de régulation actuelle. Après une description de la mise en place d'une boucle de régulation, nous intégrerons le focus dans une boucle de régulation sur silicium. Cette première boucle de régulation sera activée en mode manuel, c'est-à-dire, que l'envoi des nouvelles données de dose et de focus sera effectué par un opérateur. Après validation de ces résultats, nous débuterons l'intégration du focus dans le système de régulation de la production.

7.2 Définition d'une boucle de régulation

L'objectif des boucles de régulation est de garantir la stabilité des procédés de fabrication tout au long de la vie de l'équipement[16]. Elles permettent également de diminuer l'erreur totale en sortie du procédé. Pour cela, il faut diminuer soit la variabilité lot à lot, soit la variabilité plaque à plaque, soit la variabilité site à site. 4 niveaux d'ajustement sont donc définis :

- Ajustement global : changement de la recette globalement pour tous les lots afin de recentrer le procédé.

- Ajustement au niveau lot : changement de la recette pour chaque lot pour diminuer la variabilité lot à lot.
- Ajustement au niveau plaque : changement de la recette pour chaque plaque pour diminuer la variabilité plaque à plaque.
- Ajustement au niveau de la cellule : changement de la recette du procédé au sein de la plaque même pour diminuer la variabilité cellule à cellule. Par exemple, la dose en photo-lithographie peut être ajustée en fonction de différentes zones de la plaque.

7.2.1 Les différents types de boucles de régulation

L'ajustement de la recette de l'équipement de procédé peut s'effectuer en fonction de différents paramètres. Chaque type de boucle correspond à un type d'ajustement différent :

- La boucle feedback : l'ajustement est effectué en fonction de la sortie du procédé pour le temps précédent.
- La boucle feedforward : l'ajustement est effectué en fonction de mesures ou d'informations provenant d'étapes antérieures au procédé ou de mesures effectuées directement sur l'équipement de procédé.
- La boucle feedback/feedforward : les 2 types de boucles précédemment définis sont utilisés en parallèle.

Les paragraphes suivants décrivent précisément le fonctionnement de chaque type de boucle.

7.2.1.1 Présentation de la boucle feedback

La sortie d'un procédé de fabrication est utilisée pour ajuster la recette pour le prochain temps. Il est à noter que le temps est discret. Il correspond au passage d'une entité, qui est aujourd'hui un lot et qui sera demain, peut-être, une plaque[156]. Une recette correspond à un ensemble de consignes donnée à l'équipement : pression, température, temps, ... La figure 7.1 résume le fonctionnement d'une boucle de régulation de type feedback.

avec X_t , l'entrée du procédé, Y_t la sortie du procédé, \hat{Y}_t , l'estimation de la sortie du procédé, $Cible$, la cible pour la sortie du procédé Y_t , e_t , l'erreur, a_t , l'ajustement de la recette et, d_t , les perturbations du procédé. Le modèle du procédé représenté par l'équation 7.1 est une fonction qui estime la sortie du procédé en fonction de l'entrée du procédé.

$$\hat{Y}_t = f_t(X_t) \tag{7.1}$$

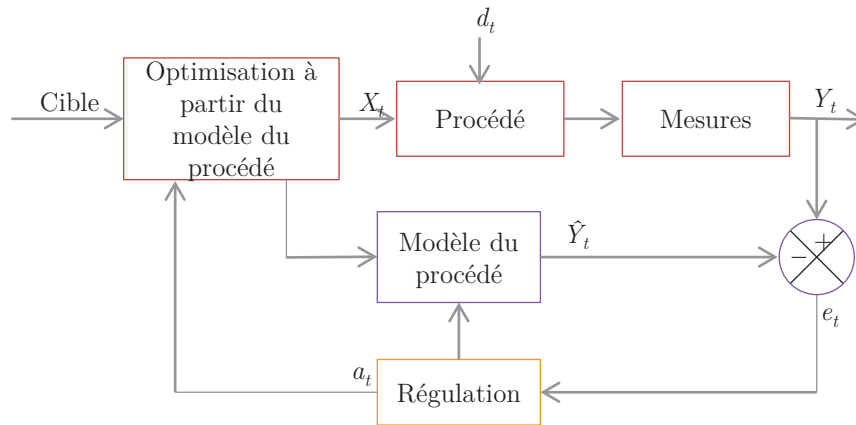


Figure 7.1 – Fonctionnement d'une boucle de régulation de type feedback.

7.2.1.2 Présentation de la boucle feedforward

Des mesures effectuées à une ou plusieurs étapes antérieures au procédé servent à ajuster la recette de fabrication. Les notations sont les mêmes que précédemment et Z_t est la mesure effectuée à une ou des étapes antérieures[157]. Le modèle du procédé est représenté par l'équation 7.2

$$\hat{Y}_t = f_t(X_t, Z_t) \quad (7.2)$$

La figure 7.2 représente le fonctionnement d'une boucle de régulation de type feedforward.

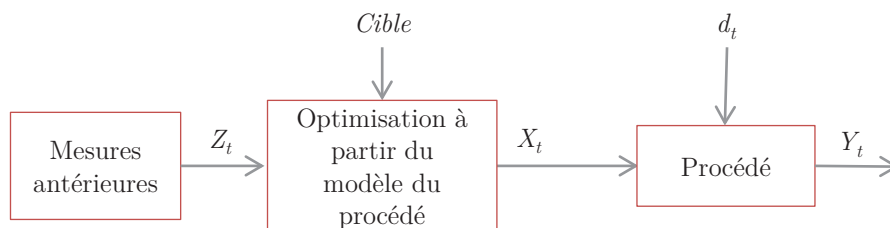


Figure 7.2 – Fonctionnement d'une boucle de régulation de type feedforward.

7.2.2 La métrologie dans une boucle de régulation

La mesure est une étape extrêmement critique dans les procédés de fabrication[158]. Il faut préciser que les mesures en ligne ne sont jamais réalisées directement sur les puces mais dans les chemins de découpes SL^1 autour des puces. En effet, certaines

1. Scribe Lines / Chemins de découpes

mesures sont destructives et risqueraient d'altérer les puces.

Les plaques sont traitées par lot de 25 dans les équipements de photo-lithographie. Pour cela, elles sont regroupées dans des boîtes appelées FOUP. A la fin de l'étape de photo-lithographie, tous les lots sont mesurés. Au sein de ces lots, seules certaines plaques sont mesurées. De plus, les plaques ne sont mesurées qu'en quelques points appelés sites de mesure. L'échantillonnage dépend de la criticité de l'étape du procédé et du type de métrologie. Ainsi dans le cas de la métrologie en ligne, on mesure 1 à 4 plaques par lot. Prendre toujours les mêmes plaques d'un lot permet d'avoir une approche transversale de la mesure. On peut ainsi suivre les mesures effectuées sur une même plaque pour différentes étapes de procédé. Le côté négatif de cette approche est qu'en mesurant toujours les mêmes plaques d'un lot, on introduit un biais dans l'estimation de la variabilité du procédé. Ainsi, il y a parfois des effets «premières plaque». Les mesures d'une plaque sont effectuées en 17 points. Ils sont répartis selon une certaine configuration appelée échantillonnage de mesure. Il n'est malheureusement pas possible d'augmenter le nombre de mesure en raison des temps de cycle. Cependant, un module de métrologie pourrait être installé à la sortie du scanner pour établir une correction plaque à plaque. Si, dans cette configuration, les paramètres photo-lithographiques étaient corrigés, cela permettrait d'obtenir un meilleur centrage et une meilleure uniformité du CD.

En production, seulement 68 points sont mesurés par lot. En scattérométrie, le temps de mesure d'un lot est de 1 minute et 30 secondes. Ce temps est rigoureusement contrôlé en production. Il serait donc impossible de mesurer un plus grand nombre de points. A titre d'information, une plaque comprend en moyenne 80 cellules. Pour établir une correction cellule à cellule, il faudrait donc mesurer au minimum 5 points par cellules soit $80 \times 25 \times 5$ soit 10000 points de mesures par lot. A raison de 2 secondes par mesure, il faudrait donc plus de 5 heures de mesure par plaque.

7.2.3 Mise en place d'indicateurs et de limites de contrôle

Les variables des équipements sont regroupées en trois catégories :

- Celles non collectées,
- Celles dont les données sont collectées sans analyse,
- Celles dont les données sont collectées et analysées.

Les outils R2R² utilisent des systèmes d'analyses univariées et multivariées dans le but de suivre un équipement[159]. En photo-lithographie, l'analyse multivariées

2. Run-To-Run / Boucle de régulation

permet d'analyser les données du balayage, du réticule ou encore de la métrologie. L'outil industriel de collection et d'analyse des données en temps réel choisi sur le site de Crolles2 est la solution Symphony[®]. Cet outil permet, à partir des données temporelles collectées durant le procédé, de créer des indicateurs statistiques pour chacune des variables choisies de l'équipement. Ainsi, différents indicateurs peuvent être calculés tels que la moyenne, l'écart-type ou l'écart maximum. Les indicateurs calculés à partir des courbes temporelles vont dépendre du procédé et du paramètre collecté. C'est à l'ingénieur procédé de déterminer les indicateurs pertinents. A Crolles2, les limites sont actuellement définies par les ingénieurs en se basant sur leurs expériences et leurs connaissances des procédés.

Cette approche de contrôle des équipements requiert toutefois une excellente connaissance des équipements afin d'évaluer la pertinence des paramètres à collecter, des indicateurs à calculer et des limites de contrôle à appliquer. Des limites correctement mises en place sur des indicateurs pertinents permettent de contrôler le procédé en temps réel. Ceci permet un gain de temps mais aussi de précision dans le contrôle. La surveillance du comportement des variables des équipements de production valide ainsi les conditions de procédé lors de chacune des opérations de fabrication.

7.3 Régulation du couple dose/focus

7.3.1 Modélisation du procédé FDO

Une boucle de régulation s'appuie sur la modélisation du procédé. Plus la modélisation est précise, plus la boucle de régulation ajuste finement la recette de production. Nous utilisons donc la méthode FDO définie dans le chapitre 3. Cette méthode s'appuie entre autres sur le modèle mathématique étudié dans cette thèse.

7.4 Intégration au système existant

7.4.1 Etat de l'art de la boucle de régulation

La grandeur mesurée en sortie du procédé de photo-lithographie est pour notre étude le CD. L'alignement possède également une boucle de régulation de façon à assurer une bonne superposition des niveaux du lot suivant. La boucle de régulation d'alignement ne sera pas traitée dans ce chapitre. La boucle de régulation en CD, mise en place dans cet atelier, consiste à ajuster par lot de production la dose d'insolation de la résine car cette dose agit directement sur le CD. La dose est ajustée en

fonction de l'équipement de procédé, du réticule et de l'étape de photo-lithographie concernée. C'est une boucle feedback au niveau du lot. La boucle de régulation actuelle est basée uniquement sur l'énergie d'exposition d'un lot. La figure 7.3 présente le système de régulation photo-lithographique utilisé dans l'atelier. Cette boucle est complétée par un système de suivi au niveau du focus.



Figure 7.3 – Système de régulation en dose, avant les travaux de la thèse, complété par le suivi du focus par le test NPW.

Globalement, le système de suivi et de contrôle de STMicroelectronics ne prend pas en charge tous les effets liés aux paramètres photo-lithographique. La figure 7.4 représente le suivi du focus sur lot de test. D'une part ce test, réalisé sur silicium à l'aide d'un réticule de test, qualifie uniquement l'équipement et, d'autre part, il est réalisé 2 fois par semaine. Il ne peut donc pas prévoir les dérives lentes entre 2 tests. Lorsqu'un test NPW_t , effectué au temps t , signale une forte dérive en focus, il est impératif de vérifier tous les lots de production qui ont été exposés entre le test NPW_{t-1} et NPW_t

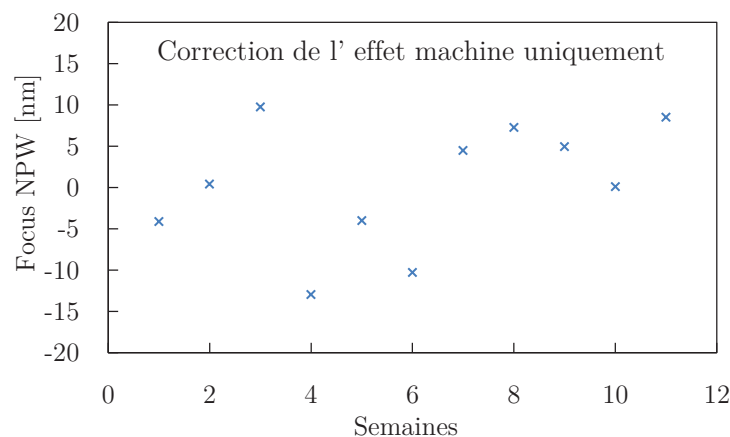


Figure 7.4 – Suivi du focus par le test NPW. Ce test est réalisé avec les conditions d'illumination suivantes : $NA = 1,2$, $\sigma = 0,6$ et une épaisseur de résine de 170nm.

La dose est corrigée en mesurant un motif directement sur lot de production. Elle dépend donc des niveaux de production, des réticules, des équipements et y compris des équipements de mesure. La figure 7.5 représente le suivi et la correction de la dose à l'aide du logiciel de régulation.

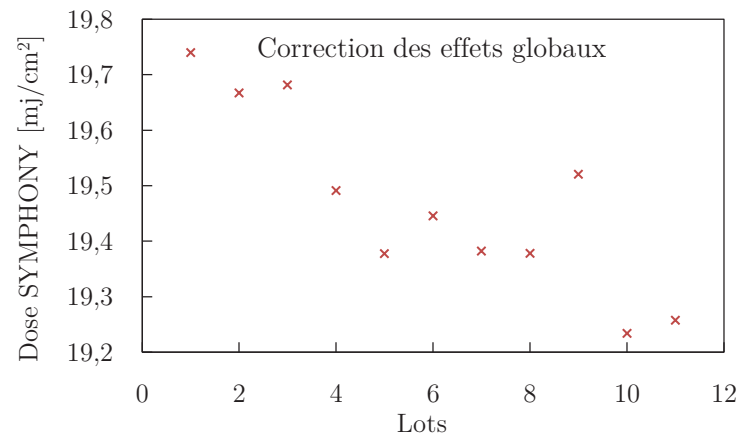


Figure 7.5 – Suivi de la dose à l'aide du logiciel de régulation *Symphony*[®] pour le niveau Active en technologie C045.

L'objectif principale de la nouvelle boucle de régulation est donc de pouvoir suivre et corriger la dose et le focus directement sur lot de production comme le montre le graphique 7.6. De cette façon, tous les éléments contributeurs aux dérives de la dimension critique seront suivis.

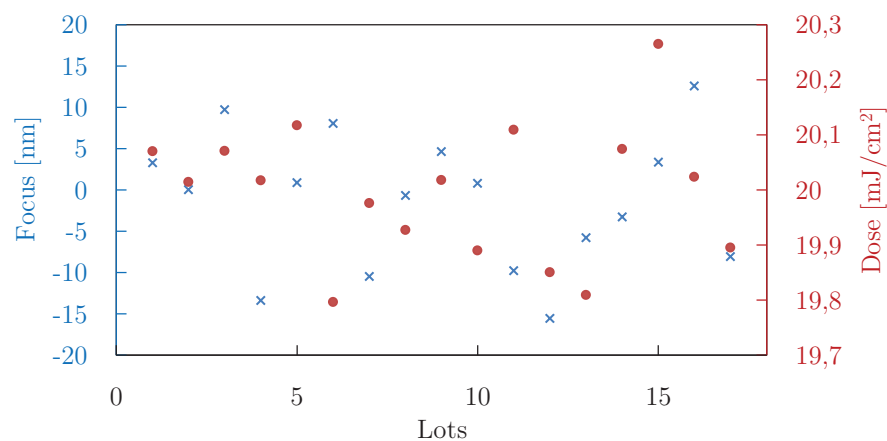


Figure 7.6 – Simulation de la nouvelle boucle de régulation utilisant le logiciel de régulation *Symphony*[®].

7.4.2 Présentation du logiciel de régulation de STMicroelectronics

Le logiciel Symphony[®] a été spécialement conçu pour gérer les boucles de régulation existantes[3]. C'est une partie purement informatique où il faut implémenter les éléments définis dans les étapes précédentes. Cette application est lourdement paramétrée pour prendre en compte les effets des réticules, des équipements d'exposition, des équipements de métrologie ou encore des niveaux des produits. Ce logiciel peut également s'affranchir de certains effets comme l'effet du balayage en choisissant un échantillonnage de mesures particulier. Symphony[®] est en clair un contrôleur coopératif et suit ainsi la tendance générale de l'évolution des régulations R2R. Ce logiciel dispose également d'une partie simulation déterminante.

A partir des données de production, on connaît la valeur du CD pour des consignes de dose et de focus particulières comme illustrée sur la figure 7.7. On va utiliser ces données pour estimer, par simulation, le CD pour des valeurs de dose et de focus différentes de celles de la production. On définit donc un lien entre le CD et le couple dose/focus. On peut ainsi connaître le CD pour des couples différents, relativement proches du couple dose/focus initial.

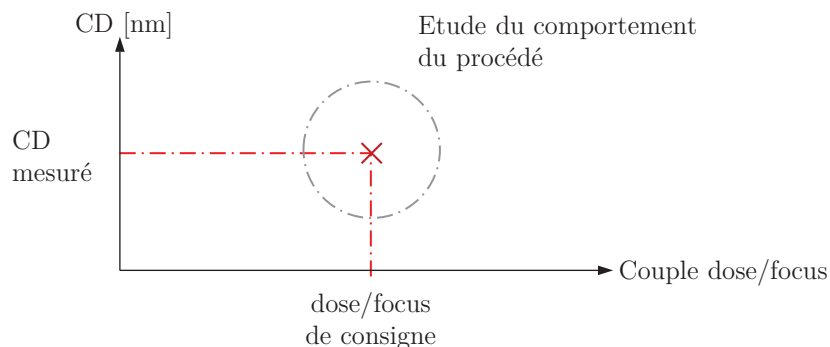


Figure 7.7 – *Mesure de la dimension critique en connaissant le couple dose/focus initial.*

7.4.3 Simulation du procédé dans Symphony[®]

La simulation d'une boucle de régulation est extrêmement complexe. Un procédé de simulation est au préalable défini. Il permet, à partir des données de production, de comparer les performances photo-lithographique du CD et de l'alignement, d'optimiser les paramètres de dose et de focus et de calculer le gain en terme de variabilité CD[160]. A la fin de cette étape, le choix du couple dose/focus est effectué. Le gain en CD de la boucle est également estimé par simulation. Il correspond au gain du procédé en terme de centrage et de variance. Cette étape est cruciale. En effet, la

continuation de la mise en place de la boucle en dépend. Si le gain potentiel de la boucle n'est pas suffisant, la boucle de régulation n'est pas mise en production.

7.4.4 Mise en place de la nouvelle boucle de régulation

La figure 7.8 représente la marche à suivre pour activer un procédé de simulation. Globalement, 4 acteurs participent à la simulation :

- Le procédé actuel qui fonctionne aujourd'hui dans l'atelier.
- La simulation, qui récupère une partie de la correction actuelle.
- La correction qui s'effectue uniquement sur lot R&D.
- La production. L'étape finale qui validera le procédé de boucle de régulation.

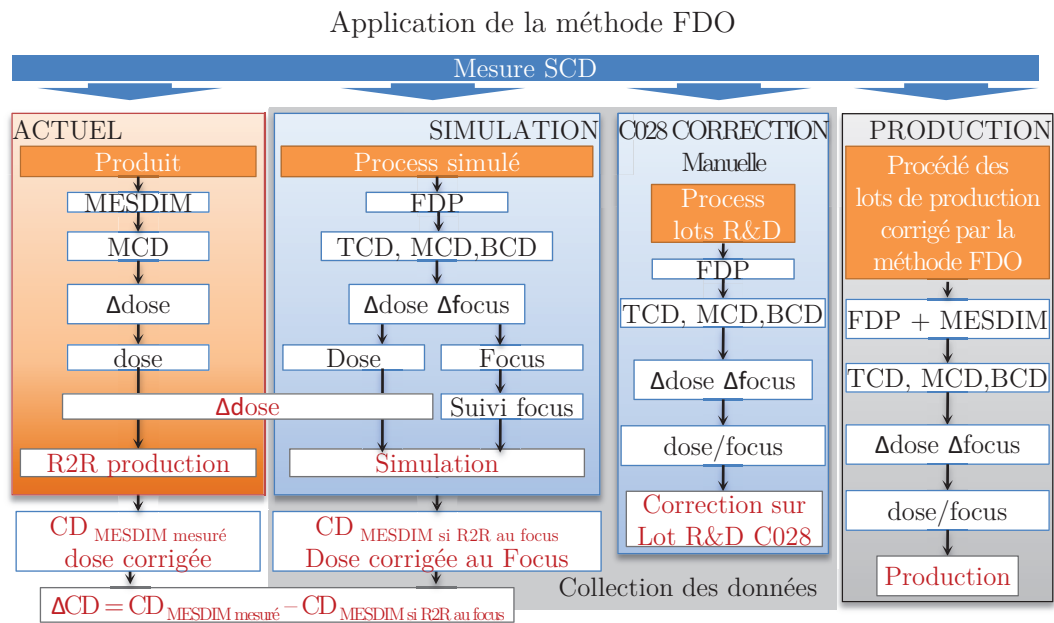


Figure 7.8 – Procédé de mise en place d'une boucle de régulation utilisant la boucle de régulation actuelle, une simulation, une première correction sur lots R&D et la production.

7.4.5 Intégration de la nouvelle boucle de régulation

La nouvelle boucle de régulation en dose et en focus est une modification de la boucle de régulation en dose actuelle. En effet, La boucle existante sera scindée en 2 boucles, l'une pour la dose, et l'autre, pour le focus. Cependant, il ne faut en aucun cas perturber la boucle de régulation en dose sous peine de déstabiliser le système actuel. Pour cela, la marche à suivre consiste à valider manuellement la boucle de régulation sur silicium et sur lot R&D avant son intégration complète au système de production.

Pour garantir les spécifications des produits, il a été décidé de mesurer le MESDIM³ et le motif FDP pour qualifier le procédé photo-lithographique. La nouvelle boucle de régulation est représentée sur la figure 7.9

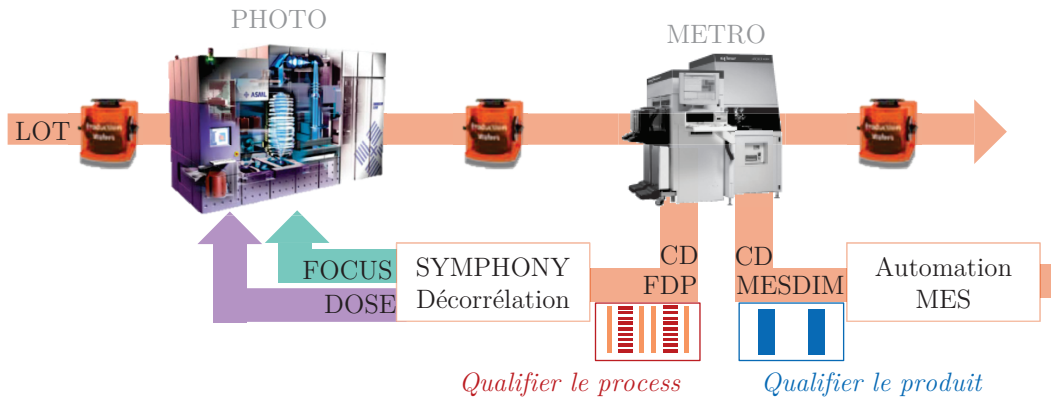


Figure 7.9 – Futur système de régulation dose/focus. Les 2 motifs présent sur plaque de production permettront un suivi du procédé et du produit.

Cette modification de la boucle existante s’insèrera parfaitement dans le cadre de l’atelier de photo-lithographie. En effet, l’atelier est déjà équipé de système correctif performant comme Baseliner[®] ou Agile[®]. La méthode de décorrélation viendra compléter le dispositif actuel pour répondre au mieux aux exigences en terme de variabilité CD. La figure 7.10 présente le dispositif final et expose les différents contributeur traités par les dispositifs.

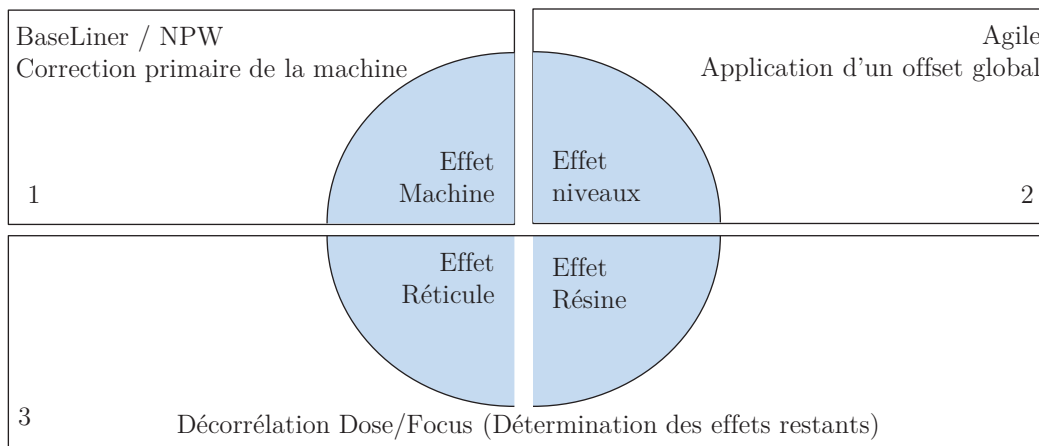


Figure 7.10 – Dispositif de contrôle total de l’atelier photo-lithographie. Chaque contributeur est corrigé par un système de régulation performant.

3. Measure Dimension / Mesure dimensionnelle du produit

7.5 Validation de la boucle de régulation sur silicium

La première étape de la validation de la boucle de régulation s'effectue sur silicium. 3 expériences sont réalisées pour déterminer le gain sur la variabilité du CD. Ces expériences représentées sur la figure 7.11 montre le gain en CD obtenue à l'aide de la méthode de décorrélation FDO.

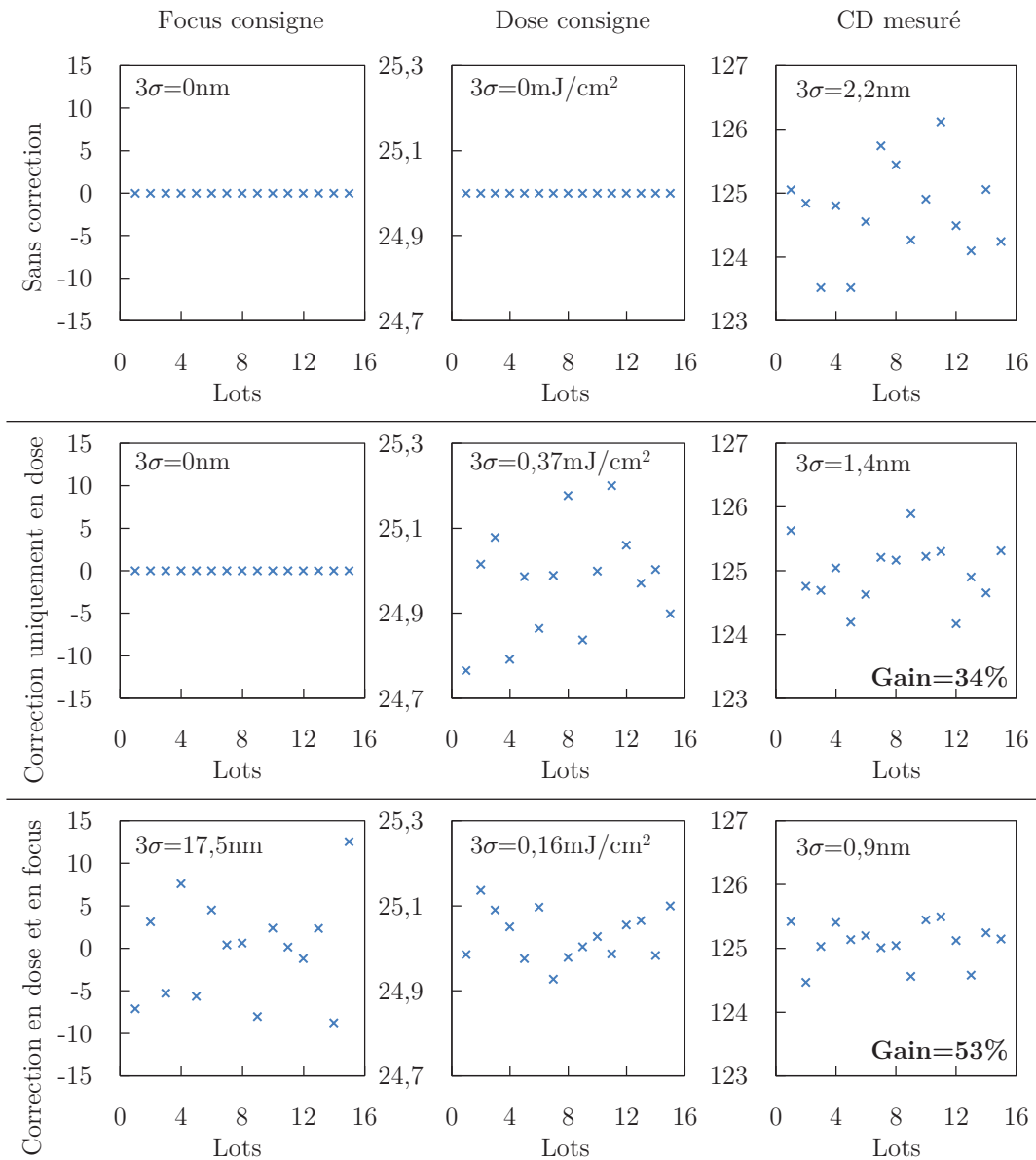


Figure 7.11 – Détermination du gain sur la variabilité CD en activant tout d'abord la dose et ensuite le focus.

La méthode de décorrélation peut ainsi être activé en mode manuel c'est-à-dire

que les nouvelles valeurs de dose et de focus seront paramétrées dans l'équipement par un opérateur. Ces valeurs sont déterminées en utilisant l'algorithme mathématique de la méthode FDO. Ce mode permet de calculer le gain de la variabilité CD de la méthode par rapport à la variabilité CD obtenue en production. Nous avons donc appliqué la méthode sur le niveau active et sur le niveau grille en technologie $28nm$. Les niveaux d'empilement sont représentés sur la figure 7.12

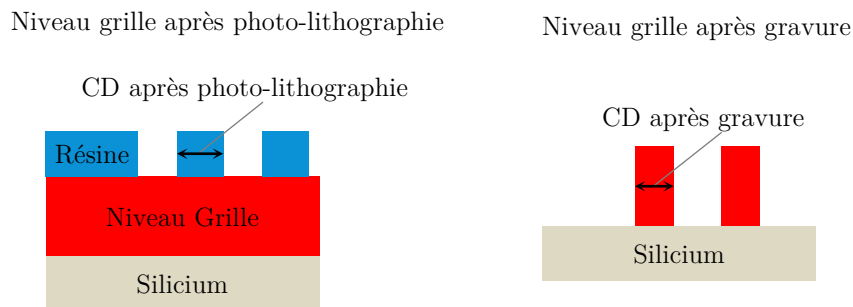


Figure 7.12 – Représentation des niveaux d'empilement de la grille après photo-lithographie et après gravure pour la technologie C028.

L'empilement se compose d'une couche de di-électrique high-k (HKMG), d'une couche de poly-silicium et d'une couche de TEOS.

7.5.1 Correction sur lots de production

La décorrélation dose/focus doit donc respecter les temps de mesures des outils métrologiques. Par conséquent, les opérations de mesures de la décorrélation sont identiques à celles effectuées par la production. La méthode FDO a été appliquée en technologie C028 et sur les niveaux active et grille. Après l'application de la méthode, la variation de l'angle de la résine sur le niveau grille, représenté sur la figure 7.13, est donc réduite de 23%.

La variabilité du CD, représenté sur la figure 7.14, a aussi été réduite de 20%.

Le gain de la méthode de décorrélation est inférieur à nos attentes. En effet, sur un empilement de base, la méthode permettait de réduire la variabilité du CD de l'ordre de 41%. La mesure sur niveaux complexes, nécessite des bibliothèques scattérométriques robustes et adaptées. Pour une précision extrême, les bibliothèques de métrologie doivent être optimisées dans le but d'obtenir un contrôle sur le CD et sur l'angle inférieur de la résine le plus grand possible. Le CD après gravure est la dimension la plus importante du patterning. Dans le chapitre 1 nous avons décrit le lien entre la pente de la résine et le CD après gravure. La figure 7.15 montre que la réduction de

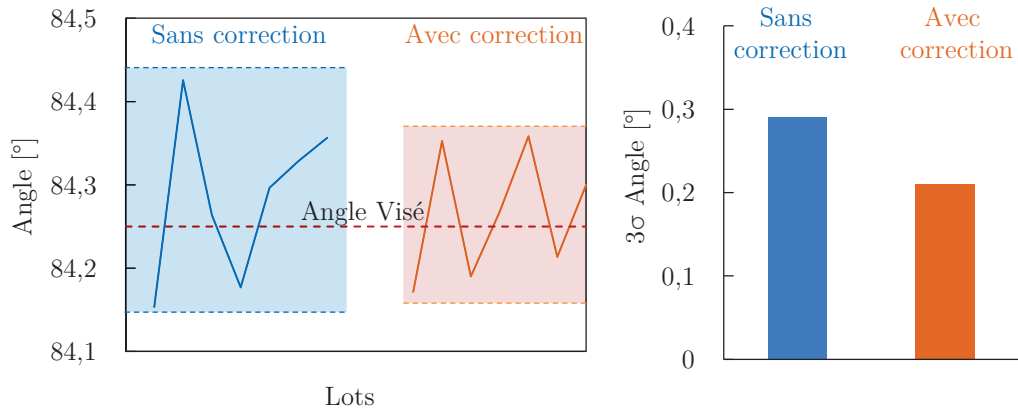


Figure 7.13 – Variation de l'angle de la résine avant et après correction. Comparaison des valeurs mesurées en technologie C028 et sur le niveau grille après photo-lithographie.

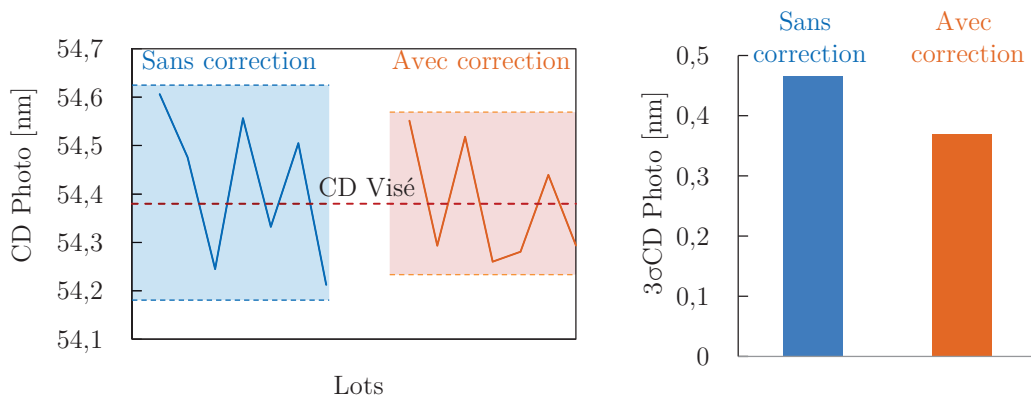


Figure 7.14 – Variation de la dimension critique de la résine après photo-lithographie avant et après correction. Comparaison des valeurs mesurées en technologie C028 et sur le niveau grille après photo-lithographie.

la variabilité de l'angle induit une réduction de la variabilité du CD après gravure.

Globalement, l'uniformité du CD après gravure a augmenté de 14% en utilisant la méthode de décorrélation dose/focus. Pour améliorer d'avantage ce résultat, il existe 2 axes d'études :

- Augmenter la précision de la mesure afin d'obtenir une correction plus précise.
- Augmenter le degré de correction, c'est à dire, corriger la dose et le focus cellule à cellule.

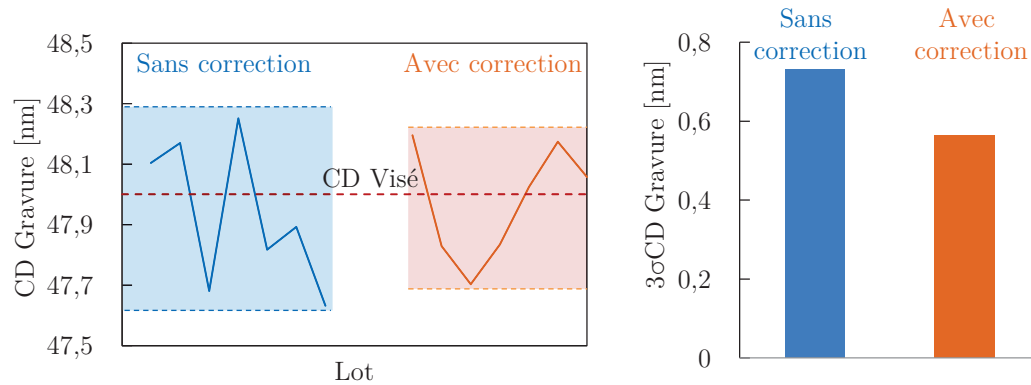


Figure 7.15 – Variation de la dimension critique de la résine après l'étape de gravure avant et après correction. Comparaison des valeurs mesurées en technologie C028 et sur le niveau grille après gravure.

7.5.2 Correction cellule à cellule par la méthode FDO

En mesurant chaque cellule d'une plaque, il est possible de déterminer le focus et la dose pour toutes les cellules. Cette technique, complexe à mettre en place industriellement, réduit la dispersion des paramètres géométriques du motif de résine de l'ordre de 50%. La figure 7.16 représente la cartographie de la dose et du focus paramétrée dans l'équipement pour une correction cellule à cellule.

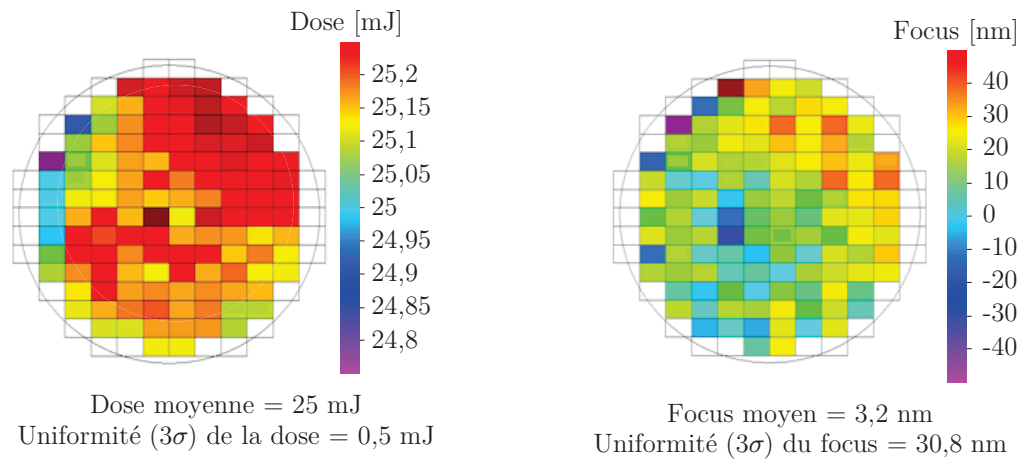


Figure 7.16 – Procédure de correction de la dose et du focus pour chaque cellule. Chaque cellule présente une compensation en dose et en focus.

Le lot suivant est aussi mesuré cellule à cellule pour déterminer le gain réel d'une telle correction. Le tableau 7.1 qualifie l'impact d'une correction cellule à cellule sur le CD au pied de la résine, le CD à mi-hauteur et l'angle inférieur de la résine.

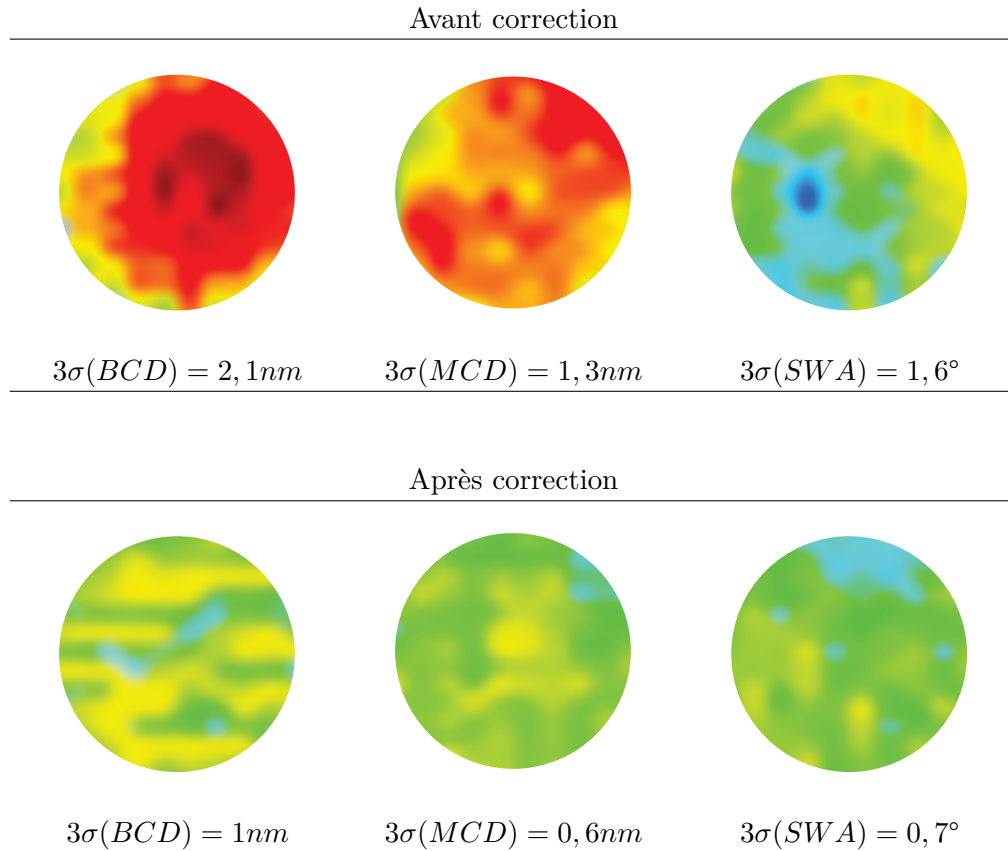


Tableau 7.1 – Impact de la correction cellule à cellule sur le Bottom CD, le Middle CD et l'angle inférieur de la résine. Un gain moyen de 50% est mesuré.

7.6 Conclusion

Le chapitre 7 a présenté une méthodologie complète pour la mise en place d'une boucle de régulation dans l'atelier photo-lithographie. Cette méthodologie, appliquée à la régulation de la dose et du focus sur l'équipement, a permis de démontrer la faisabilité de la méthode. La combinaison des 2 boucles dose/focus a permis, de recentrer le CD moyen en milieu des spécifications et, un gain significatif de 20% sur l'uniformité du CD. On a vu également que le sensibilité de la méthode pouvait être améliorée en optimisant la sensibilité de l'équipement de mesure. Une autre évolution plus poussée de cette régulation consisterait à ajuster la dose et le focus de plaque à plaque voire même à l'intérieur de la cellule. En effet, la régulation cellule à cellule apporterait un gain significatif de 50% sur l'uniformité du CD

Conclusion générale et perspectives

LA variabilité paramétrique de la technologie CMOS avancée, constatée en bout de chaîne de fabrication, requiert la mise en place d'actions appropriées, afin d'en réduire l'ampleur. Ces actions sont d'autant plus essentielles que la variabilité paramétrique affecte les rendements et produit une image défavorable de la fabrication des circuits auprès des clients internes (les divisions) et externes. Les travaux présentés dans le cadre de cette thèse portent sur la détermination simultanée de la mise au point et de la dose d'un équipement de micro-lithographie optique améliorant principalement l'uniformité et le centrage de la dimension critique des technologies sub $45nm$. L'objectif majeur de la thèse consistait à créer et à mettre en pratique une méthodologie précise, permettant l'implémentation de boucles de régulation en micro-électronique. Cet objectif a été pleinement rempli avec la création de cette méthodologie. Sa faisabilité a été prouvée grâce à son application aux boucles de dose et de focus dans l'atelier de photo-lithographie.

Dans la première partie de cette thèse, nous avons conduit une campagne sur la détermination des paramètres photo-lithographique en décrivant les effets de la dose et du focus sur la dimension critique. Nous avons présenté les différentes méthodes de détermination de la dose et du focus et nous avons mis en évidence le poids important du système d'équation de décorrélation de la dose et du focus développé au chapitre 3.

Dans la deuxième partie du manuscrit nous avons créé un motif adapté aux règles des paramètres de l'équipement. Ce motif doit cependant être adapté en fonction de la technologie, du niveau, mais aussi, de l'outil métrologique. Ce principe a d'ailleurs permis de présenter le concept de création de mires présenté au chapitre 4. Dans le chapitre 5, nous avons fait l'analogie entre la théorie et la pratique en appliquant les principes de formation des images à l'outil photo-lithographique.

La méthode complète de décorrélation dose/focus a été décisive pour quantifier

les erreurs de la dose et du focus lors de l'exposition des plaques. Cette action a permis de mettre en évidence des effets dus aux équipements, aux plaques et aux technologies. Afin de réduire la variabilité paramétrique temporelle et notamment lot à lot, nous avons investi le domaine du contrôle statistique avancé des procédés, en l'occurrence les boucles de régulation R2R. Nous avons réalisé un état de l'art des boucles de régulation, potentiellement envisageables dans le contexte d'une fabrication de semi-conducteurs. Nous avons simulé le comportement de la boucle de régulation sur les premiers niveaux de la technologie $28nm$.

Cette thèse a débouché concrètement sur le développement d'une boucle de régulation de compensation. Le contrôleur compense la déviation du CD, mesurée par scattérométrie, en ajustant la dose et le focus de l'équipement. Son implémentation a conduit à une réduction de la variabilité de la dimension critique de l'ordre de 20%. Le déploiement de cette double boucle doit venir poursuivre et achever la boucle de régulation existante. Grâce à l'implantation de la méthode FDO dans la boucle de régulation, nous avons pu ainsi atteindre les standards mondiaux en terme de variabilité CD de la technologie CMOS $28nm$ et CMOS $20nm$.

Cet outil de régulation est vite devenu un outil clé dans le contrôle des procédés de la technologie $28nm$, et il est d'ores et déjà en cours d'évaluation pour une technologie plus avancée (CMOS $20nm$).

Nous avons toutefois identifié des faiblesses qui pourraient éventuellement altérer la capacité du contrôleur à centrer les produits.

Premièrement, la méthode de décorrélation, basée sur une différence de focus entre le pied et le sommet de la résine, dépend de la hauteur de la résine. Par conséquent, l'erreur en dose et en focus dépend du procédé de couchage de la résine.

Deuxièmement, la création des modèles métrologiques est extrêmement complexe et induit une imprécision sur les mesures et un temps de développement trop important. Pour remédier à cela et augmenter la robustesse de la régulation face aux fluctuations de dose et de focus, nous avons proposé de créer localement, sur un réticule, une zone défocalisée permettant d'obtenir une méthodologie plus adaptée. L'optimisation de la méthode à l'aide du réticule DAFT permet de s'affranchir des précisions agressives demandées et de la hauteur de résine. Les expérimentations sur ce réticule sont actuellement en cours chez STMicroelectronics

Les perspectives à court terme de ce travail se situent au niveau de la diffusion des méthodes présentées dans ce mémoire auprès des ingénieurs du site industriel de Crolles2. Ce travail de diffusion doit également s'accompagner du déploiement des outils permettant l'application de ce nouveau concept à savoir :

- Créations et simulations des motifs en fonction des procédés, des technologies et des niveaux.
- Optimisation des bibliothèques métrologique pour améliorer la précision de la régulation.
- Intégration plus fine du rôle des contributeurs au système de régulation (modules constituant une piste, etc ...).

A plus long terme et pour assurer un contrôle optimum de la variabilité des procédés, il est intéressant d'étudier complètement le fonctionnement de la régulation cellule à cellule (puce à puce). L'objectif est de définir un échantillonnage de taille plus importante et une méthodologie afin de corriger plus précisément l'uniformité et le centrage du CD.

La seconde voie consiste à utiliser des méthodes de simulations de dose et de focus afin de modéliser complètement le comportement physique de la dimension critique et par conséquent prédire le résultats sur les plaques.

Le succès de ce dernier axe de recherche réside dans la possibilité de prédire précisément le résultat sur la plaque (concept de "Métrologie virtuelle").

Annexe A

Statistiques et types d'erreurs

A.1 Rappels de statistiques

En métrologie, on calcule généralement deux valeurs :

- la moyenne, qui représentera la « valeur » de la mesure.
- l'écart type, qui représente l'étalement des valeurs autour de la moyenne et qui permet d'estimer des erreurs de mesure.

La valeur moyenne μ est exprimée mathématiquement comme la somme des valeurs mesurées x_i , divisée par le nombre de ces valeurs N :

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (\text{A.1})$$

L'écart type σ est exprimé mathématiquement, comme la racine carrée de la variance V , celle-ci mesurant la distribution des valeurs autour de la moyenne. La variance est définie comme étant la moyenne des carrés des différences entre les valeurs mesurées et la moyenne.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (\text{A.2})$$

$$V = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2 \quad (\text{A.3})$$

En mesure physique, on utilise généralement une répartition gaussienne pour représenter un phénomène aléatoire. Si l'on réitère N fois une même mesure, pour laquelle il existe une incertitude aléatoire¹, les mesures se répartissent, selon une

1. On considère que les N résultats sont statistiquement indépendants

courbe de Gauss, caractérisée par sa valeur moyenne μ et son écart type σ , dont l'expression mathématique est la suivante :

$$n(x) = \frac{N}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (\text{A.4})$$

A.1.1 Définition de la répétabilité et de la reproductibilité

Il s'agit d'une analyse de variance dont l'objectif est de quantifier la contribution de plusieurs facteurs pouvant contribuer à la variabilité d'une mesure à savoir :

- La variabilité répétition. C'est la variabilité aléatoire des résultats d'une série de déterminations d'un même échantillon effectuée dans des conditions très proches.
- La variabilité temporelle ou reproductibilité. C'est la variabilité aléatoire des résultats de plusieurs déterminations d'un même échantillon, effectuées dans un temps t , donc dans des conditions qui peuvent être expérimentalement différentes.
- La variabilité humaine².
- La variabilité du processus de fabrication.

A.1.2 Définition de la précision des mesures

La définition du terme «précision» varie d'un auteur à l'autre et ce terme inclut soit uniquement la reproductibilité et la répétabilité, soit également la notion de justesse avec un sens qui rejoindrait donc l'incertitude globale. Il faut noter que la norme NF X 07-001 «Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie» définit la précision comme étant l'incertitude totale. Lorsqu'on utilisera Le terme «précision», on fera référence à l'incertitude totale.

A.1.3 Concept d'incertitude totale

L'incertitude totale résulte de la composition de l'ensemble des erreurs. Sur un plan statistique, il s'agit de prendre en compte l'ensemble des variances induites par les différentes variables.

$$I = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sigma^2} \quad (\text{A.5})$$

2. La variabilité humaine est liée à l'environnement de la salle blanche comme par exemple l'effet opérateur

A.2 Type d'erreur

A.2.1 L'erreur systématique

L'erreur systématique est définie comme étant une valeur qui s'écarte systématiquement de la valeur visée. L'absence de contrôle et de correction des facteurs d'influence comme l'erreur des réticules ou encore les aberrations de la lentille amènent une erreur systématique impactant sur le CD. Cette erreur intervient dans la notion de justesse. En effet, si les erreurs systématiques sont compensées, le $CD_{mesuré}$ sera égal au $CD_{visé}$ pour un nombre important de mesure.

A.2.2 L'erreur accidentelle ou aléatoire

Les variations aléatoires caractérisent des phénomènes non-déterministes imprévisibles, et qui peuvent être modélisées par une certaine loi de probabilité. Concernant leur répartition spatiale, on distingue les variations globales et les variations locales. Les variations globales font référence aux fluctuations d'un paramètre dont la valeur reste constante au niveau d'une même puce mais varie entre deux puces d'une même plaquette de silicium, de plaquettes différentes ou même d'usines de fabrication différentes.

A.2.3 Définition de la dispersion globale

Elles résultent des variations des procédés de fabrication comme la non-uniformité des températures de recuit, la variation de focus du système optique ou encore, un calibrage de machines légèrement différent entre deux usines de fabrication. Elles présentent en général un caractère systématique, souvent modélisable spatialement sur la plaquette de silicium. Cependant, comme le concepteur ne connaît pas le futur emplacement de sa puce sur la plaquette, les variations globales sont souvent modélisées lors de la conception par des variables aléatoires.

A.3 Echantillonnage et points de mesure

La source d'erreur majeure sur le résultat des mesures provient de l'échantillonnage lui-même. En faisant une seule mesure ou même un petit nombre de mesures, il est difficile d'avoir un résultat vraiment représentatif de la valeur. Il serait nécessaire en fait de déterminer un intervalle de confiance de nombre de mesure prenant en compte toutes les fluctuations. Cette détermination, qui nécessite un grand nombre de mesures, est assez rarement effectuée en pratique du fait du coût de telles opérations.

Annexe B

Métrologie

B.1 Microscope à balayage électronique

B.1.1 Principe de fonctionnement du microscope

Le principe de la microscopie électronique à balayage repose sur l'interaction électron matière. Afin d'obtenir une image de l'échantillon, un faisceau électronique bombardera la surface de l'échantillon à analyser, ces électrons vont subir différents types d'interactions. C'est l'analyse des électrons qui ressortent de l'échantillon qui permet l'étude de l'échantillon.

B.1.2 Génération du faisceau d'électron

Dans un microscope électronique à balayage, un vide poussé est appliqué dans l'enceinte afin que le libre parcours moyen des électrons soit assez important pour leur permettre d'atteindre tout l'échantillon mais aussi pour limiter l'oxydation du filament. La génération du faisceau électronique se fait de la manière suivante : Le filament de Tungstène est chauffé à une température de 2700K à l'aide d'un courant électrique de l'ordre de 2 à 3 Ampères. A cette température se produit alors le phénomène d'émission thermoïonique. Les électrons du Tungstène ont assez d'énergie thermique pour franchir la barrière de potentiel les retenant au matériau. Puis ces électrons sont accélérés par le champ électrique appliqué entre l'anode et le filament de Tungstène. Ces électrons sont en même temps repoussés par le Wehnelt, car il est polarisé négativement à peu près $-300V$. Ils sont alors concentrés au point voulu. Le Wehnelt est nécessaire car l'émission thermoïonique des électrons est isotrope, le Wehnelt permet alors de diriger les électrons dans la direction recherchée. Puis une première lentille électromagnétique focalisera le faisceau. La lentille objectif permettra enfin de focaliser plus précisément le faisceau sur l'échantillon. Les bobines

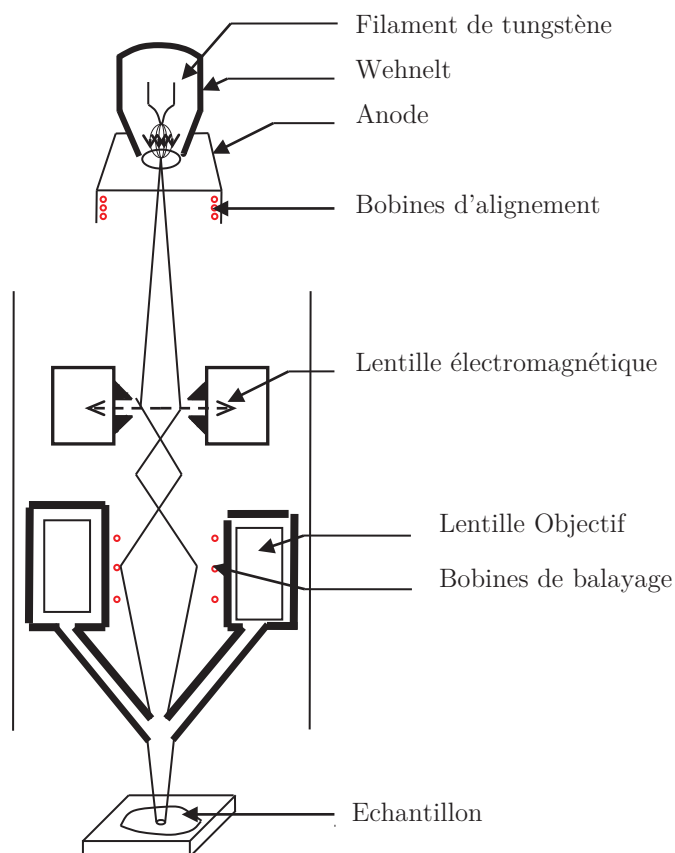


Figure B.1 – Schéma en coupe d'un Microscope Electronique à Balayage.

de balayage permettront de déplacer le faisceau à la surface de l'échantillon. La bobine électromagnétique fonctionne de la manière suivante : il s'agit de bobine parcourue par un courant, les électrons passant dans la bobine seront alors déviés par le champ magnétique, ainsi la forme du faisceau électronique pourra être modifiée.

B.1.3 Formation de l'image sur l'écran et grossissement

B.1.3.1 Formation de l'image

Le faisceau électronique est focalisé en un point déterminé par les bobines de balayage, des électrons vont alors ressortir de l'échantillon. Ces électrons vont être récoltés par différents types de détecteurs. La quantité d'électrons récoltée par le détecteur lorsque le faisceau est focalisé en un point déterminera alors l'intensité lumineuse du point correspondant sur l'écran. L'information sera alors codée en intensité lumineuse, la couleur des points de l'écran allant du noir au blanc. Afin de créer une image entière, la surface du faisceau sera alors balayée par le faisceau

lumineux et en chaque point de l'échantillon, le nombre d'électrons collectés par les détecteurs donnera l'intensité lumineuse du point correspondant à l'écran. Le balayage est alors synchronisé entre l'écran et les bobines de balayage.

B.1.3.2 Définition du grossissement

Le grossissement de l'image est déterminé par la surface de l'échantillon à scanner. En effet vu que la taille des écrans est fixe, l'image sera d'autant plus grossie que le faisceau aura balayé une petite surface. La résolution de l'image sera alors limitée par la taille du faisceau, en effet si pour obtenir deux points consécutifs sur l'écran, il est nécessaire de focaliser le faisceau sur deux points de l'échantillon tellement proche que le faisceau se chevauche, l'image sera floue sur l'écran. Avec des microscopes électroniques à balayage, on peut obtenir un grossissement de 300000.

B.1.4 Modes de fonctionnement du SEM

B.1.4.1 Principe d'interactions électrons matières

Lorsque les électrons vont pénétrer le matériau, ces derniers vont alors interagir avec l'échantillon. Différents types d'interactions sont alors à envisager : les interactions élastiques et les interactions inélastiques. Le volume moyen dans lequel les électrons vont interagir est appelé la poire des interactions.

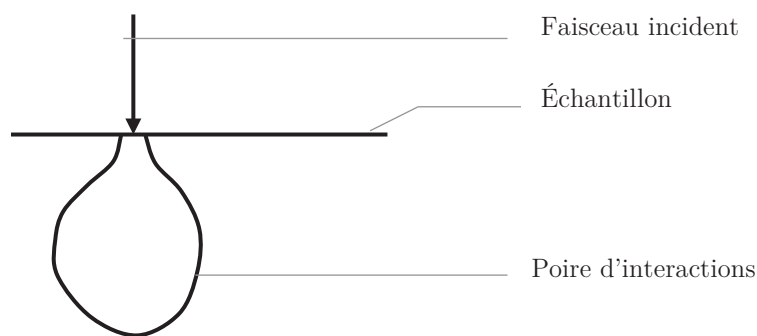


Figure B.2 – Schéma explicatif du concept de poire d'interactions.

Lorsque les électrons ont pénétré l'échantillon, ces derniers peuvent être déviés par les noyaux atomiques. Après plusieurs interactions de ce type, il se peut que l'électron ressorte de l'échantillon, on parlera d'électrons rétrodiffusés. Comme ces électrons n'auront subi que des interactions élastiques, ils auront alors perdu très peu d'énergie. Leur énergie sera alors proche de celle des électrons du faisceau incident. Le nombre d'électrons rétrodiffusés est d'autant plus important que le numéro atomique

des atomes présents dans l'échantillon est important. La collecte de ces électrons nous donnera une information relative à la composition chimique.

Les électrons peuvent aussi interagir de manière inélastique avec les atomes, en effet ils peuvent rentrer en contact avec un électron et l'arracher de l'atome. Si cet électron arraché ressort de l'échantillon, on parlera d'électron secondaire. Ils ont alors une énergie inférieure aux électrons rétrodiffusés. Ces électrons ayant une énergie faible ne proviendront que de la surface de l'échantillon. Le nombre de ces électrons est d'autant plus important que la surface de l'échantillon épouse la poire des interactions. Ainsi une pente apparaîtra plus brillante qu'un plat, un pic sera très brillant et un creux sombre, mais comme un creux est entouré de pentes, il apparaîtra brillant quand même. En effet, plus l'échantillon épouse la poire des interactions plus la distance moyenne pour les électrons secondaires nécessaire afin de sortir de l'échantillon est faible.

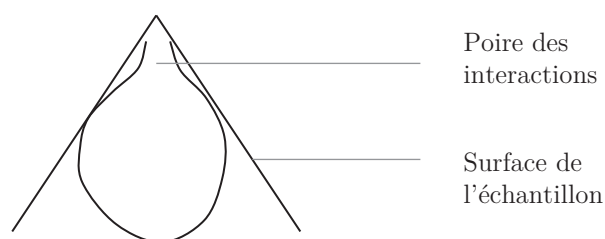


Figure B.3 – Schéma de la poire d'interactions sur un relief de l'échantillon.

La surface de la poire des interactions étant toujours très proche de la surface des échantillons, la distance à parcourir par les électrons secondaires pour sortir de l'échantillon est faible. Il y en a alors plus. La collecte des électrons secondaires nous donnera alors une information relative à la surface de l'échantillon. Enfin, il se peut que les interactions électron-matière donnent naissance à de la fluorescence X. En effet lorsqu'un électron secondaire est éjecté, il se peut qu'un électron de plus haute énergie se désexcite pour prendre la place de l'électron éjecté donnant alors naissance à un photon X. La collecte des photons X, nous donnera alors une information quant à la composition chimique du matériau.

B.1.5 Détermination des détecteurs

Afin de collecter un maximum d'électron secondaire, une grille placée devant le détecteur d'électrons, polarisée positivement, attire les électrons. Ainsi la plupart des électrons secondaires seront collectés alors que cela n'affectera pas les électrons rétrodiffusés car ils ont une énergie beaucoup plus élevée. Un détecteur à électron

secondaire est alors constitué d'un scintillateur qui transformera un électron en photon suivi d'un photomultiplicateur qui amplifiera le signal. Les détecteurs à électrons primaires sont des détecteurs en semi-conducteur. Ils seront placés au-dessus de l'échantillon, dans l'axe du faisceau primaire, ce qui permet de récupérer le maximum de signal. Le microscope électronique à balayage aura alors différents modes de fonctionnement : le mode en électrons secondaires et le mode en électron rétro-diffusés.

B.2 Scattérométrie SCD

B.2.1 Présentation de la technique métrologique

La scattérométrie est une mesure optique regroupant en réalité deux mesures : l'ellipsométrie et la réflectométrie. Ces deux techniques ont le même principe de fonctionnement, seulement l'angle du faisceau d'incidence est différent. Pour qu'elle soit effective et parvenir à extraire les dimensions caractéristiques du motif, deux conditions doivent être remplies :

1. Toute variation de la géométrie de la structure de test doit engendrer un changement de la réponse scattérométrique,
2. la relation qui lie la géométrie du motif à cette réponse doit être unique.

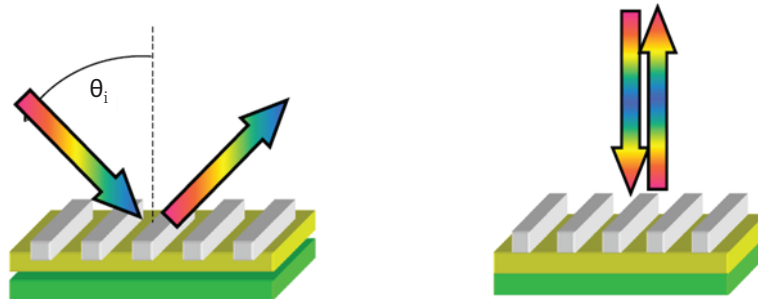


Figure B.4 – *Principe de fonctionnement de la scattérométrie. L'ellipsométrie est représenté à gauche et la réflectométrie à droite.*

Le scattérométrie est une technique optique d'analyse de surface et de géométrie fondée sur la mesure du changement de l'état de polarisation de la lumière après réflexion sur une surface plane. Cette technique découverte depuis 100 ans est en essor depuis l'utilisation de l'informatique et de l'électronique, ce qui permet l'optimisation et l'automatisation des mesures ainsi qu'une exploitation plus approfondie.

La scattérométrie permet d'étudier les propriétés de couches diélectriques et semi conductrices tel que le dioxyde de silicium, le nitrure de silicium, le polysilicium ou encore le silicium amorphe, mais aussi des films métalliques variés et des couches organiques comme le carbone et les résines photosensibles.

B.2.2 Principe de la mesure

Le faisceau incident est une onde polarisée à large bande spectrale, d'amplitude complexe. Ce faisceau est diffracté et réfléchi par l'échantillon de mesure. On récupère ainsi le spectre de l'onde réfléchie qui a subi un changement de polarisation et un décalage de phase. Selon l'orientation du polariseur par rapport au réseau de lignes mesuré, on récupère différentes informations. En effet, si le polariseur est orienté perpendiculairement aux lignes du réseau, on récupère le spectre réfléchi TM (polarisation P), composante électrique de cette même onde. S'il est parallèle aux lignes, on détecte le spectre réfléchi TE (polarisation S), composante magnétique de cette même onde. De cette manière, on obtient les coefficients de réflexion dont on a parlé dans la première partie. On peut également déterminer le décalage de phase provoqué entre ces deux ondes lorsque le faisceau incident est réfléchi et/ou réfracté puis réfléchi par l'échantillon mesuré, selon les indices des matériaux rencontrés et leurs propriétés optiques.

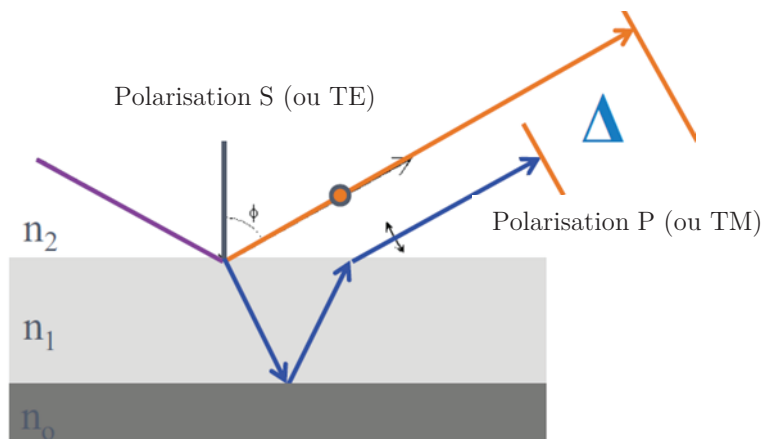


Figure B.5 – Ondes réfléchies selon différentes polarisations.

De manière simple, avec ces deux ondes on peut déterminer leur différence de phase, et en fonction des paramètres connus on peut calculer d'autres paramètres. De plus, la figure B.6, représente les différentes informations, soit connues, soit à déterminer : les épaisseurs de couches, les dimensions géométriques des motifs, les paramètres optiques des différents matériaux. Cependant, certaines dimensions

sont liées entres-elles. Par exemple, pour un profil de résine, l'outil va déterminer le Middle CD, la hauteur de résine unique et l'angle inférieur. Il obtiendra les valeurs du BottomCD, du TopCD par simple calcul mathématique.

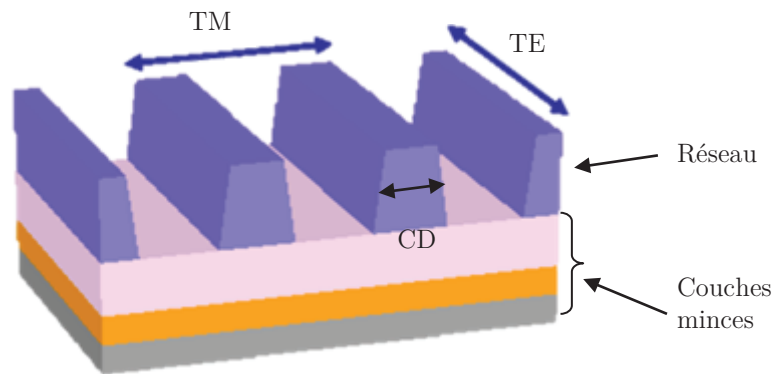


Figure B.6 – Contrôle dimensionnel d'un réseau de lignes.

Afin d'effectuer le contrôle dimensionnel des lignes de ce réseau, il est nécessaire de créer un modèle dans lequel les paramètres connus sont fixés et les autres paramètres sont calculés à partir des spectres TE et TM. Ainsi, afin de déterminer le CD de la ligne, on doit connaître au préalable les dimensions géométriques ainsi que les propriétés optiques des différentes couches constituant l'échantillon. Ces informations sont utilisées pour créer le modèle théorique de diffraction auquel vont être comparés les spectres réfléchis par le réseau. De plus, on sait que certains paramètres sont fortement corrélés, ce qui facilite la correspondance des spectres de diffraction théoriques et réfléchis. À noter que seul l'ordre 0 de diffraction est conservé pour le traitement. Grâce aux paramètres dits flottants, on cherche les valeurs pour lesquelles le spectre théorique et le spectre expérimental vont être les plus corrélés. Il nécessite du temps de calcul pouvant augmenter considérablement si l'on ne fixe pas suffisamment de paramètres lors de la création du modèle. Afin de réduire les temps de calculs, on crée des bibliothèques contenant des spectres prêts à être utilisés en fonction d'un empilement de couches bien précis. Ainsi, en production, on utilise directement les spectres prédéfinis en tant que modèles et les méthodes d'optimisation ne contiennent que très peu de valeurs dites flottantes. L'ellipsométrie spectrale est combinée ici à la réflectométrie afin d'obtenir des résultats, au niveau calculs, plus rapidement mais également plus fiables car mesurés de deux façons différentes. Ce type d'équipement est de plus en plus convoité de part son caractère efficace ainsi que sa mesure non destructive et possible jusqu'à l'intérieur des matériaux.

B.3 Le microscope à force atomique 3D

B.3.1 Principe de fonctionnement du microscope à force atomique classique

Le microscope à force atomique est un dérivé du microscope à effet tunnel STM¹, qui peut servir à visualiser la topographie de la surface d'un échantillon ne conduisant pas l'électricité. Le principe, représenté sur la figure B.7 se base sur les interactions entre l'échantillon et une pointe montée sur un micro-levier. La pointe balaie la surface à représenter, et l'on agit sur sa hauteur selon un paramètre de rétroaction. La déflexion du levier est mesurée par un faisceau laser. Les variations de ce faisceau permettent de reconstruire le relief de la surface. La différence entre l'AFM et le STM réside dans la mesure prise en compte pour la rétroaction utilisée : le STM utilise le courant tunnel, l'AFM utilise la déviation du levier, c'est-à-dire indirectement les forces d'interactions entre la pointe et la surface.

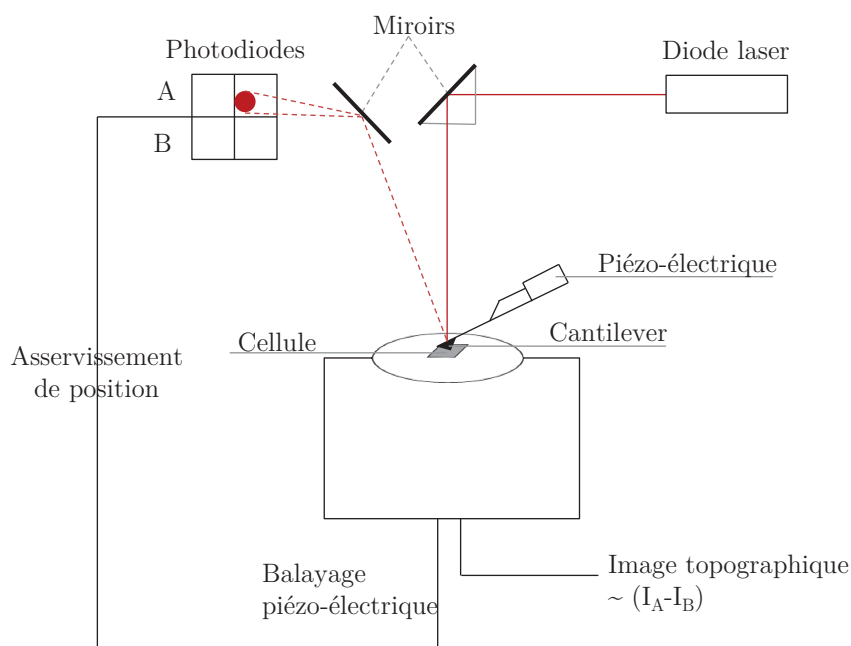


Figure B.7 – Principe de fonctionnement du Microscope à Force Atomique.

Les atomes ont souvent tendance à s'attirer. Lorsque l'affinité des atomes est grande, ils se lient pour former une molécule ou un cristal, mais dans la plupart des cas, cette attraction est très faible et n'est perceptible qu'à très faible distance. À l'inverse, lorsqu'ils sont très proches, les atomes se repoussent du fait de la soumission

1. Scanning Tunneling Microscope / Microscope à Effet Tunnel

des électrons du cortège électronique à la répulsion électrostatique. Il y aura donc une sorte de «distance d'équilibre» : si les atomes s'éloignent, une force les rappelle, et s'ils se rapprochent, une force les repousse.

On utilise donc cette attraction/répulsion entre les atomes surfaciques et la pointe sondeuse. La pointe est montée sur un levier très flexible. La mesure de la déflexion du levier donne une mesure directe de la force d'interaction entre la surface sondée et la pointe.

Il existe en fait trois modes d'utilisation de l'AFM :

- Le mode contact consiste à utiliser les forces répulsives : la pointe appuie sur la surface, elle est donc repoussée, et le levier est dévié. La rétroaction s'effectue sur la mesure de la direction de la déviation.
- Le mode contact intermittent dit «tapping», de loin le plus utilisé, consiste à faire vibrer le levier à sa fréquence propre de résonance (typiquement de l'ordre de la centaine de kHz), avec une certaine amplitude. Quand la pointe interagit avec la surface, l'amplitude décroît (parce que la fréquence de résonance change). La rétroaction se fait alors sur l'amplitude d'oscillation du levier.
- Le mode non-contact utilise, lui, les forces attractives. Difficile à gérer, il est très peu utilisé en pratique, parce que ces forces sont faibles, et nécessitent un environnement à faible bruit. Par ailleurs, la couche d'adsorbats² vient largement affecter les mesures. La rétroaction s'effectue soit sur la déviation, mais bien évidemment il s'agit d'une déviation du levier qui va dans l'autre sens que dans le cas du mode contact, soit, sur l'amplitude des oscillations.

Lors de cette thèse, le seul mode de fonctionnement réellement utilisé a été le mode «tapping», mais ce dernier peut générer une très forte usure des pointes AFM que l'on utilise.

B.3.2 Principe du microscope à force atomique en 3 Dimensions

La particularité de ce microscope à force atomique se trouve dans la forme évasée de la pointe qui oscille verticalement (en z_{AFM3D}) couplé à un asservissement de la direction de balayage en x_{AFM3D} et y_{AFM3D} . Ces spécificités permettent ainsi de balayer des structures avec des surfaces verticales, telle qu'une grille de transistor, et d'en déduire ces dimensions, comme le montre la figure B.8.

Ce microscope à force atomique ne fonctionne pas suivant l'un des trois modes d'utilisation d'un AFM standard. Son mode de fonctionnement, appelé mode CD, est spécifique à cet outil. Il consiste à venir taper la surface par intermittence aussi

2. Toute surface à l'air ambiant est recouverte d'une couche de l'ordre du nm d'épaisseur d'eau et de divers polluants

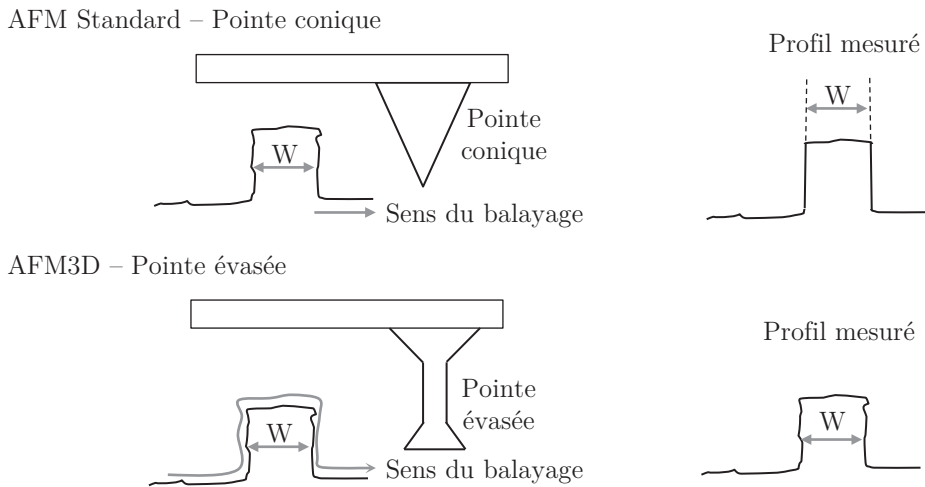


Figure B.8 – *Limitation de l'AFM standard : la pointe conique ne peut suivre le flanc de la structure ce qui dégrade la mesure de la dimension latérale et de l'angle des flancs. L'AFM3D, avec sa pointe évasée, permet de venir scanner les flancs des motifs.*

bien sur les parties verticales qu'horizontales. Comme pour le mode contact intermittent, l'asservissement s'effectue suivant l'amplitude d'oscillation de la pointe en z_{AFM3D} . La différence se trouve dans la direction de rétroaction et de balayage qui ne s'effectue plus uniquement en z_{AFM3D} mais en x_{AFM3D} et z_{AFM3D} . Pour cela, entre chaque point de mesure, la pente locale de la structure est calculée grâce à la position du point (ou de quelques points) précédent. Ce calcul permet de déplacer la sonde AFM perpendiculairement à la pente afin de retrouver l'amplitude de consigne, et d'indiquer la direction de balayage qui doit être parallèle à cette pente pour l'acquisition du prochain point de mesure. Contrairement au mode contact intermittent, où la vitesse de balayage de la surface est constante et la rétroaction est effectuée en temps réel, en mode CD, ceci se passe en plusieurs étapes :

1. Rapprochement de la pointe oscillante vers la surface jusqu'à une diminution donnée de l'amplitude d'oscillation de la pointe afin de prendre la position du point de mesure.
2. Calcul de la pente locale à partir de la position du point (ou de quelques points) de mesure précédent.
3. Rétroaction de la sonde AFM perpendiculairement à la pente locale afin de retrouver l'amplitude de consigne de la pointe.
4. Déplacement de la sonde AFM parallèlement à la pente locale d'un pas défini par l'utilisateur.
5. Rapprochement de la pointe oscillante perpendiculairement à la pente locale

jusqu'à une diminution donnée de l'amplitude d'oscillation de la pointe afin de prendre la position du point de mesure. Puis, reprise du cycle de mesure.

B.4 Conclusion

Les outils les plus largement utilisés actuellement dans l'industrie des semi-conducteurs, le CDSEM et la scattérométrie, présentent certaines limitations pour une mesure du CD répondant aux exigences requises pour les transistors de futures générations. En effet, ils ne sont pas optimisés pour mesurer des structures complexes en trois dimensions avec des surfaces verticales. La technique de l'AFM3D, qui permet de venir directement mesurer les flancs verticaux afin d'obtenir une mesure tri-dimensionnelle précise des structures semble donc très prometteuse pour une mesure précise du CD et de la pente de la résine. Dans cette thèse, nous utilisons le concept de métrologie hybride qui permet de valider les données mesurées par le CDSEM et la scattérométrie par l'AFM3D.

Annexe C

Technologie des réticules

Pour obtenir des CD d'échelle nanométrique, des réticules, qui contiennent les motifs des circuits intégrés, sont utilisés. Ces motifs, sont réalisés à l'échelle 4 ; c'est-à-dire qu'il sont 4 fois plus grand que ceux imprimés sur la plaquette. Le réticule, représenté sur la figure C.1 est un composant critique de l'outil photo-lithographique car les motifs définis sont reproduits sur la plaquette. La feuille de route internationale des technologies semi-conducteurs ITRS pour les réticules prévoit pour la technologie $28nm$ (prévue en 2014) la nécessité de contrôler d'une part l'uniformité du CD sur réticule à $1.75nm$ près et d'autre part la différence entre le CD du réticule et le CD de la plaquette au plus à $2.3nm$. Les dimensions critiques des produits dépendent donc directement des dimensions des motifs du réticule.

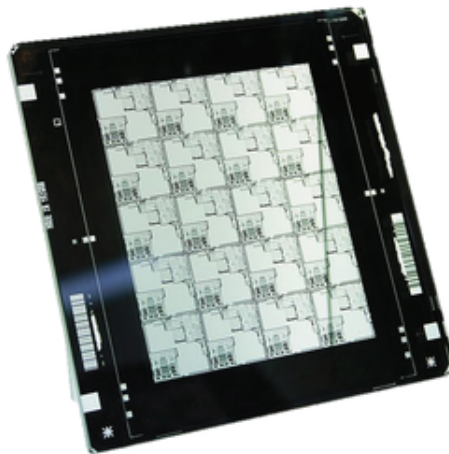


Figure C.1 – Représentation d'un réticule composé de quartz et de chrome.

Il existe deux types de réticules en photolithographie. Les réticules d'amplitudes et les réticules d'amplitudes et de phases. Pour des raisons de procédé, certains niveaux utilisent des réticules fond clair et d'autre, des réticules à fond sombre.

C.1 Réticule d'amplitude ou réticule binaire

Le réticule binaire COG¹ est un réticule d'amplitude, c'est-à-dire qu'il ne joue que sur l'amplitude de l'onde qui le traverse. Ce réticule traditionnel est composé d'une plaque de quartz transparente avec des motifs opaques réalisés en chrome. Le champ électrique au niveau du réticule varie donc de 0 à +1, après le passage des faisceaux lumineux, comme un bit informatique. Pour améliorer les performances photo-lithographique, un autre type de réticule, qui fait intervenir à la fois l'amplitude et la phase de l'onde a été développé.

C.2 Réticule à décalage de phase

Un réticule de phase PSM² est un réticule sur lequel on fait varier localement la phase de l'onde incidente. Ce déphasage est réalisé en général en diminuant localement l'épaisseur du matériau par gravure ou en ajoutant un matériau différent. On peut ainsi créer des différences de phase variant de 0 à 2π pour produire une résolution double. Ce type de réticule, représenté sur la figure C.2 permet de jouer sur l'amplitude de l'onde transmise offrant ainsi un degré de liberté supplémentaire.

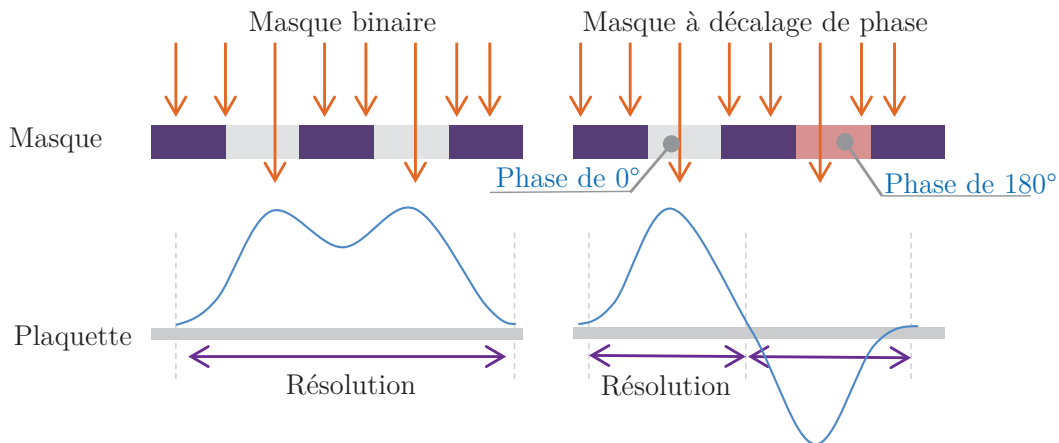


Figure C.2 – Représentation d'un réticule à décalage de phase. La phase dépend du profil en épaisseur du Quartz.

1. Chrome On Glass / Chrome sur Quartz
2. Phase Shifting Mask / Réticule à décalage de phase

C.2.1 Réticule à décalage de phase alterné

Pour obtenir un réticule à décalage de phase alterné AltPSM³, il suffit de graver le Quartz pour créer une différence de phase de π . Le champ électrique varie alors de -1 à $+1$. L'amplitude négative complexe représente le décalage de phase π . La définition de l'image d'un réticule à décalage de phase sera nettement plus grande que l'image d'un réticule binaire.

C.2.2 Réticule à décalage de phase atténué

Les réticules à décalage de phase atténués AttPSM⁴ requièrent une zone opaque représentant les motifs composé de Chrome et d'un matériau dans le but de produire une phase différente de π en fonction de l'épaisseur du matériau. Pour réaliser ce décalage de phase, la partie opaque du réticule est composée majoritairement de Molybdene, un matériau permettant une faible dispersion en CD. Les réticules OMOG ont été adoptés depuis le noeud technologique $32nm$

C.3 Réticules RIM

Dans ce type de masque, le décalage en phase se trouve autour du motif. Les gains et les méfaits sont similaires à ceux obtenus avec les masques PSM atténués. L'extrême sensibilité des motifs à la largeur des phases rend ces masques très difficiles à utiliser.

C.4 Réticules sans chrome

Le déphasage de ces masques est similaire à ceux des masques PSM alternés. Mais dans ce type de masque, il n'y a pas de chrome. L'utilisation de ce type de masque pose de nombreux problèmes pratiques.

C.5 Facteur d'erreur du réticule

Un paramètre qui possède un impact sur la formation des images est le facteur d'erreur du réticule MEEF. Du fait que le contrôle du CD devient de plus en plus exigeant, ce facteur permet d'évaluer la linéarité de l'image du masque transférée sur la plaquette. Ce paramètre est défini comme décrit dans l'équation C.1.

3. Alternated Phase Shifting Mask / Réticule à décalage de phase alterné

4. Attenuated Phase Shifting Mask / Réticule à décalage de phase atténué

$$MEEF = M \frac{\Delta CD_{plaquette}}{\Delta CD_{réticule}} \quad (C.1)$$

Avec M qui représente la réduction du système optique de projection. Dans le cas d'un transfert idéal, le procédé est linéaire et la valeur du MEEF est égale à 1. Les motifs sur le réticule sont retranscrits sur la plaquette avec les mêmes dimensions. D'autre part, la qualité de l'image étant différente pour un même motif placé dans des environnements différents, son MEEF sera différent selon l'environnement. Par exemple, une ligne isolée et celle placée au sein dans un réseau n'ont pas le même MEEF. En général, le MEEF est plus important pour une ligne placée dans un réseau que pour la même ligne isolée. Cette différence est essentiellement due à la différence de la qualité de l'image. De plus, le procédé photo-lithographique n'est pas linéaire car il faut tenir compte de plusieurs paramètres comme la résine, la gravure, ... C'est pourquoi le MEEF est en général supérieur à 1. Sur la figure C.3 on peut voir un exemple d'évolution du MEEF en fonction de la période de motifs denses, dans le cas d'une ligne de $40nm$ et une ouverture numérique NA de 1,3.

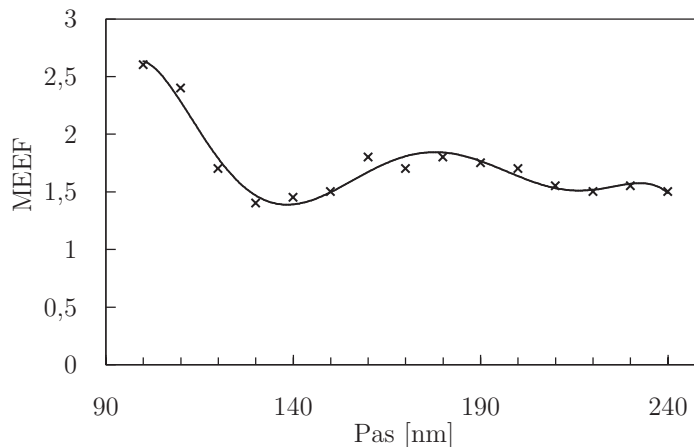


Figure C.3 – Evolution de la valeur du MEEF en fonction de la période de motifs denses dans le cas d'une ligne de $40nm$ et de $NA = 1,3$.

Références bibliographiques

- [1] C. A. Mack. *Fundamental principles of optical lithography : the science of microfabrication*. Wiley-Interscience, 2007.
- [2] G. E. Moore. Lithography and the future of moore's law. In *Proceedings of SPIE*, volume 2438, page 2, 1995.
- [3] B. Le Gratiet, P. Gouraud, E. Aparicio, L. Babaud, K. Dabertrand, M. Touchet, S. Kremer, C. Chaton, F. Foussadier, F. Sundermann, et al. Process control for 45 nm CMOS logic gate patterning. In *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering*, page 69220, 2008.
- [4] J. de Caunes, J. van Herk, S. Warrick, B. Le Gratiet, M. Mikolajczak, J. D. Chapon, C. Monget, and J. W. Gemmink. Design and use of multivariate approach error analysis APC system. In *Proceedings of SPIE*, volume 6155, page 615507, 2006.
- [5] S. V. Sreenivasan, C. G. Willson, N. E. Schumaker, and D. J. Resnick. Cost of ownership analysis for patterning using step and flash imprint lithography. In *Proc. SPIE*, volume 4688, pages 903–909, 2002.
- [6] M. D. Levenson, N. S. Viswanathan, and R. A. Simpson. Improving resolution in photolithography with a phase-shifting mask. *Electron Devices, IEEE Transactions on*, 29(12) :1828–1836, 1982.
- [7] B. J. Lin. The k coefficient in nonparaxial scaling equations for resolution, depth of focus, and immersion lithography. *Journal of Microlithography, Microfabrication, and Microsystems*, 1 :7, 2002.
- [8] M. Rothschild, A. R. Forte, M. W. Horn, R. R. Kunz, S. C. Palmateer, and J. H. C. Sedlacek. 193-nm lithography. *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 1(3) :916–923, 1995.

- [9] D. Angeley, S. Drazkiewicz, and G. Gallatin. Off axis alignment system for scanning photolithography, 1995.
- [10] C. A. Spence. Mask for optical lithography using phase shift masking and integrated circuit produced therefrom, 1997.
- [11] T. Hsu. *Optical proximity correction (OPC) method for improving lithography process window*. 2001.
- [12] V. Bakshi. *EUV lithography*, volume 178. Society of Photo Optical, 2009.
- [13] T. A. Brunner. Impact of lens aberrations on optical lithography. *IBM Journal of Research and Development*, 41(1.2) :57–67, 1997.
- [14] D. A. Bernard. Simulation of focus effects in photolithography. *Semiconductor Manufacturing, IEEE Transactions on*, 1(3) :85 i_l½ 97, 1988.
- [15] G. K. McMillan, D. M. Considine, and Inc Ebrary. *Process/industrial instruments and controls handbook*. McGraw Hill, 1999.
- [16] A.J. Toprac, D.J. Downey, and S. Gupta. Run-to-run control process for controlling critical dimensions, 1999.
- [17] B. Le Gratiet, F. Sundermann, J. Massin, M. Decaux, N. Thivolle, F. Baron, A. Ostrovsky, C. Monget, J. D. Chapon, Y. Blancquaert, et al. Improved CD control for 45-40 nm CMOS logic patterning : anticipation for 32-28 nm. In *Proc. SPIE*, volume 7638, 2010.
- [18] W. G. Oldham, S. N. Nandgaonkar, A. R. Neureuther, and M. O’Toole. A general simulator for VLSI lithography and etching processes : Part i application to projection lithography. *Electron Devices, IEEE Transactions on*, 26(4) :717–722, 1979.
- [19] Nicolas Spaziani, Jean Massin, and Renü½-Louis Inglebert. Lithography process control using in-line metrology. In *Proc. SPIE*, volume 8324, San Jose (CA) USA, 2011.
- [20] M. Sendelbach, C. N. Archie, B. Banke, J. Mayer, H. Nii, P. Herrera, and M. Hankinson. Correlating scatterometry to CD-SEM and electrical gate measurements at the 90-nm node using TMU analysis. In *Proceedings of SPIE*, volume 5375, page 550, 2004.
- [21] M. J. Madou. *Fundamentals of microfabrication : the science of miniaturization*. CRC, 2002.

- [22] R. L. Brainard, G. G. Barclay, E. H. Anderson, and L. E. Ocola. Resists for next generation lithography. *Microelectronic engineering*, 61 :707–715, 2002.
- [23] H. Wu and K. E. Gonsalves. Preparation of a photoacid generating monomer and its application in lithography. *Advanced Functional Materials*, 11(4) :271–276, 2001.
- [24] H. Ito. Chemical amplification resists : History and development within IBM. *IBM Journal of Research and Development*, 41(1.2) :119–130, 1997.
- [25] H. J. Levinson. *Principles of lithography*, volume 146. Society of photo optical, 2005.
- [26] K. C. Noh, M. D. Oh, and S. C. Lee. A numerical study on airflow and dynamic cross-contamination in the super cleanroom for photolithography process. *Building and environment*, 40(11) :1431–1440, 2005.
- [27] L. Bauch, U. Jagdhold, J. Bauer, B. Dietrich, W. Hoppner, H. Erzgraber, H. Dreger, G. Heller, K. Richter, E. Roll, et al. Submicrometer photolithography by surface imaging-experiment and simulation. *Microelectronic Engineering*, 13(1-4) :89–92, 1991.
- [28] L. U. Zhijian. *Improved deep ultraviolet photolithography*. March 1999. EP Patent 0,905,565.
- [29] M. D. Levenson, K. M. Johnson, V. C. Hanchett, and K. Chiang. Projection photolithography by wave-front conjugation. *JOSA*, 71(6) :737–743, 1981.
- [30] W.S. Huang, I. Popova, P.R. Varanasi, and L. Vyklicky. Self-forming top anti-reflective coating compositions and, photoresist mixtures and method of imaging using same, March 2009.
- [31] D.M. Rogers and G.V. Thaker. Polysilicon linewidth reduction using a BARC-poly etch process, January 2000.
- [32] W. D. Hinsberg, F. A. Houle, M. I. Sanchez, and G. M. Wallraff. Chemical and physical aspects of the post-exposure baking process used for positive-tone chemically amplified resists. *Ibm Journal of Research and Development*, 45(5) :667–682, 2001.
- [33] T. Kubozono, Y. Moroishi, Y. Ohta, and N. Moriuchi. Resist removal after photolithography process using adhesive tape. *Journal of Photopolymer Science and Technology*, 21(1) :21–30, 2008.

- [34] M. Terry, I. Lalovic, G. Wells, and A. Smith. Behavior of lens aberrations as a function of wavelength on KrF and ArF lithography scanners. In *Proc. SPIE*, volume 4346, pages 15–24, 2001.
- [35] M. A. van den Brink, H. Jasper, S. D. Slonaker, P. Wijnhoven, and F. Klaassen. Step-and-scan and step-and-repeat : a technology comparison. In *Proceedings of SPIE*, volume 2726, page 734, 1996.
- [36] C. P. Ausschnitt, A. C. Thomas, and T. J. Wiltshire. Advanced DUV photolithography in a pilot line environment. *IBM journal of research and development*, 41(1.2) :21–37, 1997.
- [37] H. Resson, M. T. Musavi, and S. Khan. Intelligent control of critical dimension in photolithography process. In *Neural Networks, 2001. Proceedings. IJCNN'01. International Joint Conference on*, volume 1, pages 486–490, 2001.
- [38] Semiconductor Industry Association et al. *International technology roadmap for semiconductors (ITRS)*. 2011.
- [39] D. Bratton, D. Yang, J. Dai, and C. K. Ober. Recent progress in high resolution lithography. *Polymers for advanced technologies*, 17(2) :94–103, 2006.
- [40] C. A. Mack. THE LITHOGRAPHY EXPERT-The rayleigh depth of focus. *Microlithography World*, 13(1) :14–15, 2004.
- [41] S. D. Hsu, D. J. Van Den Broeke, X. Shi, M. Hsu, K. E. Wampler, J. F. Chen, A. Yu, S. C. Yang, and F. Hsieh. Low k lithography patterning option for the 90-nm and 65-nm nodes. In *Proceedings of SPIE*, volume 5130, page 812, 2003.
- [42] S. J. Bentley and R. W. Boyd. Nonlinear optical lithography with ultra-high sub-rayleigh resolution. *Opt. Express*, 12(23) :5735–5740, 2004.
- [43] W. N. Partlo, P. J. Tompkins, P. G. Dewa, and P. F. Michaloski. Depth of focus and resolution enhancement of i-line and deep-UV lithography using annular illumination. In *Proceedings of SPIE*, volume 137, 1927.
- [44] T. Kudo, S. Masuda, Y. Kinoshita, K. Przybilla, N. Endo, N. Suehiro, and H. Okazaki. Pattern forming material including photoacid and photobase generators for large exposure latitude, November 1997.
- [45] J. Van Wingerden, C.A.H. Juffermans, and P. Dirksen. Determining lithographic parameters to optimise a process window, 2003.

- [46] D. Adalsteinsson and J. A. Sethian. A level set approach to a unified model for etching, deposition, and lithography II : three-dimensional simulations. *Journal of computational physics*, 122(2) :348–366, 1995.
- [47] B. Cline, K. Chopra, D. Blaauw, and Y. Cao. Analysis and modeling of CD variation for statistical static timing. In *Computer-Aided Design, 2006. ICCAD'06. IEEE/ACM International Conference on*, pages 60–66, 2006.
- [48] T. Umatate and T. Yamaguchi. Lithography information control system, September 1993.
- [49] C. G. Chen, P. T. Konkola, R. K. Heilmann, G. S. Pati, and M. L. Schattenburg. Image metrology and system controls for scanning beam interference lithography. *Journal of Vacuum Science & Technology B : Microelectronics and Nanometer Structures*, 19(6) :2335–2341, 2001.
- [50] X. Niu, N. Jakatdar, J. Bao, C. Spanos, and S. Yedur. Specular spectroscopic scatterometry in DUV lithography. In *Proc. SPIE*, volume 3677, pages 159–168, 1999.
- [51] B. D. Bunday, M. Bishop, J. S. Villarrubia, and A. E. Vladar. CD-SEM measurement line-edge roughness test patterns for 193-nm lithography. In *Proceedings of SPIE*, volume 5038, 2003.
- [52] J. Foucher, P. Faurie, L. Dourthe, B. Irmer, C. Penzkofer, D. G. Seiler, A. C. Diebold, R. McDonald, A. Chabli, and E. M. Secula. Hybrid metrology & 3D-AFM enhancement for CD metrology dedicated to 28 nm node and below requirements. In *AIP Conference Proceedings-American Institute of Physics*, volume 1395, page 290, 2011.
- [53] C. A. Mack. The new, new limits of optical lithography. *Emerging Lithographic Technologies VIII, in Microlithography*, pages 22–27, 2004.
- [54] J. Zimmermann, P. Grützner, J. T. Neumann, D. Hellweg, D. Jürgens, M. Patra, C. Hennerkes, M. Maul, B. Geh, A. Engelen, et al. Generation of arbitrary freeform source shapes using advanced illumination systems in high-NA immersion scanners. In *Proceedings of SPIE*, volume 7640, page 764005, 2010.
- [55] J.J. Bendik and M. Hankinson. Method and apparatus for the production of process sensitive lithographic features, January 2004.

- [56] K. Monahan, P. Lord, W. Ng, H. Altendorfer, G. Kren, and S. Ashkenaz. Yield impact of cross-field and cross-wafer CD spatial uniformity : collapse of the deep-UV and 193 nm lithographic focus window. In *Semiconductor Manufacturing Conference Proceedings, 1999 IEEE International Symposium on*, pages 115–118, 1999.
- [57] H. GERTZ. Nouvel expose de la theorie elementaire du systeme optique. *Acta Ophthalmologica*, 11(3) :251–263, 1933.
- [58] J. W. Bossung. Projection printing characterization. In *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, volume 100, page 80, 1977.
- [59] J. H. Bruning. Optical imaging for microfabrication. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 17(5) :1147–1155, 1980.
- [60] D. Nazzal and D. A. Bodner. Automated material handling systems : a simulation-based design framework for automated material handling systems in 300mm fabrication facilities. In *Proceedings of the 35th conference on Winter simulation : driving innovation*, pages 1351–1359, 2003.
- [61] V. Shih, J. Huang, W. Wang, G. T. Huang, H. L. Chung, A. Ho, W. T. Yang, S. Wang, C. M. Ke, L. J. Chen, et al. A sophisticated metrology solution for advanced lithography : addressing the most stringent needs of today as well as future lithography. In *Proc. SPIE*, volume 7520, page 75201A, 2009.
- [62] F. Zaugg. Single wafer management for non productive wafers NPW. In *Advanced Semiconductor Manufacturing Conference, 2008. ASMC 2008. IEEE/SEMI*, pages 191–195, 2008.
- [63] K. Bhattacharyya, N. Wright, M. van der Schaar, A. den Boef, P. Hinnen, M. Shahrjerdy, V. Wang, S. Lin, C. Wang, C. M. Ke, et al. New approaches for scatterometry-based metrology for critical distance and overlay measurement and process control. 2011.
- [64] C. M. Ke, V. Shih, J. Huang, L. J. Chen, W. Wang, G. T. Huang, W. T. Yang, S. Wang, C. R. Liang, H. H. Liu, et al. A paradigm shift in scatterometry-based metrology solution addressing the most stringent needs of today as well as future lithography. In *Proceedings of SPIE*, volume 7638, page 76383P, 2010.

- [65] P. Leroux, D. Ziger, and N. Juig. Focus characterization using end of line metrology. *Semiconductor Manufacturing, IEEE Transactions on*, 13(3) :322–330, 2000.
- [66] D. Ziger and P. Leroux. *Arrangement and method for calibrating optical line shortening measurements*. Google Patents, October 2001. US Patent 6,301,008.
- [67] B. La Fontaine, M. Dusa, J. Krist, A. Acheta, J. Kye, H. Levinson, C. Luijten, C. Sager, J. Thomas, and J. Van Praagh. Analysis of focus errors in lithography using phase-shift monitors. In *Proc. SPIE*, volume 4691, pages 315–324, 2002.
- [68] H. Nomura. A novel technique for measuring defocus with phase shift gratings on a photomask. *Optical review*, 8(3) :184–190, 2001.
- [69] Y. Xu. Effects of tone and focus on the formation and alignment of f0contours. *Journal of Photonics*, 27(1) :55–105, 1999.
- [70] C. P. Ausschnitt, T. A. Brunner, and M. E. Lagus. *Focus or exposure dose parameter control system using tone reversing patterns*. Google Patents, October 1999. US Patent 5,965,309.
- [71] D. Serre. *L'imageur Interfrérométrique de Fresnel : un instrument spatial pour l'observation à haute résolution angulaire*. PhD thesis, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2007.
- [72] Nicolas Spaziani, Rene-Louis Inglebert, and Jean Massin. Lithography process control using in-line metrology. pages 83241L–83241L–9, 2012.
- [73] N. Kachwala, J. S. Petersen, J. F. Chen, M. Canjemi, and M. McCallum. Imaging contrast improvement for 160nm line features using sub resolution assist features with binary, 6% ternary attenuated phase shift mask with process tuned resist. In *PROCEEDINGS OF THE SPIE, SPIE, BELLINGHAM, VA, US*, pages 55–67, 1999.
- [74] T. Wiltshire, D. Corliss, T. Brunner, C. Ausschnitt, R. Young, R. Nielson, E. Hwang, and J. Iannucci Jr. Manufacturing implementation of scatterometry and other techniques for 300-mm lithography tool controls. In *Proceedings of SPIE*, volume 7272, page 72720W, 2009.
- [75] O. Nalamasu, E. Reichmanis, M. Cheng, V. Pol, J. M. Kometani, F. M. Houlihan, T. X. Neenan, M. P. Bohrer, D. A. Mixon, L. F. Thompson, et al. Preliminary lithographic characteristics of an organic chemically amplified resist formulation for single layer deep-UV lithography. 1991.

- [76] J. Fraunhofer. Prismatic and diffraction spectra. *Edited by JS Ames*, 1899.
- [77] L. Ryzhikov and Y. Vladimirsky. *Lithographic apparatus having double telecentric illumination*. Google Patents, 2007. US Patent 7,227,613.
- [78] A. Kohler. A new system of illumination for photomicrographic purposes. *Z. Wiss. Mikroskopie*, 10 :433 – 440, 1893.
- [79] K. R. Castleman. Digital image processing. *Curve and Surface Fitting*, pages 501 – 507, 1996.
- [80] C. Goodman. *Wavefront-Reconstruction Imaging, or Holography, Introduction to Fourier Optics, 1968*. McGraw-Hill, Inc., USA, 1968.
- [81] L. Mertz. Transformations in optics. *New York : Wiley, 1965*, 1, 1965.
- [82] M. Françon. Optique formation et traitement des images. *Journal of Modern Optics*, 19(6) :551, 1972.
- [83] M. Born, E. Wolf, and A. B. Bhatia. *Principles of optics : electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*. Cambridge Univ Pr, 1999.
- [84] A. Marićhal. Fourier optics, filtering and spectrometry. *Nouvelle Revue d'Optique*, 4 :315, 1973.
- [85] S. K. Brainerd and J. B. Rolfson. *Method of lithography using reticle pattern blinders*. Google Patents, September 1997. US Patent 5,667,918.
- [86] F. M. Schellenberg and L. Capodici. Impact of RET on physical layouts. In *Proceedings of the 2001 international symposium on Physical design*, pages 52–55, 2001.
- [87] H. W. Deckman and J. H. Dunsmuir. Natural lithography. *Applied Physics Letters*, 41(4) :377–379, 1982.
- [88] J. P. Kirk and C. J. Progler. Pupil illumination : in-situ measurement of partial coherence. In *Proceedings of SPIE*, volume 3334, page 281, 1998.
- [89] B. W. Smith and R. Schlieff. Understanding lens aberration and influences to lithographic imaging. In *Proc. SPIE*, volume 4000, pages 294–306, 2000.
- [90] P. Gupta, A. B. Kahng, and C. H. Park. Detailed placement for improved depth of focus and CD control. In *Proceedings of the 2005 Asia and South Pacific Design Automation Conference*, pages 343 – 348, 2005.

- [91] Y. H. Oh, J. C. Lee, and S. Lim. Resolution enhancement through optical proximity correction and stepper parameter optimization for 0.12- μm mask pattern. In *Proceedings of SPIE*, volume 3679, page 607, 1999.
- [92] C. F. R. Mateus, M. C. Y. Huang, L. Chen, C. J. Chang-Hasnain, and Y. Suzuki. Broad-band mirror using a subwavelength grating. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 16(7) :1676 – 1678, 2004.
- [93] F. M. Schellenberg and C. A. Mack. MEEF in theory and practice. In *Proc. of SPIE*, volume 3873, pages 189–202, 1999.
- [94] N. B. Cobb, A. Zakhor, M. Reihani, F. Jahansooz, and V. N. Raghavan. Experimental results on optical proximity correction with variable-threshold resist model. In *Proceedings of SPIE*, volume 3051, page 458, 1997.
- [95] N. B. Cobb, A. Zakhor, and E. A. Miloslavsky. Mathematical and CAD framework for proximity correction. In *Proceedings of SPIE*, volume 2726, page 208, 1996.
- [96] J. Vasek, O. Menedeva, D. Levitzky, O. Lindman, Y. Nemadi, G. E. Bailey, and J. L. Sturtevant. SEM-contour-based OPC model calibration through the process window. In *Proceedings of SPIE*, volume 6518, page 65180D, 2007.
- [97] D. Van Den Broeke and J. F. Chen. *Method, program product and apparatus for model based scattering bar placement for enhanced depth of focus in quarter-wavelength lithography*. Google Patents, November 2009. US Patent 7,620,930.
- [98] T. A. Brunner, C. P. Ausschnitt, et al. *Method of improving grating test pattern for lithography monitoring and controlling*. Google Patents, November 2008. US Patent 7,455,939.
- [99] T. A. Brunner, D. Corliss, T. Wiltshire, and C. P. Ausschnitt. Focus and dose characterization of immersion photoclusters. In *Proceedings of SPIE*, volume 7274, page 72740S, 2009.
- [100] M. J. Huang and H. J. Tao. *Approach to improve line end shortening*. Google Patents, September 2004. US Patent 6,794,230.
- [101] Y. C. Kim, G. Yeo, J. H. Lee, H. Kim, and U. I. Chung. Automatic in-situ focus monitor using line-shortening effect. In *Proceedings of SPIE*, volume 3677, page 184, 1999.

- [102] A. J. Den Boef, M. Dusa, A. G. M. Kiers, M. Van Der Schaar, et al. *Method and apparatus for angular-resolved spectroscopic lithography characterization*. Google Patents, September 2010. US Patent 7,791,727.
- [103] P. Yan. Understanding bossung curve asymmetry and focus shift effect in EUV lithography. In *Proceedings of SPIE*, volume 4562, page 279, 2002.
- [104] S. Kundu, A. Sreedhar, and A. Sanyal. Forbidden pitches in sub-wavelength lithography and their implications on design. *Journal of computer-aided materials design*, 14(1) :79–89, 2007.
- [105] P. Gupta, A. B. Kahng, and C. H. Park. Detailed placement for improved depth of focus and CD control. In *Proceedings of the 2005 Asia and South Pacific Design Automation Conference*, pages 343–348, 2005.
- [106] H. J. Patrick, T. A. Germer, Y. Ding, H. W. Ro, L. J. Richter, and C. L. Soles. In situ measurement of annealing-induced line shape evolution in nanoimprinted polymers using scatterometry. In *Proc. of SPIE Vol*, volume 7271, page 727128, 2009.
- [107] M. Boonman, C. vd Vin, S. Tempelaars, R. Doorn, J. Zimmerman, P. Teunissen, and A. Minnaert. The performance advantages of a dual-stage system. In *Proceedings of SPIE*, volume 5377, page 742, 2004.
- [108] Streefkerk B. Semiconductor manufacturing equipment in the nanometer process age. "TWINSCAN system" for the immersion lithography. *Electronic Parts and Materials*, 44(3) :27–31, 2005.
- [109] R. Monshouwer, J. H. M. Neijzen, and J. E. Van Der Werf. *Method of measuring overlay*. Google Patents, 2005. US Patent 6,937,344.
- [110] R. E. Eisinger. TECHNISCHE UNIVERSITEIT EINDHOVEN. 2001.
- [111] R. T. Plug, A. J. Den Boef, K. D. Van Der Mast, et al. *Metrology tool, system comprising a lithographic apparatus and a metrology tool, and a method for determining a parameter of a substrate*. Google Patents, March 2009. US Patent 7,502,103.
- [112] B. La Fontaine, J. Hauschild, M. Dusab, A. Achetaa, E. Apelgrena, M. Boonmanb, J. Kristb, A. Khathuriaa, H. Levinsona, A. Fumar-Picib, et al. Study of the influence of substrate topography on the focusing performance of advanced lithography scanners. In *Proceedings of SPIE. San Diego, USA*, volume 5040, pages 570–581, 2003.

- [113] Se-Jong YU. Wafer stage module of twin scan exposure system and method of controlling ..., 2008. Publication number : US 2008/0124662 A1 U.S. Classification : 430/323.
- [114] *Method of calibrating a lithographic apparatus*. November 2002. EP Patent 1,256,843.
- [115] J. Lof, E. T. M. Bijlaart, R. A. S. Ritsema, F. Van Schaik, T. F. Sengers, K. Simon, J. T. De Smit, A. J. M. Den Boef, H. Butler, S. N. L. Donders, et al. *Lithographic apparatus and device manufacturing method*. Google Patents, 2007. US Patent 7,213,963.
- [116] J. Lof, A. T. A. Derksen, C. A. Hoogendam, E. R. Loopstra, J. C. H. U. Mulkens, A. Straaijer, B. Streefkerk, S. N. L. Donders, J. J. S. Mertens, T. F. Sengers, et al. *Immersion lithographic apparatus and device manufacturing method*. 2004. EP Patent 1,420,299.
- [117] L. M. Levasier, A. J. A. Bruinsma, J. F. F. Klinkhamer, G. J. Nijmeijer, and P. A. M. Dekkers-Rog. *Lithographic apparatus, method of calibration, calibration plate, device manufacturing method, and device manufactured thereby*. Google Patents, October 2005. US Patent 6,955,074.
- [118] B. Moest. *Device and method for transmission image detection, lithographic apparatus and mask for use in a lithographic apparatus*. Google Patents, 2007. US Patent App. 11/819,958.
- [119] C. G. M. De Mol, T. J. M. Castenmiller, M. Van Dijk, F. A. C. M. Commissaris, S. De Groot, et al. *Method of operating an optical imaging system, lithographic projection apparatus, device manufacturing method, and device manufactured thereby*. Google Patents, 2003. US Patent 6,563,564.
- [120] C. G. D. E. Mol, T. J. M. Castenmiller, D. M. Van, F. A. Commissaris, S. D. E. Groot, and D. E. C. J. Van. *Operation of a lithographic projection apparatus*. 2001. EP Patent 1,164,436.
- [121] J. J. Ottens, J. J. S. M. Mertens, F. E. De Jong, K. Goorman, and B. Menchtchikov. *Calibration substrate and method for calibrating a lithographic apparatus*. Google Patents, November 2008. US Patent 7,453,063.
- [122] H. Butler, M. E. J. Boonman, P. M. C. M. Van Den, et al. *Lithographic apparatus and device manufacturing method with feed-forward focus control*. Google Patents, September 2006. US Patent 7,113,256.

- [123] W. H. G. A. Koenen, A. W. E. Minnaert, L. Ouwehand, J. M. T. A. Adriens, and W. O. Pril. *Lithographic apparatus and method for determining Z position errors/variations and substrate table flatness*. Google Patents, 2008. US Patent 7,333,174.
- [124] S. H. Hou, E. Huang, A. Tseng, M. Yeh, B. Lin, C. C. Yu, and E. Lin. Improvement of the common DoF across field for hole-structure process layers. In *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering*, page 692434, 2008.
- [125] *Lithographic projection apparatus with adjustable focal surface*. 2002. EP Patent 1,231,513.
- [126] J. J. M. Baselmans, F. A. C. M. Commissaris, S. De Groot, A. B. Jeunink, W. T. Tel, A. H. M. Van Der Hoff, A. Van De Stadt, et al. *Lithographic projection apparatus and device manufacturing method using such lithographic projection apparatus*. Google Patents, 2007. US Patent 7,262,831.
- [127] Johannes Jacobus Matheus Baselmans, Sjoerd Nicolaas Lambertus Donders, Christiaan Alexander Hoogendam, Hans Jansen, Jeroen Johannes Sophia Maria Mertens, Johannes Catharinus Hubertus Mulkens, and Bob Streefkerk. Sensor shield, July 2007. U.S. Classification : 355/53.
- [128] R. T. Van, T. J. M. Castenmiller, W. H. G. Koenen, Z. A. Van, and M. Broers. *Focus spot monitoring in a lithographic projection apparatus*. September 2004. EP Patent 1,457,828.
- [129] M. Dusa, R. Moerman, B. Singh, P. Friedberg, R. Hoobler, and T. Zavecz. Intra-wafer CDU characterization to determine process and focus contributions based on scatterometry metrology. In *Proc. SPIE*, volume 5378, page 11, 2004.
- [130] M. Orshansky, L. Milor, L. Nguyen, G. Hill, Y. Peng, and C. Hu. Intra-field gate CD variability and its impact on circuit performance. In *Electron Devices Meeting, 1999. IEDM Technical Digest. International*, pages 479–482, 1999.
- [131] J. J. Shin, C. M. Ke, B. J. Lin, et al. *Method to reduce CD non-uniformity in IC manufacturing*. Google Patents, 2007. US Patent 7,252,909.
- [132] J. Van Elp, P. Giesen, and J. J. Van der Velde. *Chuck, lithographic projection apparatus, method of manufacturing a chuck and device manufacturing method*. Google Patents, March 2005. US Patent 6,864,957.

- [133] C. P. Ausschnitt, S. M. Mansfield, M. O. Neisser, C. D. Wait, et al. *Process and apparatus to adjust exposure dose in lithography systems*. Google Patents, 2002. US Patent 6,346,979.
- [134] A. Hisai, K. Kaneyama, and C. N. Pieczulewski. Optimizing CD uniformity by total PEB cycle temperature control on track equipment. In *Proceedings of SPIE*, volume 4690, page 754, 2002.
- [135] A. Bourov, L. C. Litt, and L. Zavyalova. Impact of flare on CD variation for 248-nm and 193-nm lithography systems. In *Proceedings of SPIE*, volume 4346, page 1388, 2001.
- [136] Qiang Shu, Shijian Zhang, JingAn Hao, Yishih Lin, Qiang Wu, and Yiming Gu. Strategy of DoseMapper (DoMa) application and monitor for critical dimension uniformity (CDU) control in sub-45nm gate process. *ECS Transactions*, 44(1) :225–232, March 2012.
- [137] P. Dirksen, C. A. H. Juffermans, R. J. M. Pellens, M. Maenhoudt, and P. De Bisschop. Novel aberration monitor for optical lithography. In *Proceedings of SPIE*, volume 3679, page 77, 1999.
- [138] V. N. Mahajan. Zernike circle polynomials and optical aberrations of systems with circular pupils. *Appl. Opt.*, 33(34) :8121–8124, 1994.
- [139] A. Kroyan, J. Bendik, O. Semprez, N. Farrar, C. Rowan, and C. A. Mack. Modeling the effects of excimer laser bandwidths on lithographic performance. 2000.
- [140] D. L. Dickensheets. Imaging performance of off-axis planar diffractive lenses. *JOSA A*, 13(9) :1849–1858, 1996.
- [141] P. P. Naulleau, J. P. Cain, and K. A. Goldberg. Lithographic characterization of the field dependent astigmatism and alignment stability of a 0.3 numerical aperture extreme ultraviolet microfield optic. *Journal of Vacuum Science & Technology B : Microelectronics and Nanometer Structures*, 23 :2003, 2005.
- [142] J. P. Kirk. Measurement of astigmatism in microlithography lenses. In *Proceedings of SPIE*, volume 3334, page 848, 1998.
- [143] H. J. Levinson and K. B. Nguyen. *System for controlling reflection reticle temperature in microlithography*. Google Patents, 2000. US Patent 6,098,408.

- [144] J. de Klerk, C. Wagner, R. Droste, L. Levasier, L. Jorritsma, E. van Setten, H. Kattouw, J. Jacobs, and T. Heil. Performance of a 1.35 NA ArF immersion lithography system for 40nm applications. *Optical Microlithography XX, Proceedings of SPIE*, 6520, 2007.
- [145] G. H. Ho, A. Cheng, C. J. Chen, C. K. Fang, M. C. Li, I. C. Chang, P. T. Chu, Y. C. Chu, K. Y. Shu, C. Y. Huang, et al. Lens-heating-induced focus drift of i-line step and scan : correction and control in a manufacturing environment. In *Proceedings of SPIE*, volume 4344, page 289, 2001.
- [146] F. J. Pantenburg, S. Achenbach, and J. Mohr. Influence of developer temperature and resist material on the structure quality in deep x-ray lithography. *Journal of Vacuum Science & Technology B : Microelectronics and Nanometer Structures*, 16 :3547, 1998.
- [147] S. Inoue, M. Itoh, M. Asano, K. Okumura, T. Hagiwara, and J. Moriya. Desirable reticle flatness from focus deviation standpoint in optical lithography. *Journal of Microlithography, Microfabrication, and Microsystems*, 1 :307, 2002.
- [148] L. C. Yeh, H. C. Lee, C. J. Chen, T. Y. Wang, et al. *Compensation of reticle flatness on focus deviation in optical lithography*. Google Patents, 2011. US Patent 7,924,405.
- [149] H. J. Levinson and W. H. Arnold. Focus the critical parameter for submicron lithography. *Journal of Vacuum Science & Technology B : Microelectronics and Nanometer Structures*, 5(1) :293–298, 1987.
- [150] M. Mukherjee-Roy, C. H. Tan, Y. K. Tan, and G. S. Samudra. Exposure tool chuck flatness study and effects on lithography. In *Proceedings of SPIE*, volume 4404, page 14, 2001.
- [151] J. Mulken, J. de Klerk, M. Leenders, F. de Jong, and J. W. Cromwijk. Latest developments on immersion exposure systems. In *Proc. SPIE*, volume 6924, page 69241P, 2008.
- [152] B. Roberts, M. McQuillan, N. Louka, T. Zavec, P. Reynolds, and M. Dusa. Critical evaluation of focus analysis methods. In *Proc. of SPIE*, volume 5377, page 207, 2004.
- [153] J. A. Hoffnagle, W. D. Hinsberg, M. Sanchez, and F. A. Houle. Liquid immersion deep-ultraviolet interferometric lithography. *Journal of Vacuum Science & Technology B : Microelectronics and Nanometer Structures*, 17 :3306, 1999.

-
- [154] B. Smith, H. Kang, A. Bourov, F. Cropanese, and Y. Fan. Water immersion optical lithography for the 45nm node. 2004.
- [155] M. LaPedus. Lithography's generation gap. *Electronic Engineering Times*, 2010.
- [156] S. W. Butler and J. A. Stefani. Supervisory run-to-run control of polysilicon gate etch using in situ ellipsometry. *Semiconductor Manufacturing, IEEE Transactions on*, 7(2) :193–201, 1994.
- [157] S. Ruegsegger, A. Wagner, J. S. Freudenberg, and D. S. Grimard. Feedforward control for reduced run-to-run variation in microelectronics manufacturing. *Semiconductor Manufacturing, IEEE Transactions on*, 12(4) :493–502, 1999.
- [158] *Run-to-run controller for use in microelectronic fabrication*. 2000. WO Patent WO/2000/079,355.
- [159] B. Grosman, S. Lachman-Shalem, R. Swissa, and D. R. Lewin. Yield enhancement in photolithography through model-based process control : average mode control. *Semiconductor Manufacturing, IEEE Transactions on*, 18(1) :86–93, 2005.
- [160] C. Gould. Advanced process control : basic functionality requirements for lithography. In *Advanced Semiconductor Manufacturing Conference, 2001 IEEE/SEMI*, pages 49–53, 2001.

Liste des publications

1 Brevets

- 1/ N. Spaziani, J. Massin, New pattern design with high dimensional sensibility to control lithography exposure conditions, PATENT, CNRS No. *IDS0001277*, STMicroelectronics No. *10-GR3C-0.31*, FR No. *100646FR*, Dem. date : *27 Jan 2010*.
- 2/ N. Spaziani, J. Massin, Method of adjusting focus and dose of a photolithographic apparatus, PATENT, CNRS No. *DI04156-01*, STMicroelectronics No. *10-GR3CO-1049*, FR No. *100647FR*, Dem. date : *16 Nov 2010*.

2 Publications

- 1/ N. Spaziani, J. Massin, R.-L. Inglebert, Etudes des contributeurs lithographique sur les variations dimensionnelles, *JNRDM*, Paris (France), 2010.
- 2/ N. Spaziani, J. Massin, Corrélation métrologique, *Annual Review LETI*, Grenoble (France), 2010.
- 3/ N. Spaziani, J. Massin, R.-L. Inglebert, Lithography process control using focus and dose optimisation technique, *SPIE 2011*, San Jose (USA), 2011.
- 4/ N. Spaziani, J. Massin, R.-L. Inglebert, Lithography process control using in-line metrology, *SPIE 2012*, San Jose (USA), 2012.
- 5/ B. Orlando, N. Spaziani, Scatterometry-based dose and focus decorrelation. Applications to 28nm contact hole patterning intrafiled focus investigations, *SPIE 2013*, San Jose (USA), 2013.

3 Conférences

- 1/ N. Spaziani, J. Massin, R.-L. Inglebert, Mise sous contrôle d'équipements de photo-lithographie, *JDD*, Poster, Grenoble (France), 2009.

-
- 2/ N. Spaziani, J. Massin, Contrôle et suivi du focus et de la dose en photolithographie, *Labo Communs CNRS*, Oral, Autrans (France), 2010.
 - 3/ N. Spaziani, J. Massin, R.-L. Inglebert, Lithography process control using focus and dose optimisation technique, *Proceedings of SPIE*, vol. 7973-108, 2011.
 - 4/ N. Spaziani, J. Massin, R.-L. Inglebert, Lithography process control using in-line metrology, *Proceedings of SPIE*, vol. 8324-103, 2012.

Index

- Aberration, 149
- AFM, 63
- Alignement, 48, 125, 132
- Analyse, 176
- Angle, 117
- Aritm, 153
- Assiette, 127
- Astigmatisme, 151
- Asymétriques, 116

- Balayage, 55, 158
- BARC, 52
- Baseliner, 82
- Bossung, 73, 136
- Boucle, 174, 181
- Box-in-Box, 83

- Calibration, 96, 128
- Capteur, 130, 138, 143
- CD, 48, 56
- CDSEM, 63
- Centrifugation, 51
- Circuit, 43
- Cluster, 49
- Cohérence, 100
- Coin, 108
- Contamination, 48, 50, 115
- Contrôle, 177
- Contraste, 72
- Contributeur, 147, 179

- Convolution, 100
- Corrélation, 142
- Correction, 179, 186

- Décalage, 84, 90
- Décentrage, 134
- Décorrélacion, 95
- Défocalisation, 91
- Déphasage, 210
- Déplacement, 150
- Détourage, 51
- Déviacion, 148
- DAFT, 91
- Diamant, 115
- Diffraction, 99
- Dirac, 100
- Distorsion, 107
- DOF, 57
- Dose, 58, 68, 70
- Dual tones, 84

- Echantillonnage, 180
- Echauffement, 153
- EL, 58
- Elément, 143
- Excimère, 67
- Exposition, 52

- Feedback, 174
- Feedforward, 175
- Fente, 55

- Filtrage, 101
Focal, 131
Focus, 59, 71, 73, 133
Fourrier, 100
Fresnel, 86

Géométrie, 108
Gravure, 60

Illuminateur, 100
Image, 74
Incertitude, 194
Indicateur, 177
Indice, 57, 159
Intensité, 52, 69
Interférence, 101
Isolé, 105

Justesse, 194

Lentille, 125
Librairie, 184
Ligne, 114
Linéarité, 107
LVT, 158

Métrologie, 62, 136
Marque, 131
Matériaux, 133
Mesure, 176
Miniaturisation, 43
Modèle, 108
Modulation, 74
Module, 145
Motif, 106

Niveau, 134
NPW Focus, 80

OPC, 108

Périodique, 104
PAG, 53
Particule, 137
Patterning, 47
Pente, 75
Photo-lithographie, 48
Piste, 49, 50, 145
Planéité, 155
Polymère, 52, 53
Précision, 170, 194
Profil, 59
Projection, 71
Pupille, 100, 104
PW, 59

Régulation, 147, 173, 177
Réseau, 100
Résine, 49, 51, 87
Résolution, 57, 113
Réticule, 91, 209, 210
Rugosité, 146

Scanner, 49, 54, 137
Scattérométrie, 63
Sensibilité, 68
Seuil, 68
Signature, 139, 152, 165
Simulation, 72, 108, 112, 180
Source, 54, 100, 105
Symphony, 180

TARC, 52
Température, 160
Topologie, 127
Twinscan, 125

Variabilité, 140
Variation, 62

Zernike, 149