



HAL
open science

Caractérisation et modélisation des effets d'empilement des couches minces sous la résine photosensible pendant le procédé de photolithographie optique

Jean-Christophe Michel

► To cite this version:

Jean-Christophe Michel. Caractérisation et modélisation des effets d'empilement des couches minces sous la résine photosensible pendant le procédé de photolithographie optique. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université Jean Monnet - Saint-Etienne, 2014. Français. NNT : 2014STET4025 . tel-01512658

HAL Id: tel-01512658

<https://theses.hal.science/tel-01512658>

Submitted on 24 Apr 2017

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.

UNIVERSITÉ JEAN-MONNET DE SAINT-ÉTIENNE
ÉCOLE DOCTORALE SCIENCE INGÉNIERIE SANTÉ

THÈSE

Présentée pour obtenir

LE GRADE DE DOCTEUR DE
L'UNIVERSITÉ DE SAINT-ÉTIENNE

Spécialité : Microélectronique

Par

Jean-Christophe MICHEL

Caractérisation et modélisation des effets
d'empilement des couches minces sous la
résine photosensible pendant le procédé
de photolithographie optique

Soutenue le 24 octobre 2014 devant la commission d'examen :

Prof.	Pierre BENECH	(Président du jury)
Prof.	Isabelle SCHANEN	(Rapporteur)
Prof.	Gérard GRANET	(Rapporteur)
Prof.	Alexandre TISHCHENKO	(Directeur de thèse)
Prof.	Olivier PARRIAUX	(Invité)
Prof.	Yves JOURLIN	(Co-directeur de thèse)
M.	Jean-Christophe LE DENMAT	(Encadrant de thèse)
Dr.	Elodie SUNGAUER	(Encadrant de thèse)

Table des matières

Remerciements	11
Introduction générale	15
1 Un peu d'histoire, quelques définitions	21
1.1 Le monde de la microélectronique	22
1.1.1 La microélectronique, un monde très technique	22
1.1.2 Une révolution sociétale en cours	27
1.1.3 Un poids lourd de l'économie mondiale et française	32
1.2 L'histoire de la microélectronique	35
1.2.1 La naissance du transistor et du circuit intégré	36
1.2.2 L'évolution de la microélectronique	39
1.3 Modélisation et simulation numérique	43
1.3.1 Quelques définitions	43
1.3.2 Microélectronique et simulation, un couple tendance	45
1.4 Conclusion	46
2 La photolithographie optique	49
2.1 Principe et constitution de l'équipement	50
2.1.1 Le système d'exposition	51
2.1.2 Le système d'illumination	53
2.1.3 Le réticule ou le masque	55
2.1.4 L'optique de projection	56
2.1.5 Le substrat	56
Premier décor de notre thèse	58
2.2 Les paramètres du procédé lithographique	58
2.2.1 Dose et latitude d'exposition	59
2.2.2 Focus d'exposition et profondeur de champ	60
2.2.3 Matrice d'exposition dose/focus et courbes de Bossung	61
2.2.4 La fenêtre de procédé	61
2.3 La résolution et techniques d'amélioration associées	62
2.3.1 La résolution	62
2.3.2 Amélioration de l'utilisation du système d'exposition	64
2.3.3 Optimisation de la source	65
2.3.4 Différentes technologies de réticule	67
2.3.5 Les avancées dans la résine photosensible	67
2.3.6 La correction des effets de proximité optique	68
2.4 Conclusion	68

3	Correction des effets de proximité optique	69
3.1	Origines et impacts	70
3.1.1	L'effet de densité ou de proximité	70
3.1.2	Le filtrage de la pupille	71
3.1.3	La non linéarité des variations de dimension	72
3.1.4	Les effets de la résine photosensible	72
3.1.5	Autres exemples	73
3.2	La correction du réticule	73
3.2.1	Corrections basées sur des règles géométriques	74
3.2.2	Corrections basées sur une modélisation mathématique	74
3.3	Modélisation de la photolithographie optique	76
3.3.1	La problématique	77
3.3.2	Modèles et approximations	77
3.3.3	La stratégie des TCC	81
3.4	Conclusion : cette thèse	85
4	L'étude expérimentale des effets d'empilement des couches minces	87
4.1	Présentation des effets d'empilement	88
4.1.1	Définition des effets d'empilement	88
4.1.2	Les principaux effets d'empilement	89
4.2	La conception des structures à mesurer	92
4.2.1	La réalisation physique des structures	92
4.2.2	Un objectif double : caractériser et modéliser	93
4.2.3	Position du problème principal	95
4.2.4	Les structures à mesurer	99
4.3	De la mesure expérimentale aux données	101
4.3.1	Le protocole de mesure	102
4.3.2	Incertitudes et bruit de mesures	106
4.3.3	Le traitement des données	107
4.4	La caractérisation des effets d'empilement	110
4.4.1	L'erreur effet d'empilement	110
4.4.2	L'effet de substrat	112
4.4.3	L'effet de transition entre deux matériaux	113
4.4.4	Effets combinés	116
4.5	Conclusion : l'évaluation systématique	117
5	La prise en compte et correction des effets d'empilement	119
5.1	L'état de l'art de la correction des effets d'empilement	120
5.1.1	Optimisation des paramètres du procédé lithographique	120
5.1.2	Amélioration du procédé	122
5.1.3	Modélisation des effets d'empilement	125
5.2	Simulation des effets d'empilement dans le cadre de cette thèse	127
5.2.1	Les différents mode de simulation	127
5.2.2	L'évaluation des modèles fournisseurs	130
5.3	La modélisation rigoureuse	130
5.3.1	Le rôle du simulateur professionnel Panoramic	131
5.3.2	L'algorithme de création de modèle	135

5.3.3	La réalisation du simulateur RCWA	145
5.3.4	Discussion	146
5.4	Conclusion	147
6	L'application de la méthode des sources généralisées	149
6.1	La méthode des sources généralisées	150
6.1.1	Le principe de la méthode	150
6.1.2	Le paramètre de résolution de la méthode	150
6.2	Application de la méthode à la lithographie optique	152
6.2.1	Comparaison de précision RCWA et GSM	152
6.2.2	Etude du temps de simulation et de la consommation mémoire .	153
6.3	Discussion	156
6.4	Conclusion	158
	Conclusion et perspectives	159

Table des figures

1.1	Dopage d'un réseau de silicium	23
1.2	Transistor bipolaire	40
1.3	Transistor MOS	41
1.4	Comparaison technologies standard et silicium sur isolant	41
2.1	Le principe du procédé de photolithographie optique.	50
2.2	Constitution d'un système de photolithographie optique	51
2.3	Evolution de l'équipement de photolithographie	52
2.4	Méthode d'illumination de type Köhler.	54
2.5	Illustration de l'illumination du réticule par un ensemble d'ondes planes	55
2.6	La polarité de la résine	57
2.7	Description de l'empilement des couches minces à l'étape de photolitho- graphie de l'implantation des sources et drain en technologie 28 nm. . .	57
2.8	Variation de la dimension des motifs en fonction de la dose.	59
2.9	Courbes de Bossung : variation de la dimension de motifs en fonction de la dose et du focus d'exposition.	60
2.10	Représentation graphique de la fenêtre de procédé.	61
2.11	Différentes géométries de source optique.	66
3.1	Intensités dans la résine de réseaux de lignes.	71
3.2	Image aérienne d'un motif carré 2D périodique pour différentes valeurs de l'ouverture numérique. A gauche ON=0,6 à droite ON=0,8.	71
3.3	Exemple de correction des motifs du réticule	74
4.1	Illustration de l'effet de substrat sur la résine photosensible	89
4.2	Illustration de l'effet de transition sur la résine photosensible. La ligne de résine au centre de l'image sur substrat de silice est dégradée par la présence de deux lignes de silicium (brillantes sur l'image)	90
4.3	Ligne de résine sur un ensemble de configurations construites à partir d'un motif réel non fonctionnel.	91
4.4	Quelques étapes intermédiaires menant à l'étape de photolithographie de l'implantation ionique des sources et drains des transistors en technologie standard.	96
4.5	Quelques étapes intermédiaires menant à l'étape de photolithographie de l'implantation ionique source et drain en technologie FDSOI.	97
4.6	Exemples de structures test. Silicium en jaune, Polysilicium en rouge, zone à implanter en bleu (complémentaire de la résine), silice en noir. .	99

4.7	Exemples de structures test. Complémentaire de la résine en rose, silicium en jaune, silice en noir.	100
4.8	Exemples de structures effets combinés. Zone implantée en bleu, complémentaire de la résine. Silicium en jaune, polysilicium en rouge.	100
4.9	Mesures de la dimension d'une ligne de résine	103
4.10	Extraction des dimensions en fonction du seuil	104
4.11	Exemple de structures mesurées par microscopie électronique à balayage	106
4.12	Motif circuit pour une ligne de résine sur plusieurs substrats. Silicium en jaune, polysilicium en rouge, silice en noir, complémentaire de la résine en violet.	111
4.13	Tracé de l'erreur absolue à droite et de l'erreur d'empilement à gauche.	111
4.14	Effet de substrat de silice à l'étape de photolithographie des sources et drains en technologie FDSOI. Zone implantée en violet, complémentaire de la résine.	112
4.15	Courbes de Bossung d'une ligne de résine sur les deux substrats uniformes silicium et silice	113
4.16	Effet de substrat de silice à l'étape de photolithographie des sources et drains en technologie FDSOI	114
4.17	Disposition des structures test sur le réticule	115
4.18	Effets combinés entre silicium et polysilicium	116
5.1	Effet de transition silicium/silice pour plusieurs épaisseurs résine	121
5.2	Effet de transition pour plusieurs motifs en fonction de l'épaisseur de la résine	122
5.3	Effet de transition avec et sans utilisation d'une couche anti-reflet . . .	123
5.4	Topographie possible de la surface d'une plaque de silicium	124
5.5	Résultats de simulation du modèle W3D+ d'ASML Brion	129
5.6	Résultats de simulation du modèle topographie de Mentor Graphics . .	129
5.7	Fonctionnement basique de la simulation Panoramic	131
5.8	Fonctionnement du logiciel Panoramic avec plusieurs modèles	132
5.9	Illustration du simulateur Matlab-Panoramic mis en place	133
5.10	Comportement de l'erreur d'un groupe de structures en fonction de la dose	134
5.11	Courbe représentant les points modèles au meilleur focus dans le plan focus-position de l'image	136
5.12	Courbes focus-position de l'image avec Panoramic et le simulateur réalisé pendant cette thèse	138
5.13	Erreur quadratique pour chaque point de la courbe focus-position de l'image	139
5.14	Simulation de l'impact de la transition silicium-silice sur une ligne de résine de 200 nm, pour plusieurs largeurs des lignes de silicium dRX. .	142
5.15	Simulation de l'impact de la transition Silicium-Polysilicium sur une ligne de résine virtuelle de 200 nm.	143
5.16	Représentation de l'algorithme de construction de modèle	144
6.1	Principe de la méthode des sources généralisées	150
6.2	Images aériennes obtenues par simulation GSM en fonction de No. A gauche No=10x10, à droite No=50x50.	151

6.3	Circuit à l'étape d'implantation des sources et drains utilisé pour la comparaison des résultats de simulation RCWA et GSM. Le silicium est en jaune, le polysilicium en rouge.	152
6.4	Circuit à l'étape d'implantation des sources et drains utilisé pour la comparaison des résultats de simulation RCWA et GSM.	153
6.5	Temps de simulation au niveau du réticule.	154
6.6	Temps de simulation au niveau du substrat.	155
6.7	Consommation mémoire de la simulation au niveau du substrat.	156
6.8	Simulation de l'image aérienne d'un niveau Implant Source Drain avec effet d'empilement.	157

Liste des tableaux

1.1	Prévision du classement 2013 des entreprises du semi-conducteur, réalisé en décembre 2013. Revenus en millions de dollars.	34
2.1	Type de sources lumineuses utilisées en photolithographie optique . . .	53
2.2	Evolution des caractéristiques des sources optiques pour la photolithographie	64
4.1	Origines des effets d'empilement à l'étape d'implantation ionique des sources et drains en technologie standard.	96
4.2	Origines des effets d'empilement à l'étape d'implantation des sources et drains en technologie FDSOI	97
4.3	Statistiques de dispersion des valeurs de dimensions expérimentales . .	108
4.4	Coefficients de corrélation minimal des types de structures en fonction de la dose pour une interpolation linéaire	109
5.1	Amplitude de l'effet d'empilement de transition silicium/silice en fonction de l'épaisseur de résine	121
5.2	Décalage du paramètre de meilleur focus de l'effet substrat en mesure et en simulation	140
5.3	Recherche d'un modèle pour les deux substrats uniformes	140

Remerciements

A travers les quelques lignes qui vont suivre, je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères à un certain nombre de personnes qui ont participé à cette thèse, m'ont aidé pendant ces trois années, ou qui m'ont simplement apporté un peu de bonheur par leur présence dans mon quotidien de doctorant.

Je souhaite tout d'abord remercier mes encadrants de thèse, je dirais qu'il y en a à peu près une vingtaine.... Mais commençons avec mes quatre encadrants principaux !

Je remercie Jean-Christophe Le-Denmat, mon encadrant principal pour m'avoir proposé cette thèse il y a un peu plus de trois ans maintenant. Jean-Christophe, tu m'as suivi de près durant ces trois années, avec sérieux, avec plaisir et passion. J'ai apprécié de travailler avec toi qui m'a beaucoup appris et j'ai toujours pensé (ce qui s'est confirmé !) que cette thèse était une excellente opportunité pour ma carrière. Je veux que tu saches que je ne suis jamais venu au travail à reculons, que j'ai tout aussi apprécié nos quelques désaccords et que j'ai souvent dit à la maison que je ne serais pas allé aussi loin sur certains aspects de ma thèse si tu ne m'avais pas parfois poussé dans mes derniers retranchements (mais ça je ne pouvais pas le dire avant !). J'ai eu un encadrant à la fois disponible et de qualité, je ne suis pas sûr que tous les doctorants puissent en dire autant.

J'accorde comme promis un paragraphe spécial à Elodie Sungauer qui mérite aussi de grands remerciements. Elodie, n'étant pas officiellement dans mon encadrement mais sans doute la personne la plus concernée par mon sujet de thèse, tu es très vite devenue ce que j'ai appelé mon référent technique et ainsi mon second encadrant principal. Tu m'as préparé le terrain avant mon arrivée, tu t'es énormément investie dans ma formation, tu m'as également suivi sans relâche pendant ces trois années, je t'ai dérangé si souvent que je ne le compte plus. Ecrivons ici aujourd'hui aussi que tu as lu et corrigé tout mon manuscrit. Mais ce que je tiens à faire remonter dans ce paragraphe c'est que tu m'as accordé un temps dans ton travail qui t'était très précieux et je t'en suis reconnaissant. De ce fait, j'ai souhaité t'avoir à la table du jury lors de ma soutenance et tu as accepté avec joie, je t'en remercie. J'ajouterais que travailler avec toi est un véritable plaisir. Tu fais preuve d'une méthode et d'une organisation dans ton travail quotidien très appréciables et qui m'ont fait gagner beaucoup de temps.

Mes remerciements s'adressent également au Professeur Tishchenko, mon directeur de thèse avec lequel j'ai aussi passé pas mal de temps. Professeur Tishchenko, j'ai beaucoup apprécié de travailler avec vous. Ces journées au laboratoire me semblaient toujours un peu spéciales, elles me changeaient de mon environnement quotidien et me permettaient d'apprendre de nombreuses choses de votre part. Vous avez été d'une patience infinie en répondant parfois vingt fois à la même question ! J'aimais vous écouter parler longuement de certains aspects de vos travaux mais mon bagage scientifique n'était pas toujours à la hauteur. Simplement me contenter de poser des questions n'était pas possible. C'est pourquoi je prenais minutieusement des notes, m'attachais à comprendre le raisonnement global puis je passais du temps à étudier de mon côté avant donc de revenir avec toutes mes questions. J'aurais aimé travailler beaucoup plus

avec vous mais cela aurait été un autre type de thèse. J'ai été déçu que vous ne puissiez pas venir à ma soutenance car je souhaitais vraiment vous montrer l'aboutissement de nos travaux. J'espère que nous aurons encore l'occasion de travailler ensemble.

Professeur Jourlin, je souhaite également vous remercier pour votre rôle de co-directeur de thèse. Votre présence a été très intéressante car un peu particulière. Nous avons moins interagi ensemble sur le plan technique mais vous vous êtes intéressé à mes travaux et vous m'avez apporté de ce fait une vision pleine de recul. En étant détaché de l'aspect très industriel de ma thèse et du travail très technique poursuivi avec le Professeur Tishchenko, vous avez su me donner des conseils importants sur le plan universitaire dans la gestion de mes travaux, dans la rédaction de mon manuscrit et aussi dans la préparation de ma soutenance.

Enfin, je souhaite remercier toute l'équipe RET au complet qui m'a également encadré dans cette thèse (d'où la vingtaine d'encadrants !). Vous vous êtes tous investis à un moment ou un autre dans ma thèse, que ce soit dans mes premières formations où pas mal d'entre vous ont accepté de me donner une heure de formation sur nos outils ; ou pendant mes travaux lorsque mes problèmes techniques adressaient vos compétences spécifiques ou parfois juste votre curiosité ; ou encore à la fin de ma thèse où votre soutien dans la préparation de ma soutenance fut particulièrement important. Vos conseils, notamment en réunion hebdomadaire furent parfois d'un grand secours. Je vous remercie aussi pour mon quotidien de doctorant. C'est aussi grâce à vous si j'ai conservé ma motivation jusqu'au bout, y compris dans les moments de fatigue. Vous m'avez apporté joie et bonne humeur et surtout vous m'avez supporté pendant trois ans ! Merci à tous.

Je souhaite également remercier les deux équipes de fournisseurs car comme dirait Jean-Christophe, la réussite de cette thèse nous la devons aussi à cet écosystème qui s'est mis en place autour du sujet ! Je remercie donc les équipes de Mentor Graphics et ASML-Brion pour leur investissement dans mes travaux, pour l'expertise qu'ils ont également apporté sur le sujet, pour leurs efforts dans nos publications conjointes, et bien entendu pour le plaisir de vous avoir côtoyé pendant trois ans !

Je remercie à présent les membres de mon jury de thèse. Je remercie le Professeur Gérard Granet et le Professeur Isabelle Schanen pour avoir accepté d'être rapporteurs de ma thèse et pour m'avoir fait leur retour sur mon manuscrit, et cela malgré un délai serré. Ce fut un plaisir que de soutenir devant vous. Je remercie le Professeur Pierre Benech que je commence à connaître plutôt bien, pour avoir accepté le rôle de président du jury, pour nos quelques petites discussions et je souhaite le remercier tout particulièrement pour m'avoir permis d'enseigner en école d'ingénieur pendant ma thèse. L'enseignement fut sans doute une des plus belles parties de ma thèse et qui m'a beaucoup fait douter de la suite à donner à ma carrière. Je remercie enfin le Professeur Olivier Parriaux qui est venu remplacer mon directeur de thèse en convalescence, me faisant un retour très positif de la part de mon directeur de thèse sur nos travaux. Merci à vous tous pour cette belle soutenance.

Enfin, j'achèverais cette partie "remerciements de mon cadre de thèse" par tous

ceux qui m'ont chaleureusement accueilli ou qui ont simplement partagé quelques bons moments avec moi. Je remercie mon ancienne équipe à STMicroelectronics qui m'a accueilli pour un projet de fin d'étude me permettant ainsi de postuler pour la thèse qui a suivi et d'être venus assister à ma soutenance pour certains ! Nous avons gardé le contact pendant ma thèse et ce fut très agréable. Je remercie également les personnes du laboratoire Hubert Curien de Saint-Etienne pour m'avoir chaleureusement accueilli à chaque visite et les enseignants de Phelma lors de mes vacances. Je remercie Damien et Clément pour les cafés quotidiens du matin, Anna et Ana pour les plus occasionnels de l'après-midi, Nacer pour ses conseils automobiles, Sylvain pour ses conseils de violoniste, etc ! Je remercie tous ceux que j'ai oublié de remercier. Et je remercie, du plus profond de mon coeur, tous les gens qui trouveront des fautes d'orthographe dans mon manuscrit et qui s'abstiendront de me le faire remarquer, sous peine de poursuites judiciaires (surtout toi Damien si tu ne veux pas que Tonton JC apprenne des énormités à ta gamine !). En bref, merci à tous ceux qui auront fait de mon cadre de thèse un cadre en or.

Mais il n'y a pas que le cadre de thèse. Il y a aussi ceux qui m'ont supporté pendant ces trois années de thèse et pire encore ceux qui m'ont suivi pendant toutes mes études. Ma pensée va donc à ma famille et plus globalement à mes proches qui m'ont suivi et encouragé pendant toutes ces années, d'ailleurs souvent sans vraiment comprendre ce que je faisais. "Il va à l'école" dit Maman. "Il fait de tout petits trucs" dit Papa (la microélectronique !). "Il sera docteur" "Ah bon il fait médecine ?" demande un voisin.

A vous tous je souhaite vous dédier mon premier chapitre de thèse. Ce premier chapitre, souvent qualifié "d'inattendu" et né d'une tout autre volonté, regroupe un ensemble de pensées dépourvues de toute équation mathématique. Il s'agit d'un chapitre introductif, littéraire, historique et parfois ludique. C'est une manière pour moi de vous faire découvrir mon univers, à travers ma propre interprétation. C'est ainsi donc que je vous adresse mes remerciements, à vous mes proches, à vous ma famille, vous mes parents qui avez pu venir et participer à ma soutenance et pour qui cette fin d'étude a donné à la fois de la fierté mais aussi de la tristesse de me voir partir aussi loin. Une pensée à ma mère qui a déjà acheté un dictionnaire anglais et à mon père très attaché à la terre ferme, ravi d'envisager de prendre l'avion !

Enfin merci à toi mon amour, dont je tairais le surnom pour que ces remerciements restent corrects. Nous nous sommes rencontrés j'étais facteur à vélo, à quelques jours du début de ma thèse, je suis maintenant docteur. Tu m'as donc suivi depuis le départ et tu as survécu ! Tu as supporté l'enfant que je suis à la maison, tu m'as préparé de bons petits plats, tu m'as aidé à préparer quelques gâteaux pour l'équipe RET, tu as même relu ma thèse ! Tu as partagé mes moments de fatigue, tu as supporté mes flammes de scientifique. Ton soutien est le plus beau et le plus solide que j'ai reçu ces trois dernières années. J'espère que tu me rejoindras vite de manière définitive ici, pour reprendre le cours de notre petite vie commune... Et merci à mon lapin Panpan qui malgré ses tentatives répétées de m'arracher une main est resté allongé sur le parquet près de moi toutes ces nuits passées à rédiger !

Merci à tous,

Jean-Christophe

Introduction générale

Notre histoire commence le 23 décembre 1947, il neige dans le New Jersey aux Etats-Unis lorsque les chercheurs des laboratoires Bell donnent naissance à ce composant électronique qui s'apprête alors à bouleverser toute notre société : le transistor...

Cela faisait déjà plus d'un siècle que cette révolution se préparait. Le silicium a été isolé et identifié en 1823 par un chimiste suédois Jöns Jakob Berzelius et le germanium fut extrait en 1886 par Clemens Alexander dans une mine allemande, ce qui lui a d'ailleurs valu son nom (Germany). Les premières mises en évidence des phénomènes électriques dans des matériaux semi-conducteurs ont lieu avec Michael Faraday en 1833 qui observe la variation de la conductivité d'un matériau en fonction de la température. Antoine Becquerel en 1839, (grand-père d'Henry du même nom qui deviendra célèbre pour ses travaux sur la radioactivité), découvre l'effet photovoltaïque, Willoughby la photoconductivité en 1873. L'électronique voit le jour par la réalisation du tube à vide début des années 1900 grâce à John Fleming. Mais c'est surtout l'essor de la physique théorique du solide, qui va permettre la réalisation de cristaux de semi-conducteur de qualité, et de la mécanique quantique, qui permettra la compréhension des phénomènes de conduction dans les matériaux solides, qui va propulser la science vers le fameux transistor en 1947. Et il faudra encore attendre quelques années jusqu'à l'invention du circuit intégré en 1958 par Jack Kilby pour que naisse la microélectronique et, avec elle, cette course folle à la miniaturisation des composants électroniques.

Nous sommes en 2014, déjà plusieurs milliard de milliard de transistors ont été réalisés en presque 70 ans et cette haute technologie qu'est devenue la microélectronique a transformé notre quotidien. Difficile d'échapper à la maison, au travail ou même en voiture à la suprémacie du transistor. Il a transformé de nombreux secteurs, a permis l'automatisation du secteur industriel et a littéralement fait exploser les télécommunications. La microélectronique nous a dotés, avec ses ordinateurs, d'une puissance de calcul sans précédent permettant à l'Homme et aux machines la réalisation de tâches intellectuellement très avancées. Notre puissance de calcul de plus en plus grande, une technologie toujours plus poussée et la révolution des objets connectés annoncent l'ère de ce que certains nomment déjà "l'Homme augmenté". Ces évolutions rapides et profondes soulèvent en même temps de nombreuses questions sociétales et éthiques.

Cette puissance de calcul produite par l'industrie microélectronique permet aussi la réalisation d'expériences virtuelles et numériques de plus en plus complexes dont les jeux vidéos, les simulateurs de vol ou les prédictions météorologiques sont de bons exemples. Ces modélisations et simulations numériques ont littéralement transformé le monde scientifique en ouvrant la porte à des expériences virtuelles inconcevables dans le monde réel car trop coûteuses, trop dangereuses ou trop longues pour être réalisées à l'échelle humaine. L'industrie microélectronique, elle-même, utilise la simulation numérique pour la production de ses circuits intégrés, s'inscrivant ainsi dans une sorte de réaction auto-entretenu : de meilleures puces électroniques permettent de meilleures simulations, de meilleures simulations permettent la réalisation de meilleures puces électroniques.

L'évolution de l'industrie microélectronique repose sur la miniaturisation des composants électroniques. Cette miniaturisation permet de réaliser et connecter plus de composants en même temps et sur une même surface de matériau semi-conducteur permettant ainsi la réduction du coût des puces électroniques, l'augmentation de leurs performances et la réalisation de fonctions plus complexes. On trouve ainsi aujour-

d'hui des microprocesseurs contenant des milliards de transistors de quelques dizaines de nanomètres sur une surface de quelques centimètres carrés, connectés par plusieurs kilomètres de ligne conductrice. Parmi les différentes étapes du procédé de réalisation de ces circuits intégrés, le procédé de photolithographie optique est l'acteur prépondérant de la réduction des dimensions des transistors. La taille caractéristique d'une technologie d'un transistor, qui regroupe un niveau de performance donné et une technologie, c'est-à-dire un ensemble d'équipements et un procédé associés, se nomme un nœud technologique.

La photolithographie optique permet grâce à une insolation lumineuse, l'impression de motifs dans une résine photosensible sur les plaques de silicium sur lesquelles sont réalisés les transistors. Son fonctionnement est basé sur l'utilisation du phénomène optique de diffraction et se verra ainsi attribuée, par les lois de la physique, une limite de résolution dépendant de la longueur d'onde de la source lumineuse et de la dimension des motifs à imprimer dans la résine photosensible. Ainsi, la réduction de la dimension des transistors s'accompagne inévitablement de l'évolution de l'équipement de photolithographie correspondant et principalement de la diminution de la longueur d'onde de la source utilisée. Cependant depuis quelques années déjà, l'équipement de photolithographie n'évolue plus de manière suffisamment conséquente pour suivre la course à la réduction des dimensions des circuits intégrés. En effet, diminuer la longueur d'onde de la source signifie également une modification de tous les éléments constitutifs de l'équipement pour un fonctionnement à cette nouvelle longueur d'onde. Cela implique une nouvelle résine photosensible, de nouvelles lentilles optiques, etc. Or, nous n'avons toujours pas à ce jour un nouvel ensemble d'éléments lithographiques permettant la réalisation de circuits plus petits dans le respect des contraintes de coût et de rendement de l'industrie microélectronique. Et pourtant la course à la miniaturisation ne s'est pas arrêtée ! Pourquoi ? Parce que nous avons trouvé le moyen de dépasser ces limites physiques par l'introduction d'un ensemble de techniques dont certaines sont basées sur l'utilisation de la modélisation et simulation numérique du procédé de photolithographie optique. Nous pouvons ainsi prédire le résultat de l'étape de photolithographie et nous adapter en avance de phase en compensant les effets des phénomènes physiques parasites.

Jusqu'à présent, cette modélisation du procédé de photolithographie permettait de calculer l'intensité lumineuse issue de la source dans la résine photosensible sans se soucier des matériaux sur lesquels est déposée cette résine, ou tout du moins en considérant un empilement unique. En effet, les composants électroniques vont être réalisés par empilements de matériaux sur une plaque de silicium, qui seront spatialement traités, gravés, implantés, grâce au procédé de photolithographie. Pour les nœuds technologiques précédant celui du 45 nm, la présence de différents matériaux sous la résine photosensible pouvait être ignorée, les effets résultants étant négligeables par rapport à la précision nécessaire à l'élaboration du procédé. Cependant, à partir du nœud 45 nm, ces effets ne peuvent plus être ignorés.

C'est dans ce contexte que se situent le travail de thèse qui va être présenté dans ce manuscrit. Cette thèse, qui s'intitule "Caractérisation et modélisation des effets d'empilement des couches minces sous la résine photosensible pendant le procédé de photolithographie optique", s'inscrit dans le cadre d'une convention CIFRE qui lie l'industriel STMicroelectronics de Crolles de la région grenobloise, et le laboratoire de recherche Hubert Curien de Saint-Etienne. Mes objectifs en tant que doctorant pourront se décomposer en quatre axes. Le premier est l'étude expérimentale des effets d'empilement des couches minces sous la résine photosensible de certaines étapes de photolithographie optique à STMicroelectronics. Il s'agira donc après un état de l'art des phénomènes déjà observés, de concevoir et réaliser de nouvelles expériences permettant de mettre en évidence le potentiel de ces effets et de comprendre les mécanismes mis en jeu. Il s'agira également d'effectuer de premières simulations pour tenter de déterminer les origines de ces phénomènes. Le second axe est d'utiliser cette expertise dans des projets de recherche communs avec des fournisseurs d'outils de simulation de STMicroelectronics qui vont tenter de répondre à la demande de l'entreprise d'avoir un moyen de prise en compte des effets d'empilement par simulation. Mon rôle sera de fournir des données expérimentales pour la création de leurs modèles, de fournir une expertise technique des effets considérés et d'évaluer partiellement la qualité de leurs modèles. Le troisième axe est le développement d'une modélisation rigoureuse du procédé de photolithographie optique avec le laboratoire, d'évaluer sa précision et d'évaluer les ressources en temps de calcul et mémoire informatique de plusieurs modes de simulation numérique. Enfin, le dernier axe moins technique est celui de jouer le rôle d'interface entre la société STMicroelectronics où je suis basé à environ 90% et le laboratoire Hubert Curien de Saint-Etienne. Ce rôle signifie créer un échange scientifique entre les deux entités, c'est à dire apporter à STMicroelectronics des connaissances universitaires sur les possibilités de modélisation rigoureuse et simulation numérique et apporter au laboratoire une visibilité sur les potentielles applications industrielles de leurs travaux. Il s'agit également d'augmenter la visibilité des deux entités notamment à travers des publications et des présentations en conférences. Les objectifs scientifiques et technique de cette thèse sont donc, l'établissement d'une expertise sur les effets d'empilement méconnus par une étude expérimentale, L'évaluation et le développement de moyens de modélisation de ces effets et l'application de la méthode de modélisation rigoureuse des sources généralisées au procédé de photolithographie optique, ce qui n'a jamais été effectué auparavant. Ce manuscrit tentera de résumer les travaux réalisés pendant ces trois années de thèse. Il est divisé en six chapitres.

Le premier chapitre "Un peu d'histoire, quelques définitions" représente beaucoup pour ma thèse. C'est en premier lieu une démarche personnelle. Tout d'abord, suite à ces travaux de thèse, j'espère définitivement entrer dans le monde professionnel et cela probablement par le domaine de la microélectronique. La rédaction de ce chapitre, et surtout les recherches qui m'y ont mené, est pour moi l'occasion d'approfondir mes connaissances du milieu dans lequel j'ai passé trois années et dans lequel je souhaite démarrer ma carrière professionnelle. Ensuite, il s'inscrit dans ma volonté de réaliser un chapitre original, synthèse d'un travail de recherche et de réflexions personnelles, et de prendre plaisir à rédiger cette thèse autant qu'à la réalisation des travaux scientifiques et techniques. En second, ce chapitre est une trace que je souhaite laisser aux

prochains doctorants. En effet, ayant parfois eu du mal à trouver, classer, trier, les références contenant les informations importantes et utiles, je souhaite donner au lecteur un résumé de mes recherches et surtout un moyen de trouver un certain nombre d'ouvrages scientifiques et littéraires, qui pourront peut-être les aider à démarrer leur recherches. Enfin, j'ai parfois eu le sentiment que ma compréhension a été retardée par de nombreux abus de langage et manques de rigueur. Ainsi, j'essaie avec ce chapitre d'établir une base claire des travaux que je vais présenter. Ce chapitre se divise en trois sections. La première présente la microélectronique au sens large, c'est-à-dire à travers son secteur d'activité, les impacts sociétaux très importants dont elle est responsable et les enjeux qui pèsent encore sur ses épaules, et son économie. La seconde partie retrace les événements les plus importants de son histoire et c'est en tant que doctorant d'une université française que je souhaite mettre l'accent sur son histoire française. La troisième section enfin adresse les notions de modélisation et simulation numérique, là aussi à travers quelques notions historiques et surtout quelques définitions essentielles.

Le second chapitre est totalement dédié à la présentation de la photolithographie optique. Il contient une présentation de son principe et une description détaillée de l'équipement associé. Les paramètres du procédé lithographique y seront définis et on introduira la notion de résolution ainsi que les techniques qui permettent de l'améliorer. Le premier des trois paragraphes intitulés "décor de notre thèse" permettra de mieux situer ces travaux dans le contexte de la photolithographie optique.

Le troisième chapitre se concentre sur les techniques de correction des effets de proximité optique. Les origines et impacts des phénomènes que tentent d'adresser ces techniques seront présentés et illustrés brièvement pour certains, à l'aide du simulateur intégralement codé en langage C++ par mes soins, basé sur une fonction C++ de simulation réalisée avec l'aide précieuse de mon laboratoire au début de cette partie de mes travaux. Nous commencerons ainsi à introduire les résultats techniques de ces travaux de thèse. Nous présenterons brièvement les méthodes de correction de ces effets, ce qui nous permettra de faire une section d'introduction à la modélisation du procédé de photolithographie.

Le quatrième chapitre est un résumé des études de caractérisation des effets d'empilement. Nous vous proposerons une présentation des effets d'empilement, une définition et une classification, qui sont les fruits de nos études. Dans ce chapitre, nous avons souhaité prendre le temps de présenter le cheminement nécessaire à l'obtention de données mesurées, depuis la conception des structures, pour caractériser les effets ou préparer la construction d'un modèle, jusqu'à la mise en place d'un protocole spécifique de traitement des images obtenues par microscopie électronique à balayage. Nous présentons par la suite, les travaux de traitement qui nous ont permis, à partir de nombreuses données et vérifications, de construire des ensembles de données fiables et exploitables notamment pour la construction de modèles fournisseurs. Enfin, nous présentons une production personnelle qui est symboliquement l'aboutissement de ces travaux de caractérisation, à savoir, l'ensemble de structures systématiquement disponible pour une évaluation des effets d'empilement ainsi que toutes les données de type code pour générer les structures ou recettes de mesures qui lui sont associées.

Le cinquième chapitre quant à lui poursuit l'étude sur les moyens de prise en compte des effets d'empilement. Nous commencerons par un état de l'art mais aussi par des études expérimentales de réduction des effets d'empilement par l'optimisation de l'épaisseur de résine ou l'utilisation d'une couche anti-reflet développable. Ensuite nous met-

trons l'accent sur les moyens de prise en compte par la simulation numérique. Nous pourrons donc alors présenter, succinctement pour des raisons de confidentialité, les solutions proposés par les fournisseurs de STMicroelectronics. Enfin nous aborderons les travaux liés à notre propre modélisation des effets en présentant notre algorithme de création de modèle qui utilise de manière précise certaines données mesurées pour fixer les paramètres contenant des incertitudes de mesures importantes. Une rapide présentation de la réalisation technique du simulateur sera également proposée.

Le sixième et dernier chapitre se consacre à la simulation numérique. C'est-à-dire à partir d'un modèle qui pourrait être issu de l'algorithme de construction de modèles du chapitre précédent, nous allons étudier l'utilisation de la méthode dite "des sources généralisées" pour l'application du modèle. Le principe de la méthode sera d'abord exposé. Nous expliquerons quels sont les avantages apportés par le système d'équations obtenu. Ensuite nous effectuerons une étude comparative de la précision et du besoin en ressources informatiques de cette méthode avec une méthode de simulation classique bien connue la RCWA (rigorous coupled waves analysis). Nous montrerons que cette méthode permet une diminution drastique du temps de simulation. Nous conclurons par une discussion sur les possibilités de poursuite de ces travaux dans le cadre des corrections des effets de proximité optique.

Chapitre 1

Un peu d'histoire, quelques définitions

Introduction

Chers lecteurs, bienvenue dans ce premier chapitre de thèse. Si on nous demandait de donner quelques mots clés pour présenter ces travaux, les mots "microélectronique", "photolithographie", "modélisation" et "simulation" seraient en tête de liste. Ce premier chapitre est totalement dédié à la présentation du contexte de ces travaux, à travers des définitions précises de ces notions, et à travers leur histoire. On pourra se demander alors : pourquoi y consacrer un chapitre entier ? Nous répondrons à cette question en citant l'auteur de l'ouvrage "Silicon Earth", John D. Cressler qui nous en donne plusieurs raisons [13, p.67]. J'en retiendrais deux. La première, parce que c'est notre domaine et que nous devons connaître son histoire pour mieux se placer dans son contexte et trouver la voie pour accomplir quelque chose de significatif. La seconde, simplement à cause de l'impact de ces domaines sur notre civilisation. J'ajouterais moi-même, pour le plaisir... Dans ce premier chapitre, nous aborderons donc les notions clés associées à cette thèse, à savoir microélectronique, modélisation et simulation numérique. Nous donnerons quelques définitions en début de chaque section, notamment pour mettre au clair un certain nombre de termes employés dans la modélisation et simulation numérique. Les deux premières sections introduisent la microélectronique, d'abord par sa place dans le monde d'aujourd'hui puis à travers son histoire en passant par la découverte de l'effet transistor. La section suivante sera consacrée à la modélisation et simulation numérique où là aussi nous essaierons de donner quelques éléments historiques. Après avoir abordé la microélectronique et la simulation de manière séparée, nous tenterons enfin, dans une dernière section, de penser ces domaines ensemble et de mener un parallèle historique entre la microélectronique et la simulation numérique sur le thème "De bonnes puces font de bonnes simulations, de bonnes simulations font de bonnes puces".

1.1 Le monde de la microélectronique

Ordinateur, tablette, smartphone, internet, tout ceci ne serait pas possible sans la microélectronique, un domaine industriel unique de par son impact sur la société et son évolution remarquable depuis son apparition au milieu du 20ème siècle. Nous utilisons tous les jours de nombreux produits issus de la microélectronique qui pourtant reste un domaine peu connu du grand public. Poids lourd de l'économie mondiale et française, élément important de la scène politique et de l'indépendance nationale, et à l'origine de ce que beaucoup nomment la seconde révolution industrielle, elle est responsable de la nouvelle ère de la communication que nous vivons aujourd'hui. De ce fait, elle soulève des enjeux sociétaux importants et représente un secteur stratégique d'avenir.

1.1.1 La microélectronique, un monde très technique

A l'heure où les nouvelles technologies de communication tendent à mettre en danger le support papier, et Wikipedia n'étant pas toujours considéré comme une source fiable, nous proposons d'ouvrir le petit Larousse illustré pour y trouver la définition suivante :

Microélectronique : "*Technologie des composants, des circuits, des assemblages électroniques miniaturisés.*" [1, p.688]

Cette définition, quelque peu incomplète, contient cependant un mot important : "la technologie". Toujours d'après ce même dictionnaire [1, p.1039], la technologie est "*l'ensemble de savoirs et de pratiques, fondé sur des principes scientifiques, dans un domaine technique*". La microélectronique est donc un ensemble de méthodes et de connaissances industrielles qui permettent la fabrication de circuits électroniques. A cette définition manquent deux notions essentielles. Ajoutons donc, que les circuits réalisés sont des circuits *intégrés*, appelé également *puces électroniques*, et fabriqués à partir de matériaux *semi-conducteurs*.

Semi-conducteurs, circuits intégrés et miniaturisation

Dans la référence [24, p.30], l'auteur donne la base de la microélectronique en quelques points dont deux nous intéressent ici. La microélectronique s'est développée d'après lui notamment sur :

- la possibilité de contrôler le courant électrique dans des matériaux solides ;
- la fabrication de circuits intégrés.

Le contrôle du courant électrique dans des matériaux solides est possible grâce à l'utilisation de matériaux possédant des propriétés électriques particulières, des matériaux qualifiés de *semiconducteurs*. Le terme semi-conducteur apparait pour la première fois dans un article allemand en 1911 qui traite des phénomènes thermoélectriques [13, p.77]. D'un point de vue électrique, les matériaux peuvent être classés en trois catégories, les isolants qui ne permettent pas la conduction électrique, les métaux naturellement conducteurs et les semi-conducteurs [13, p.99]. Un semi-conducteur est un matériau dont la conductivité varie avec l'énergie qui lui est mise à disposition [47, p.117]. Un semi-conducteur peut être *intrinsèque* s'il est constitué d'un matériau pur, par opposition aux semi-conducteurs dits *extrinsèques* où certains atomes du réseau cristallin du matériau sont remplacés par un autre élément chimique, soit de manière naturelle,

soit volontairement pour augmenter la quantité de porteurs participant à la conduction électrique. C'est ce que l'on appelle le dopage. L'image ci-dessous illustre le cas du dopage d'un réseau de silicium avec du bore ou du phosphore :

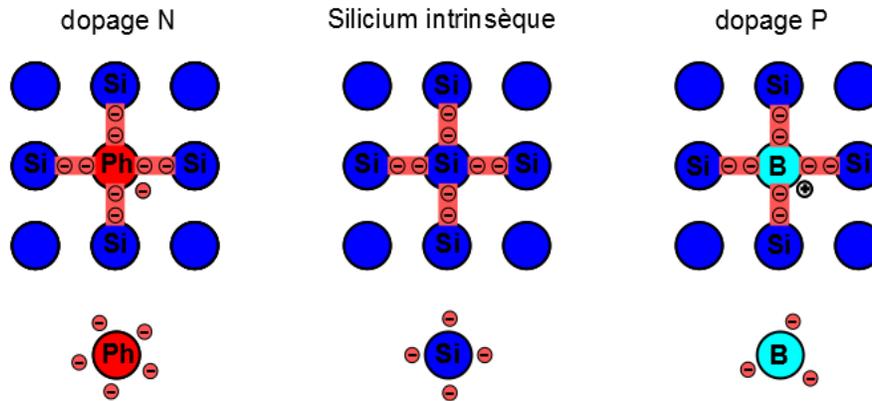


FIGURE 1.1 – Dopage d'un réseau de silicium

Grâce à des combinaisons d'éléments semi-conducteurs dopés positivement et négativement et de matériaux isolants et conducteurs, on peut fabriquer des composants électriques de base comme la diode ou le transistor. Aujourd'hui, le matériau semi-conducteur le plus utilisé dans l'industrie microélectronique est le silicium. Il sert notamment de support pour la réalisation des composants électroniques élémentaires. Ainsi, les différents composants électroniques de base, résistances, capacités, diodes, transistors et autres sont réalisés collectivement et connectés ensemble sur une même surface de silicium. C'est ce que l'on appelle un circuit intégré [47, p.113]. La réalisation collective des composants permet de réduire les coûts de fabrication [24, p.31], et les connecter ensemble directement permet d'améliorer la fiabilité des circuits [34] et de réaliser des fonctions électroniques particulières. Le mot "puce électronique" synonyme aujourd'hui de circuit intégré, viendrait lui de la société Sescosem du groupe Thomson située à Saint-Egrève près de Grenoble [33, p.58], racheté plus tard par la société qui deviendra STMicroelectronics. Les chercheurs posaient les transistors mis en boîtier sur une feuille blanche de papier pour mieux les voir. Sur cette feuille ces transistors apparaissaient noirs comme "*des puces sur un drap de lit*".

La miniaturisation est également une caractéristique intrinsèque de la microélectronique. Les semi-conducteurs permettent le contrôle du courant dans des matériaux solides à travers des composants élémentaires comme le transistor. Le circuit intégré permet lui la connexion de nombreux composants sur une même surface de silicium. La miniaturisation quant à elle va permettre plusieurs choses. Premièrement, elle permet de diminuer le coût des circuits intégrés, car elle permet la réalisation de plus de circuits et composants sur une même surface. Deuxièmement, pour un même prix, les fonctions réalisées sont plus complexes, ce qui permet de générer des nouveaux marchés dont les rentes financeront les prochaines générations de circuits intégrés [24, p.30]. Troisièmement, elle permet l'augmentation des performances des circuits intégrés, c'est à dire augmentation de la vitesse et diminution de la consommation énergétique des circuits [24, p.31][47, p.62].

Des sciences fondamentales et des hautes technologies

Ce que peut déjà laisser présager le paragraphe précédent, notamment l'aspect miniaturisation, c'est que la microélectronique est un domaine extrêmement complexe. Cette complexité s'illustre d'ailleurs par une dualité science/industrie très forte. Tout d'abord, la microélectronique, tout comme l'industrie nucléaire, est un des rares domaines où "la science a précédé l'art" [13, p.68] [56]. En effet, il aurait été impossible de réaliser un transistor sans l'essor des sciences fondamentales et expérimentales. La compréhension des phénomènes de conduction électrique dans les matériaux solides et le rôle des impuretés dans les semi-conducteurs, nécessite l'application de la physique quantique. De plus, un transistor ne peut être obtenu qu'à partir de matériaux semi-conducteurs purifiés, au niveau chimique (pas d'autres éléments chimiques présents), et au niveau de la structure cristalline (pas de dislocation dans le réseau atomique). Il faut donc maîtriser le principe physico-chimique et le procédé pratique de la croissance cristalline [47, p.16]. Pour exemple, deux ans avant la découverte officielle du transistor par les laboratoires Bell en décembre 1947, les chercheurs ont réalisé un transistor non fonctionnel (amplification du courant non-observé) à cause des défauts de surface du cristal de silicium [13, p.80]. Cette importance de la science fondamentale dans la naissance de la microélectronique est très présente dans la littérature dont quelques exemples suivent, la première citation illustrant d'ailleurs cette dualité science/industrie :

- *"Il s'agit de la conjonction heureuse de plusieurs évènements : le triomphe d'une théorie physique étonnante, la mécanique quantique, qui a permis dans les années 30 la compréhension et le contrôle des mécanismes électriques dans la matière, les progrès fulgurants de la physique des matériaux et, enfin - et peut-être surtout-, des enjeux et des moyens industriels colossaux"* [47, p.8] ;
- *"La microélectronique, enfant prodige de la physique"* [47, p.11] ;
- *"les lois de la mécanique quantique sont nécessaires pour comprendre"* [18, p.1] ;
- *"l'ordinateur moderne est le fils du transistor, lui même produit de la mécanique quantique"* [5, p.138] ;
- Ce même auteur, Claude Allègre, nous renvoie vers une citation de Federico Mayor, ancien directeur général de l'UNESCO : "Pour qu'il y ait science appliquée, il faut qu'il y ait science !"

Ensuite, la présence de la science dans l'industrie des semi-conducteurs s'illustre par la présence de nombreux physiciens dans ce domaine ; on pense notamment à la découverte du transistor aux Etats-Unis par Walter Brattain physicien expérimental, John Bardeen et William Shockley théoriciens, trio récompensé par un prix Nobel de physique en 1956. John Bardeen est actuellement le seul homme à avoir reçu deux prix Nobel de physique (Marie Curie en a reçu deux, mais un en physique et un en chimie). D'ailleurs, nous pouvons citer Emmanuel Rosencher qui dans "la puce et l'ordinateur" qualifie les laboratoires Bell de "pépinière de génies" qui *réunissent à l'époque*

une concentration miraculeuse de chercheur d'une exceptionnelle qualité [47, p.33]. On pense également aux physiciens allemands Heinrich Welker et Herbert Mataré qui ont réalisé le transistor français pour la Compagnie des Freins et Signaux de Paris à la fin des années 1940. La microélectronique verra naître dans ses rangs deux autres prix Nobel de physique avec l'ingénieur Jack Kilby pour l'invention du circuit intégré et Léo Esaki pour la découverte de l'effet tunnel dans les semi-conducteurs. Aujourd'hui cette dualité science/industrie se remarque également par l'existence de relations très étroites entre les laboratoires de recherche et l'industrie microélectronique, à travers notamment la présence de doctorants entre universités et industries (c'est le cas de cette thèse), à travers des programmes de recherche ou alliances, et surtout par la volonté, comme l'indique l'office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques français, de rapprocher les chercheurs en sciences fondamentales des experts de l'industrie. Les laboratoires industriels ont surtout vocation à améliorer les technologies existantes alors que les véritables ruptures technologiques viennent de la recherche fondamentale [12, p.133]. Enfin, cette dualité s'exprime aussi et surtout par la présence de toutes les sciences dans cette industrie. De l'étude de marché effectuée par les sciences économiques et sociales aux applications spectaculaires qui donneront de quoi réfléchir aux commissions d'éthique, la réalisation de la puce électronique nécessite l'utilisation intensive des sciences dures. Nous citerons par exemple l'emploi des mathématiques, avec les statistiques qui sont utilisées dans les outils de détection de défauts sur plaque de silicium ou pour le traitement des données, les méthodes de résolution d'équations servant à la modélisation des étapes de procédé. Nous pouvons donner quelques exemples de domaines de la physique très utilisés avec notamment les techniques du vide appliquées aux équipements de traitement des plaques de silicium, l'électromagnétisme pour l'implantation ionique, les techniques d'imagerie, la physique des plasmas pour certaines gravures, la physique des lasers pour les sources lumineuses des équipements de photolithographie, etc. La chimie se manifeste lors des étapes de gravure humide par exemple, lors des réactions chimiques des résines exposées en photolithographie ou lors des croissances de matériaux à hautes températures. Enfin, la microélectronique se diversifie aussi par des applications biologiques. Quant à l'aspect hautes technologies, il suffit de relever également quelques descriptions de la microélectronique données dans les ouvrages bibliographiques pour s'en rendre compte :

- la microélectronique c'est "*interconnecter des milliards de transistors par des kilomètres de fils conducteurs microscopiques isolés entre eux*" [24, p.30] ;
- "*elle est à la fois un condensé de science et de développement technologique de très haut niveau et dans le même temps un facteur de progrès socio-économique sans égal depuis la généralisation de l'électricité*" [11, p.11] ;
- c'est une industrie qui "*a toujours privilégié la performance et un coût réduit à la complexité*" [24, p.32] ;

Tout ceci a participé et participe aujourd'hui à faire de la microélectronique une industrie des plus complexes, mais le résultat en vaut la chandelle comme le démontre cette dernière citation [7, p.35] "*l'efficacité de la technologie silicium actuelle est telle qu'aucune autre technologie électronique potentiellement plus avancée ne peut trouver*

sa place pour l'instant"

Enfin, nous concluons ce paragraphe par quelques citations qui mettent en avant la complexité de la microélectronique par des métaphores ou comparaisons ludiques, pour le plaisir :

Claude Allègre voulant illustrer l'évolution étonnante de la puissance de calcul des circuits intégrés :

- *"Aujourd'hui, le fonctionnement d'une automobile BMW repose sur autant d'instructions informatiques que celles utilisées lors du voyage Apollo qui emporta Armstrong sur la lune en 1969!"*.

Claude Saunier sénateur, illustrant la miniaturisation des circuits :

- *"...réduit d'un facteur 10000 c'est comme intégrer les fonctionnalités du paquebot France dans sa réplique de collection de poche". [11, p.7];*

- *"Pour imaginer la complexité de cette activité, il faut savoir qu'un microprocesseur est 10 000 000 de fois plus petit que Paris, mais qu'il doit intégrer, sur une surface d'1,4 cm², les mêmes implantations d'habitation et de fonctionnement (voiries, fluides, galeries souterraines, transports, etc.) que la ville toute entière." [11, p.26].*

Et enfin, une citation sur la miniaturisation bien connue de Richard Feynman lors d'une conférence en 1959 à l'institut technologique de Californie :

- *"Pourquoi ne pourrait-on pas écrire la totalité des 24 volumes de l'encyclopédie Britannica sur la tête d'une épingle?"*

Bien que cette citation soit souvent reprise dans le monde de la microélectronique, elle ne lui est pas réellement dédiée, mais plutôt à l'univers des microsystèmes qui lui est lié.

Et plus encore....

Effectivement, une ouverture s'impose. Si la microélectronique à la base s'est construite sur la fabrication des circuits intégrés, elle est aujourd'hui une technologie appliquée et applicable à la réalisation d'autres produits, notamment de microsystèmes [24, p.13] qui associent à l'électronique des actionneurs mécaniques. Ces microsystèmes commencent eux aussi à s'imposer dans notre quotidien, notamment dans l'automobile avec les capteurs de pression de pneu ou les systèmes d'injection de carburant, également à la maison avec les imprimantes à jet d'encre ou les jeux vidéos qui détectent les mouvements des joueurs. Plus proche de la microélectronique, l'industrie du semi-conducteur essaie de diversifier son offre avec des technologies dérivées, par exemple de type radiofréquence qui permet à nos ordinateurs un accès internet à distance, ou de type optique qui rend la prise de photographie possible depuis un téléphone portable [12, p.42]. Enfin ajoutons que la microélectronique est une technologie qui permet l'essor de domaines comme l'énergie photovoltaïque ou les biopuces [24, p.4]. Ainsi, l'univers de la microélectronique est un monde très complexe dans lequel cohabitent les sciences fondamentales et les hautes technologies. Mais ce qui est encore plus remarquable c'est l'impact que cet univers a eu et a encore aujourd'hui sur notre société. La microélectronique c'est aussi une véritable révolution sociétale encore en cours.

1.1.2 Une révolution sociétale en cours

Outre l'aspect très technique de la microélectronique qui peut fasciner un grand nombre de scientifiques, industriels ou même particuliers, elle doit être mieux connue du grand public surtout pour la révolution sociétale qu'elle a engendrée. Nous épargnerons aux lecteurs la liste des citations des différents ouvrages qui contiennent les termes "révolution" ou "boulversement historique", car à peu près tous les ouvrages étudiés pour ce chapitre (et il y en a...), techniques ou historiques, regorgent d'anecdotes ou réflexions à ce sujet [33, p.9]. Nous trouvons plus intéressant de reprendre les prédictions d'Emmanuel Rosencher dans la partie "vers une révolution permanente" [47, p.81] de "*La puce et l'ordinateur*" faite en 1993. D'après lui, en 1993, nous n'étions qu'à l'aube de la révolution de la microélectronique qui bientôt permettra à chacun d'avoir une image télévisuelle en haute définition numérique, un téléphone portable nous permettant d'être joint partout ou encore un véhicule qui pourra se diriger sur des cartes informatiques.... Nous sommes en 2014 et c'est bien vu! Mais cette révolution ne s'arrête pas là. Elle s'est traduite par une omniprésence de l'électronique dans notre quotidien, privé ou professionnel, par une modification de nos moyens de communication et de nos outils de travail. Elle est devenu la base d'enjeux politiques et sociaux très importants et représente un secteur stratégique pour la santé, l'environnement, la sécurité ou encore pour l'amélioration de la vie des personnes âgées ou atteintes d'un handicap.

Une omniprésence quasi-confidentielle

Ces puces électroniques ont littéralement envahi notre quotidien, elles sont partout, dans de nombreux objets ou produits que nous utilisons tous les jours. Cependant, le "*paradoxe de l'industrie des semiconducteurs*" est d'après le rapport de 2008 de l'office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques français, "*qu'elle irrigue profondément la vie économique et les comportements sociaux tout en restant relativement confidentielle*". Ce paradoxe, ainsi que cette conquête de notre vie quotidienne [47, p.7][34] par les puces électroniques apparaissent dans de nombreuses références dont voici quelques citations issues d'ouvrages et/ou articles différents :

- "*La microélectronique a pénétré tous les aspects de notre vie quotidienne sans que nous en soyons toujours conscients.*" [24, p.29] ;
- "*En effet, jamais les citoyens n'auront aussi peu compris le fonctionnement d'objets qui leur sont tellement familiers...*" [47, p.7]
- "*les communications sont passées au tout numérique sans que le public n'en soit même informé*" [7, p.26] ;
- "*Depuis notre réveil jusqu'à l'extinction des lumières, nous sommes environnés d'objets qui fonctionnent grâce aux composants électroniques.*" [12, p.11] ;
- L'auteur de l'ouvrage [38, p.2] affirme qu'un appareil électrique idéal du point de vue du consommateur est une boîte noire ;

- Enfin ce même auteur [38, p.2] nous fait remarquer que si nous sommes jeunes, nous avons probablement été accueillis dès la naissance par de nombreux appareils électroniques voire même nous avons été en contact avec de l'électronique lors du contrôle de notre santé prénatale.

Non seulement nous sommes en contact avec des circuits électroniques de manière permanente mais la proportion d'électronique des objets que nous utilisons augmente au fil des années. Ce phénomène est appelé la "pervasion" de la microélectronique [12, p.17]. Afin de démontrer avec plus de force l'importance du transistor dans nos vies, élément de base de la microélectronique, l'auteur de l'ouvrage [13, p.7] John D. Cressler effectue un exercice très original que nous nous proposons de résumer. En s'inspirant de la kryptonite du super héros Superman, il imagine l'arrivée sur terre d'un élément inconnu capable d'éradiquer tout transistor de la civilisation humaine. L'exercice consiste à en étudier l'impact sur quatre grands domaines que sont la communication, les transports, la santé et l'économie. Sur le plan de la communication, d'après lui, le monde est plongé dans le silence total, plus de téléphone, radio, internet, d'ordinateur, ni de satellite. Les lignes entre gouvernements sont coupées plongeant le monde dans une tension diplomatique extrême, sans risquer néanmoins une guerre nucléaire impossible à déclencher sans électronique. Sur le plan des transports c'est la paralysie totale. La plupart des véhicules en circulation aujourd'hui ont des moteurs à injection utilisant un contrôle électronique, les avions seraient coincés au sol, les systèmes de géolocalisation à l'arrêt. Au niveau santé, l'arrêt des systèmes électroniques entraîne une perte de toutes les données individuelles de santé, une impossibilité à produire des médicaments, à faire des analyses de sang ou d'urine toutes assistées par ordinateur, le processus d'assurance est coupé. Enfin l'économie tombe également, 95% des transactions économiques se font par voie électronique, impossible de retirer de l'argent, les entreprises ne peuvent plus payer leurs ouvriers et toutes les économies placées en banque s'évanouissent, plus de plan retraite. Plus rien ne peut être acheté ou vendu, les produits sont répertoriés grâce à des codes barres électroniques, les systèmes de réfrigération ne fonctionnent plus. D'après l'auteur, plus de transistor, plus d'infrastructure de communication, de transport, de santé et d'économie, et je cite *"la vie telle que nous la connaissons cesserait simplement d'exister si on retirait les transistors de la planète."* Ainsi nous remarquons combien nous sommes aujourd'hui entourés d'électronique et combien notre mode de vie est devenu dépendant de cette technologie. Raison de plus pour en apprendre davantage sur ce domaine.

La seconde révolution industrielle

J'ai trouvé très intéressant de voir la microélectronique citée dans la littérature comme étant à l'origine de ce qu'on appelle la seconde révolution industrielle. La première étant due à l'automatisation du travail manuel, notamment grâce aux machines à vapeur et la seconde donc, comme étant une automatisation du travail intellectuel [47, p.103][33, p.10]. On peut voir l'impact de la microélectronique sur notre façon de travailler de plusieurs manières. Tout d'abord, grâce à l'électronique, nous avons pu automatiser les machines industrielles. L'électronique et l'informatique qui en découle,

permettent à un opérateur de donner des instructions à une machine qui va pouvoir agir, récolter et traiter des données pour réagir et renvoyer des informations à l'opérateur de commande [47, p.83]. Ensuite, cette même électronique a permis de décupler la puissance intellectuelle de l'Homme grâce aux ordinateurs et plus globalement grâce à la puissance de calcul que nous offre cette technologie. Et là j'attire particulièrement l'attention du lecteur ! Car lorsque l'on parle de décupler la puissance intellectuelle de l'Homme, on pense évidemment au traitement de texte, aux calculatrices, aux logiciels de calculs ou de tracés mais c'est aussi et surtout la possibilité d'effectuer des modélisations et simulations numériques complexes ! L'exemple de Claude Allègre est prenant [5, p.151], "*On calcule en quelques secondes les trajectoires des planètes que Kepler mit dix ans à réaliser à la main!*". La simulation numérique a permis de faire des expériences virtuelles impensables au siècle dernier [5, p.151]. Enfin, de manière plus globale, la science a été un grand bénéficiaire de cette révolution grâce aux techniques d'imageries et autres évolutions des moyens d'expérimentations, et la biologie génétique a pu décoder le génome humain et étudier l'ADN grâce à l'utilisation intensive des ordinateurs [13, p.435]. Emmanuel Rosencher en 1993 prétend que cette révolution n'aura pas fini dix ans [47, p.103] après et le rapport de l'office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques de 2003 fait encore référence à *une révolution tranquille* [11, p.11] tandis que dans le rapport de 2008 la liste des enjeux [12, p.60] qui reposent encore sur l'évolution de la microélectronique prouve que cette révolution est loin de ralentir. Dans son résumé, Olivier Levard auteur de "Nous sommes tous des robots" paru cette année parle encore d'une *révolution en marche*. Un dernier élément qui entre dans le cadre de cette révolution industrielle mais qui a bouleversé encore davantage le monde dans lequel nous vivons, c'est la révolution de la communication.

L'âge d'or de la communication

Historiquement, ce qu'on appelle les "télécommunications", c'est-à-dire la communication à distance, est un domaine très ancien. Les premiers modes de transmission de l'information étaient optiques, avec notamment les feux de colines utilisés par les romains au 5ème siècle ou le télégraphe aérien international de l'ingénieur français Claude Chappe, première moitié du 19ème siècle. Le lecteur pourra se référer à l'ouvrage intitulé "Génèse et croissance des télécommunications" de Louis Joseph Libois datant de 1982 qui rapporte avec une précision fascinante l'histoire de ce domaine [31], ou au résumé proposé par [13, chap.4]. Mais c'est avec le transistor que tout "bascule".

En effet, comme le dit Henri Lilien dans son ouvrage "Cinq inventions à l'origine de l'ère électronique", l'électronique a provoqué un bouleversement de la société qui est passée *d'un modèle post-industriel à une société fondée sur la communication*, et d'après lui les deux premières inventions en question sont le transistor et le circuit intégré.

Nous n'avons pas encore présenté l'élément essentiel de la microélectronique, le transistor. Bien que ce soit les combinaisons de transistors avec d'autres éléments électroniques qui permettent de réaliser des fonctions extrêmement complexes, le transistor lui-même ne réalise que deux fonctions élémentaires. Il permet soit d'amplifier le courant électrique, soit d'agir comme un interrupteur en laissant passer ou en bloquant le courant électrique. Absence de signal, présence de signal, 0 ou 1, c'est la base de l'information numérique [5, p.132][13, p.13]. Cette révolution de l'information numérique d'après [7, p.73] a abolit les contraintes géographiques et permet la recherche d'infor-

mations d'une simplicité sans précédent. La vitesse de transmission de l'information a bouleversé notre rapport au monde. La performance actuelle de nos transistors et circuits intégrés a permis la création de réseaux sociaux qui permettent une interaction entre personnes de tout type de vies et de cultures [13, p.441]. Et ce que montre l'ouvrage [29], c'est que nous nous dirigeons vers une communication non plus d'individu à individu mais aussi entre les individus et les machines de plus en plus intelligentes qui nous équipent au quotidien. Un article récent du Monde Diplomatique, n°61 août 2014 en page 12, intitulé "De l'utopie numérique au choc social" entre d'ailleurs en matière avec un fait divers intéressant, celui d'un réfrigérateur connecté à internet qui envoie des courriers électroniques indésirables. Cet article traite essentiellement de l'impact social et sur l'emploi de l'économie de partage proposé par ce nouveau secteur de la Silicon Valley, né de ces nouveaux moyens de communication. Cela nous montre que la microélectronique soulève des enjeux politiques et sociétaux importants.

Des enjeux politiques

Dans la continuité du paragraphe précédent, la communication est elle-même déjà un enjeu politique. Nous savons notamment que dans les pays peu réputés pour leur démocratie, les gouvernements tentent de contrôler les moyens de communication. Emmanuel Rosencher en donne un exemple dans "La puce et l'ordinateur" [47, p.84]. Selon lui, l'ex-Union Soviétique a été écartée du milieu de la microélectronique non pas à cause de problèmes technologiques mais parce que "*le concept d'un accès large et donc démocratique à des systèmes d'information de haute technicité ne devait guère prévaloir parmi les stratèges industriels des ex-Soviets*". Cependant, la politique au sens large est utilisatrice des réseaux de communication issus de la microélectronique. Outre quelques polémiques récentes en France concernant les "twits", petits messages brefs mis en ligne par nos politiciens en plein sénat ou conseil des ministres, il est devenu beaucoup plus facile de participer à la vie politique grâce à internet, où il suffit d'une simple carte bancaire pour soutenir financièrement son parti [13, p.443].

Mais au delà de la communication, les différents pays à l'origine de la microélectronique ont visiblement vite compris l'impact que pourrait avoir la découverte du transistor sur le plan militaire. Cette découverte par le laboratoire américain Bell n'a été permise que grâce au levé du secret défense américain sur les travaux de l'université de Purdue sur les cristaux de semi-conducteur. De plus, l'armée américaine a annoncé aux laboratoires Bell une semaine avant la conférence de presse de présentation du transistor qu'elle avait déjà réalisé le transistor et qu'ainsi les droits leurs revenaient [13, p.88]. La France elle-même n'aurait pas bénéficié de sa découverte antérieure du transistor à cause du secret défense (en fonction des sources). Mais cette importance militaire n'a pas disparu aujourd'hui. L'office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques fait remonter *les limites du libre échange des technologies clés* dans son rapport de 2008 [12, p.19]. En effet, l'exemple est donné dans ce rapport sur l'achat de puces à une entreprise américaine pour un programme militaire français, dont les performances auraient été limitées. Et inversement, les exportations européennes ont rencontré des difficultés pour intégrer les secteurs spatial et militaire étrangers. D'après ce rapport, la microélectronique est un acteur important de l'indépendance nationale, alors que paradoxalement des alliances entre les grands industriels du monde naissent

pour faire face à l'augmentation exponentielle des coûts et investissements de ce domaine. Ainsi la microélectronique s'est imposée comme un élément clé des relations internationales. Mais elle pose aussi beaucoup de problèmes politiques à l'intérieur de chaque pays.

En France, le gouvernement a beaucoup à faire pour construire un cadre légal aux applications de la microélectronique qui évoluent très rapidement en soulevant des questions très importantes, notamment liées aux risques établis par tous les objets connectés, la protection des données personnelles [29, p.67], la traçabilité des individus [12, p.60], la sécurité des gens contre le piratage informatique, les risques encourus par les enfants qui naviguent librement sur internet [13, p.427], la santé connectée [29, p.97], etc. En parallèle l'état français subventionne des entreprises à la pointe dans le domaine des objets connectés comme la société Withings [29, p.79]. Mais une question importante est soulevée dans la littérature concernant la capacité de la France à relever ce défi. Dans le rapport sénatorial de 2003, nous pouvons lire la remarque nostalgique suivante : "*certains d'entre nous se souviennent encore du passage des gros postes de radio à tubes aux transistors*" [11, p.6], ce qui suppose que nos dirigeants sont plus anciens que cette révolution qui a bouleversé notre société et soulève ainsi la question de leur capacité à cerner ses impacts. L'interlocuteur d'Olivier Levard auteur de "Nous sommes tous des robots" lui fait remarquer que "*les gens qui font les lois en France ont entre 60 et 70 ans*", et que de ce fait "*la réglementation est en décalage total avec la réalité*" [29, p.226]. Pour lui ce problème typiquement français pose énormément de problèmes car l'innovation va se faire à l'étranger laissant notre pays prendre du retard. Finalement dans ce même rapport sénatorial, on peut lire "*Nul ne pouvait alors prévoir ces applications, pas plus que l'on ne peut totalement cerner les applications des développements technologiques actuels*" [11, p.7]. Est-ce que cela soutient l'hypothèse selon laquelle ils sont en décalage avec cette révolution ou ont-ils simplement conscience que cette évolution trop rapide représente un danger potentiel ? Qui aurait pu prévoir ces applications ? Enfin pour donner un dernier élément, la microélectronique a aussi donné naissance au commerce électronique, véritable casse-tête pour notre politique économique. Quel est l'impact du commerce électronique sur les finances de l'état et l'emploi ? [44] [13, p.428] ?

des enjeux sociétaux

Avec ce paragraphe nous entrons dans un domaine tellement large qu'il est impossible ici d'en rapporter un résumé exhaustif sans digression. Nous nous proposons de simplement citer ces enjeux et de développer l'exemple le plus directement lié à la microélectronique. Nous encourageons donc le lecteur, et c'est un peu l'objectif de ce premier chapitre, à visiter les références bibliographiques qui lui sont proposées. L'industrie du semi-conducteur est devenue l'élément de base de nombreux autres secteurs devant ainsi une partie structurante de l'économie actuelle [12, p.19]. D'après le rapport sénatorial si souvent cité de 2008, la microélectronique est donc un acteur très important de certains enjeux sociétaux tels que l'explosion des dépenses de santé, le coût lié au vieillissement de la population, l'amélioration de l'efficacité énergétique, la gestion du trafic routier et la sécurité des biens et des personnes. Nous ajouterons suite à nos diverses lectures, l'éducation, la dépendance ou addiction à la technologie [13, chap.13] ou encore la mort du handicap [29, p.219].

Développons donc le sujet de l'efficacité énergétique, un des grands enjeux du 21ème siècle. Le rapport sénatorial nous fait remonter un chiffre impressionnant, 13% de l'électricité mondiale est consacrée à l'éclairage des villes ! La microélectronique produit des diodes électroluminescences qui consomment 6 fois moins qu'une lampe à incandescence classique, avec une durée de vie 60 fois supérieur, un flux lumineux direct 10 fois supérieur pour une pollution lumineuse moindre. La microélectronique peut également fournir les calculateurs qui gèrent et synchronisent cet éclairage. Grenoble l'a fait ! En seulement 3 ans elle a récupéré son investissement sur le remplacement des feux de circulation. De la même manière la technologie microélectronique offre la possibilité d'une meilleure gestion de l'énergie individuelle, chauffage, climatisation, lumière et permet de récupérer l'énergie solaire avec le photovoltaïque [13, p.448]. Elle permet également une amélioration de la gestion du carburant de nos véhicules avec les systèmes d'injection électronique qui calculent la quantité de carburant optimale à injecter dans le moteur.

Mais attention, les "enjeux sociétaux" peuvent aussi être considérés dans l'autre sens, à savoir que devons nous faire pour gérer au mieux cette révolution, comment aborder cette nouvelle ère, quels en sont les risques ? Nous nous proposons ici de développer la partie impact écologique de la microélectronique. L'industrie électronique est très consommatrice en ressources naturelles et produit en retour énormément de déchets. Le lecteur trouvera aux pages 69 et suivantes du rapport sénatorial de 2008 une liste de chiffres alarmants, dont un qui prétend qu'une puce électronique requiert 630 fois son poids en énergie fossile et en substances chimiques [12, p.69]. Ce chiffre est intéressant car on le retrouve dans l'ouvrage "Silicon Earth" [13, p.447]. On nous explique qu'un moyen d'évaluer la consommation en ressource naturelle d'une industrie est l'index de matérialisation secondaire qui est le rapport du poids total des matériaux secondaires consommés pendant la production et du poids total du produit final. Cette index vaut entre 1 et 2 pour l'automobile, 2 pour un réfrigérateur et 640 pour un circuit intégré !

On comprend rapidement qu'une industrie qui a généré une telle révolution et surtout sur laquelle pèsent autant d'enjeux a forcément un poids très important sur le plan économique. Gérard Matheron, le 23 avril 2013, alors directeur du site de STMicroelectronics à Crolles et président du SITELESC (Syndicat des industries de tubes à vide et semiconducteurs) a annoncé dans une conférence de presse sur l'électronique et ses applications que "*Une part importante de l'activité actuelle et future est en effet à mettre en relation avec les grands besoins sociétaux, à savoir : le médical, la sécurité, la convergence multimédia en mobilité et la gestion de l'énergie en général.*". On peut donc se poser la question du poids de la microélectronique dans l'économie.

1.1.3 Un poids lourd de l'économie mondiale et française

Pour une introduction originale du lien entre le transistor et l'économie mondiale, le lecteur pourra lire l'article "il faut sauver le soldat Kondratief" de Jean-Phillipe Dauvin ancien chef économiste de STMicroelectronics qui replace le transistor dans un cycle économique à long terme, dans l'introduction "Macro-économie de la microélectronique" de l'ouvrage [24, p.19].

Le principe de fonctionnement

Tout d'abord, on peut donner une description très schématique de la place de la microélectronique dans l'industrie de la manière suivante : la microélectronique réalise les circuits intégrés à partir des matériaux semi-conducteurs, l'industrie électronique achète ces puces pour réaliser des produits comme les téléphones portables, les ordinateurs, ou produits divers, ce qui génère une industrie de service, comme la téléphonie mobile ou les opérateurs internet.

Le principe de fonctionnement de l'industrie du semi-conducteur est donné par [24, p.29] comme étant "un cercle vertueux". Comme nous l'avons évoqué précédemment, la miniaturisation des composants électroniques permet une réduction des coûts des circuits intégrés et la mise sur le marché de circuits plus complexes. Ces nouveaux produits permettent à la microélectronique de dégager un chiffre d'affaire dont une partie importante sera utilisée pour la réalisation de la prochaine génération de circuits plus performants et moins chers.

Il est intéressant de constater qu'un autre cercle unique se dessine à l'échelle de la relation entre la microélectronique et ses clients. En effet, la régularité de la miniaturisation des composants par l'industrie du semi-conducteur permet à ses clients d'anticiper les applications à développer, justifiant en retour un investissement lourd dans le développement des technologies en attente [11, p.8]. Ces nouvelles applications génèrent des besoins auxquels l'industrie du semi-conducteur doit répondre, notons par exemple que l'évolution du téléphone mobile vers un appareil multimédia oblige la microélectronique à mieux gérer la consommation énergétique de ses circuits intégrés.

Le marché et ses principaux acteurs

Le marché du semi-conducteur est réputé pour être un marché très cyclique. Si globalement il a évolué de 13% par an de 1960 à 2000 [24, p.20], ce n'est que par alternance de croissances très fortes +46% en 1984, +38% en 1988, +42% en 1994 et de fortes croissances négatives -17% en 1985, -31% en 2001% [12, p.23]. Depuis 2001, le marché semble progresser plus lentement à hauteur de 6% par an [24, p.22], ce qui pourrait être dû à la saturation du marché [12, p.23]. Le marché d'aujourd'hui semble se trouver dans les pays émergents, notamment dans certains pays d'Asie, Japon exclus. On retrouve la cyclicité du marché aussi sur les entreprises qui dominent le marché du semi-conducteur. En 1960, les neufs plus grandes entreprises du semi-conducteur étaient américaines, la dixième européenne [24, p.25]. Pour donner quelques chiffres à jour, en 2013 c'est toujours le géant américain Intel qui domine le monde du semi-conducteur avec un chiffre d'affaire d'environ 50 milliards de dollars et 15,2% du marché. En seconde position vient Samsung avec près de 30 milliard de dollars de chiffre d'affaire et 9,2% du marché. Mais les entreprises qui enregistrent les croissances les plus importantes sont SK Hynix et Micron Technology avec respectivement une croissance de 43,2% et 70,8%. Le tableau ci-dessous donne une prise de vue du marché du semi-conducteur fin 2013, avec un revenu en millions de dollars [55][19] :

Rang	Entreprise	Revenu	Croissance %	taille de marché %
1	Intel	48030	-2,2	15,2
2	Samsung	29644	3,6	9,4
3	Qualcomm	13177	31,1	5,5
4	SK Hynix	12836	43,2	4,1
5	Micron Tech.	11814	70,8	3,7
6	Toshiba	11467	8,1	3,6
7	Texas Instrument	10561	-5,0	3,3
8	STMicroelectronics	8060	-4,2	2,6
9	Broadcom	8011	2,1	2,5
10	Renesas Electronics	7761	-15,2	2,5

TABLE 1.1 – Prévion du classement 2013 des entreprises du semi-conducteur, réalisé en décembre 2013. Revenus en millions de dollars.

On retrouve STMicroelectronics en 8ème position de ce classement effectué fin 2013. Les nouveaux marchés qui s'ouvrent aujourd'hui sont ceux des enjeux sociétaux, à savoir la santé, la sécurité et l'énergie [24, p.23].

Investissements et coûts

Abordons maintenant les questions des investissement et des coûts qui sont particuliers dans le monde de la microélectronique. La haute technicité et la formidable évolution de la microélectronique se retrouvent également sur le plan financier. La construction d'une ligne de fabrication de circuits intégrés actuelle sur des plaques de silicium de 300 mm de diamètre dépasse les 2,5 milliard de dollars [24, p.5]. Pour pouvoir tenir la course à la miniaturisation, un pourcentage du chiffre d'affaire d'environ 20% doit être réinvesti chaque année pour les équipements. De plus, l'industrie de la microélectronique doit maintenir un cadre de recherche et développement très important ce qui constitue une autre source de coûts très importants, on parle de 13% par an dans l'ouvrage [24, p.42]. En 2001, d'après le rapport de l'office parlementaire, les fabricants américains de semi-conducteur ont investi 12 milliards de dollars en recherche et développement alors que la même année, la France avait un budget de recherche publique de 8,7 milliards d'euros [11, p.21]. De ce fait, bon nombre d'entreprises de la microélectronique n'a pas les moyens à longs termes de continuer cette course poursuite à la miniaturisation, ce qui explique la naissance d'alliances entre ces entreprises pour pouvoir diviser les coûts de développement et de production, comme par exemple l'alliance Crolles 2 entre STMicroelectronics et ses partenaires NXP et Freescale [24, p.42]. Mais compte-tenu du caractère stratégique d'une telle industrie, elle bénéficie souvent d'un soutien des Etats. L'exemple le plus récent est la subvention de 400 millions d'euros qu'a obtenu STMicroelectronics de la part de l'état français dans le cadre du projet Nano 2017 [36].

Impact sur la croissance mondiale et française

Finalement, cette formidable industrie, en devenant la brique de base de la plupart des secteurs industriels, a pris une place très importante dans l'économie mondiale. Elle a donc un impact considérable sur la croissance. L'industrie du semi-conducteur en elle-même, a généré environ 250 milliards de dollars de chiffre d'affaire en 2007, ce qui reste modeste comparé au produit intérieur brut mondial. Mais ce qui est impressionnant c'est ce qu'on appelle la pyramide inversée du silicium [11, p.16]. En 2000, alors que le produit intérieur brut mondial était estimé à 28000 milliards de dollars, l'industrie des semi-conducteurs générait 200 milliards de dollars de chiffre d'affaire, permettant à l'industrie de l'électronique d'en créer 1000 milliards et ainsi au secteur des services associés d'en créer 5000 milliards ! Ainsi l'industrie du semi-conducteur se retrouve responsable d'environ 18% du produit intérieur brut en 2000 ! Pour des chiffres un peu moins éloignés, on trouve sur le second rapport souvent cité dans ce manuscrit, datant de 2008, l'indication selon laquelle l'industrie du semi-conducteur contribue pour plus de 10% de la richesse mondiale évaluée alors par un produit intérieur brut de 46000 milliards de dollars [12, p.14]. En France en 2006, les revenus de la connectivité et des services haut-débit correspondraient à un point de croissance annuel de l'époque. Bien entendu, on retrouve ce formidable impact sur l'emploi. D'ailleurs, le progrès technique est connu pour détruire de l'emploi et pourtant en 2007, un emploi dans la microélectronique engendrait 6 emplois supplémentaires [24, p.21].

Voilà qui achève notre étude sur le milieu de la microélectronique. Nous avons pu nous rendre compte à travers cet ensemble de réflexions que la microélectronique est un domaine extrêmement technique. Ce domaine a lancé une véritable révolution sociétale qui risque de se prolonger encore au vue des enjeux sociétaux qui attendent de pouvoir s'appuyer sur cette industrie du semi-conducteur. Cette importance qu'a pris l'électronique dans nos vies peut aussi se lire sur les marchés financiers et l'emploi. De tels bouleversements méritent qu'on s'attache à présent à connaître quelque peu son histoire.

1.2 L'histoire de la microélectronique

Attaquons-nous maintenant, mais de manière assez brève tout de même, à l'histoire de ce formidable milieu qu'est l'industrie du semi-conducteur. Son histoire est assez riche car la microélectronique a évolué à une vitesse jamais égalée par une autre industrie. Je mettrai un point d'honneur dans cette partie de mon manuscrit, en tant que doctorant de l'université française, à faire remonter une partie de cette histoire qui s'est produite en France. Je vais donc vous proposer ici de nous concentrer sur les étapes essentielles du développement de la microélectronique. Cela sera aussi l'occasion de présenter plus convenablement l'acteur principal de cette scène, à savoir le transistor.

1.2.1 La naissance du transistor et du circuit intégré

Au lecteur passionné je conseille l'ouverture de l'ouvrage de John D. Cressler "Silicon Earth" et spécifiquement la lecture du chapitre 4 dédié à l'histoire de la microélectronique. On y trouve une description assez précise des inventions liées aux télécommunications électroniques depuis les travaux d'Alessandro Volta sur les batteries en 1774. Mais je vous propose ici de ne retenir que quelques dates clés.

Quelques découvertes isolées

Remontons tout de même à la découverte des deux matériaux semi-conducteurs les plus connus aujourd'hui, le silicium actuellement le plus utilisé, et un des éléments les plus abondants sur terre puisqu'il constitue plus de 74% de la croûte terrestre [13, p.22], et le germanium qu'il ne faut pas oublier car c'est celui qui a servi à la réalisation du tout premier transistor. Le silicium aurait [47, p.12] été isolé et identifié en 1823 [17, p.2], le germanium en 1886 (voir introduction générale). Les premières découvertes des phénomènes des semi-conducteurs ont été réalisées de manières indépendantes sans qu'on ne sache qu'ils étaient liés, avec la variation de la conductivité du sulfure d'argent en fonction de la température par Michael Faraday en 1833, la photoconductivité par Willoughby en 1873 et le redressement électrique par Braun en 1874 [47, p.13]. En 1883, Edison fait circuler un courant électrique entre un filament et une anode métallique dans un tube à vide et en 1903 John Fleming utilise cette découverte pour la réalisation de la première diode tube à vide, qui sera complétée par Lee de Forest en 1906 par une troisième électrode pour réaliser un amplificateur électrique. Ceci ouvre la voie au domaine de l'électronique. Notez qu'un brevet pour un effet de champ dans les semi-conducteur est déposé en 1926 par Julius Edgar Lilienfeld. Retenez une date supplémentaire, l'invention du téléphone par Graham Bell (ou Berliner suivant les écoles [33, p.29]) en 1876 [13, p.29], car c'est ce qui va pousser les laboratoires Bell à faire les recherches qui vont mener au transistor...

L'effort de guerre

Malheureusement, il est bien connu que de nombreuses avancées majeures en sciences et techniques ont été réalisées dans le cadre de l'effort de guerre, pensez notamment au domaine nucléaire. Entre les deux guerres mondiales, la physique théorique progresse considérablement notamment à travers la physique du solide et la physique quantique. La seconde guerre mondiale va relancer l'intérêt des scientifiques pour l'électronique dans les matériaux solides notamment à cause du radar [13, p.79]. En effet, les radars utilisent des ondes électromagnétiques à suffisamment hautes fréquences pour que les diodes tubes à vide ne soient plus capables de suivre. On revient alors sur la découverte de Braun, le redressement électrique grâce à un cristal de semi-conducteur, la galène [47, p.32]. C'est ce qui va déclencher des recherches intensives sur la croissance de cristaux de qualités, notamment à l'université de Purdue dans l'Indiana sous la demande de l'armée américaine [47, p.33], université qui fournira le cristal de germanium à l'origine du premier transistor.

Coup de pouce du radar et la motivation du téléphone

C'est finalement le téléphone qui va pousser la recherche sur l'électronique des matériaux solides. Aux Etats-Unis, Mervin J. Kelly, directeur de recherche au laboratoire Bell en 1936 décide de construire une équipe de recherche pour l'étude du contrôle de l'électricité dans des matériaux solides dans l'objectif de remplacer les tubes à vide, trop gros et surtout très peu fiables. Cette équipe sera temporairement dissoute pendant la seconde guerre mondiale pendant laquelle certains de ces membres seront mobilisés par des laboratoires de recherche militaire dans des projets portant sur... l'électronique des matériaux solides pour les radars [56]! Cette équipe est à nouveau réunie en janvier 1946 [8] pour reprendre les travaux.

Côté français, la CFS, la Compagnie française des Freins et Signaux, signe un contrat avec le CNET, Centre National d'Etudes des Télécommunication, en 1947 pour le remplacement des tubes à vide des récepteurs des câbles sous-marins, par un dispositif électronique à l'état solide. Travaillant sur les semi-conducteurs depuis 1946, la CFS engage deux physiciens Allemands qui ont travaillé dans les laboratoires militaires pendant la guerre, (sur les programmes de recherche et développement du radar allemand!), Herbert Mataré et Heinrich Welker qui avait déjà un brevet à son actif déposé en 1945 sur l'effet de champ dans les matériaux semi-conducteurs [33, p.30].

La naissance du transistor

La course au transistor est alors lancée aux Etats-Unis mais aussi en France! Le lecteur pourra lire les articles de la conférence IEEE [56] et [8] pour une narration plus technique de la naissance du transistor côté américain et l'article [45] pour le côté français, avec une partie en Allemagne pendant la guerre. Les chercheurs allemands et américains tentent le même été 1945 la réalisation d'un premier dispositif qui échouent pour les mêmes raisons d'état de surface des cristaux de semi-conducteurs utilisés. Les deux équipes sont au coude à coude puisque leurs projets respectifs, qui font suite aux progrès réalisés pendant la guerre, démarrent en 1946 aux laboratoires Bell aux Etats-Unis et 1947 à la CSF en France. L'ouvrage [33, p.16] fait remonter l'information selon laquelle Shockley et Bardeen auraient effectué un voyage en France l'été 1947 et se seraient entretenus avec le CNET qui finance alors le projet de la CFS. Le 23 décembre 1947, les deux chercheurs des laboratoires Bell, Walter Brattain et John Bardeen observent l'effet transistor. Oui, deux chercheurs seulement, bien que trois soient célèbres. En effet, le prix Nobel 1956 qui récompensait alors l'invention du transistor a été décerné à trois chercheurs, les deux énoncés précédemment ainsi que William Shockley qui dirigeait l'équipe à cette époque. Simple anecdote me direz-vous? Peut-être, mais riche de conséquences, nous le verrons par la suite. Les ouvrages que j'ai consultés font tous référence à un conflit qui a opposé William Shockley à ses deux confrères concernant sa contribution à cette découverte. Les ouvrages ne sont pas d'accord sur l'issue du conflit mais il est assez facile de trouver sur internet une photographie de la première page du brevet américain pour le transistor à contact ponctuel et de noter que le nom de William Shockley y est absent [2]. Côté français, nos deux chercheurs observent un premier effet de champ début de l'année 1948 mais c'est avec six mois de retard, en

juin 1948 qu'ils obtiennent un véritable effet transistor.

La France accélère puis se retire de la course

Etrangement, les Américains ne vont pas beaucoup avancer dans les quelques années qui suivent la découverte de l'effet transistor alors que côté français on produit et on utilise les transistors. En 1949, la CFS produit un millier de transistors et 20000 diodes par mois [33, p.39]. Lorsque William Shockley et John Bardeen visitent le laboratoire du transistor français, on leur présente un réseau téléphonique équipé de transistors. Des transistors sont réalisés en 1949 pour la liaison téléphonique Paris Limoges [45]. Mais la France pense que ce domaine n'est pas un domaine d'avenir et les financements disparaissent aux profits du nucléaire ; nos deux chercheurs allemands regagnent alors leur pays natal [45].

Les Silicon-Valleys et le circuit intégré

Rappelez-vous lorsque j'ai dit que le conflit opposant Shockley à ses confrères allait être riche de conséquences. Frustré de ne pas avoir été reconnu pour ses contributions à la réalisation du premier transistor à pointe, ce physicien va réaliser à l'insu de ses collègues de laboratoire un nouveau transistor beaucoup plus performant et prometteur, le transistor bipolaire [13, p.45]. Le dépôt du brevet en juin 1948 de ce nouveau transistor ne sera déposé qu'à l'unique nom de Shockley et avant même l'annonce publique de la réalisation du transistor à pointe. Mais il ne s'arrêtera pas là. En 1955, il quitte les laboratoires Bell pour monter sa propre entreprise à Palo Alto, ce qui lancera la très célèbre Silicon Valley. Petite anecdote au passage, il rassemble un groupe de jeunes ingénieurs fraîchement sortis de l'école dont un certain Gordon Moore et un certain Robert Noyce, fondateurs d'une entreprise connue sous le nom d'Intel, numéro 1 du tableau que nous avons reporté plus haut dans le paragraphe sur les principaux acteurs du marché des semi-conducteurs... Une autre invention majeure vient alors s'ajouter, le circuit intégré, inventé en 1958, à la fois par Jack Kilby, prix Nobel 2000, chez Texas Instrument et indépendamment par Robert Noyce chez Fairchild en 1959 [13, p.92].

Notez que j'ai volontairement mis le titre de ce paragraphe au pluriel, ce qui est peut-être un peu exagéré. Mais côté français que se passe-t-il ? Dans l'ouvrage [33, p.13], deux vallées du silicium sont citées, celles des Etats-Unis, et Grenoble pour la France ! En effet, si le gouvernement français a arrêté d'investir de manière majeure dans la microélectronique début des années 1950, l'industrie va tout de même se développer notamment dans la région grenobloise (mais pas seulement). En 1955, le centre Emile Girardeau est inauguré à Saint-Egrève près de Grenoble [10, p.53]. Il est le laboratoire de la société française de radio SFR qui fabriquait préalablement des tubes à vide et qui va suivre la révolution technologique du transistor avec une première production en juin 1956. En même temps, les laboratoires du CEA (commissariat à l'énergie atomique) sont créés en 1945 pour les recherches nucléaires, mais le service électronique du Centre d'Etude Nucléaire de Grenoble (CENG ancêtre du CEA) créé en 1957 pour faire fonctionner les systèmes nucléaires prendra le train de la microélectronique en marche

dans les années 1960 [35], pour devenir le LETI, laboratoire de l'électronique et des technologies de l'information en 1967. Aux Etats-Unis, l'industrie du semi-conducteur bénéficie du marché offert par la défense américaine [10, p.53] et celui créé indirectement par le président Kennedy qui souhaitait envoyer un homme sur la lune [13, p.94]. En France, malgré les financements du plan calcul (1966-1970) et du plan composant (1976), SFR n'arrive pas à suivre et cherche des alliances [10, p.53]. Le président Valéry Giscard d'Estaing ouvre un marché en France avec le plan de redressement du téléphone français [24, p.14]. Une des sociétés du CENG fusionnera avec la SFR en 1978 pour donner naissance à Thomson semi-conducteur qui fusionnera avec la société italienne SGS pour donner naissance à STMicroelectronics 8ème du marché du semi-conducteur en 2013.

1.2.2 L'évolution de la microélectronique

Abordons maintenant quelques points plus techniques de l'évolution de la microélectronique, ce qui va nous permettre de présenter différentes technologies de transistors et de faire un point sur l'état actuel de la production de la microélectronique, sur le plan technique.

Une évolution remarquable : la loi de Moore

Difficile de ne pas aborder, lorsque l'on parle de l'évolution de la microélectronique, la célèbre et omniprésente loi de Moore. Oui Gordon Moore cité précédemment, cofondateur de la société Intel. En 1965, alors que l'industrie du semi-conducteur ne peut intégrer qu'une dizaine de transistors sur un même circuit, Gordon Moore annonce que la microélectronique va doubler le nombre de transistors sur une même surface de silicium chaque année. Cette loi qui s'est plus ou moins vérifiée est devenue une ligne directrice pour l'industrie du semi-conducteur. D'autres chercheurs se sont rendus compte plus tard que la réduction des dimensions améliorerait également les performances des transistors, ce qui explique que cette loi soit devenue une représentation de l'amélioration des circuits intégrés [24, p.31]. Il y a tellement de référence à cette loi que je laisse libre cours au lecteur pour trouver de plus amples informations à ce sujet. Le lecteur trouvera par ailleurs dans la référence [47, p.86] une réflexion sur les liens entre la réduction d'échelle des transistors et l'amélioration de ses performances ainsi que l'augmentation de la complexité du procédé associé. J'aimerais cependant faire remonter une information qui m'a particulièrement intéressée. Personnellement, j'ai toujours entendu parler de la loi de Moore comme quelque chose de très positif, comme une loi motrice. Mais dans mes recherches bibliographiques pour la rédaction de ce premier chapitre, je suis tombé sur un paragraphe du rapport de l'office parlementaire de 2008 qui s'intitule "la malédiction de Moore" [11, p.21]. Ce paragraphe affirme que la loi de Moore porte certaines limites comme par exemple l'augmentation du coût des investissements et la formation des hommes. Il n'y a pas assez de formations scientifiques dans les grandes économies mondiales.

Différentes technologies de transistors

Tout comme la microélectronique au sens large, le transistor lui-même a évolué. Bien sur en termes de dimensions et de performances mais l'industrie de la microélectronique a vu plusieurs types de transistors naitre depuis le transistor à point de contact de Bardeen et Brattain. [13, p.213] propose une véritable zoologie du transistor avec environ 37 types de transistors. Mais les transistors principaux à connaître sont le transistor bipolaire et le transistor MOS à effet de champ. Aujourd'hui la technologie utilisée est celle que l'on nomme CMOS. Enfin, de nos jours, deux nouvelles technologies de fabrication des transistors apparaissent, le FDSOI et le FINFET.

Le transistor bipolaire est donc le plus ancien des transistors vraiment utilisé pour la production de circuits intégrés. Il peut encore être utilisé pour les applications hautes fréquences ou comme source de tension stabilisée face aux variations de température [18, p.156]. Il est constitué de deux jonctions PN montées en inverse. Une jonction PN est la mise en contact d'un matériau dopé P, positivement, et d'un matériau dopé N, négativement. La figure ci-dessous en donne une représentation :

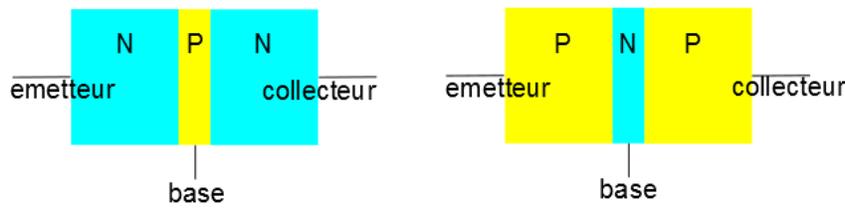


FIGURE 1.2 – Transistor bipolaire

L'intérêt de ce montage est de contrôler le courant du collecteur à partir d'un courant de base beaucoup plus faible. Dans le transistor NPN, le courant d'émetteur est sortant, de base et du collecteur entrant. C'est le contraire pour un transistor PNP.

Le transistor MOSFET pour "Metal Oxyde Semi-conductor Field Effect Transistor" est le transistor le plus utilisé. Son fonctionnement diffère par une commande en tension plutôt qu'en courant et l'utilisation d'un seul type de porteur de charge pour le courant. L'illustration page suivante inspiré de [60] montre le fonctionnement d'un transistor MOSFET à canal négatif.

Ce transistor est constitué de deux réservoirs d'électrons que l'on appelle la source et le drain du transistor. L'application d'une tension de grille permet de repousser les charges positives sous l'oxyde et de mettre en place un canal de circulation des électrons.

La technologie CMOS quant à elle, Complementary MOS qui fit son apparition dans les années 1980, est l'utilisation des deux types de transistor MOS, le NMOS et le PMOS, qui ne laissant pas passer le courant dans les mêmes conditions de polarisation permet une réduction importante de la consommation des circuits pour une technologie deux fois plus complexe [24, p.32].

Un transistor peut être utilisé de manière analogique, c'est-à-dire en amplificateur de courant, ou alors de manière logique en laissant passer ou bloquant le courant. Lorsque le transistor est en mode bloqué, on peut mesurer un courant de fuite qui limite les performances des transistors au fur et à mesure de leur miniaturisation. Deux nouvelles technologies ont alors fait leur apparition pour améliorer le contrôle de ce courant, le

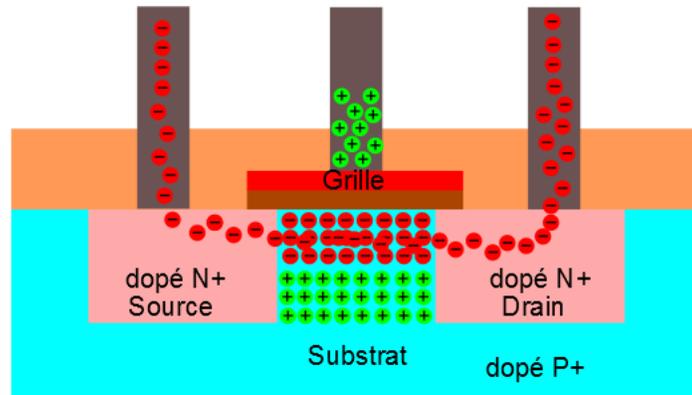


FIGURE 1.3 – Transistor MOS

FDSOI et le FINFET (Fully depleted silicon on insulator et Fin-shaped field effect transistor).

La technologie FDSOI est importante à connaître car une partie des travaux expérimentaux de cette thèse y est consacrée. On utilise de nouvelles plaques de silicium avec une couche d'isolant proche de la surface pour limiter la diffusion des porteurs de charge loin du contrôle de la grille [24, p.40]. La figure ci-dessous montre l'évolution de cette technologie par rapport à l'ancienne :

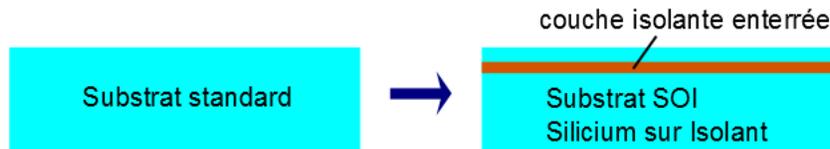


FIGURE 1.4 – Comparaison technologies standard et silicium sur isolant

Dans le cadre de ce manuscrit, nous ferons référence à la technologie standard ou à substrat épais pour l'ancienne technologie qui est dite "bulk" dans le langage industriel et nous parlerons de technologie FDSOI ou silicium sur isolant ou à substrat fin pour la nouvelle solution. Une autre technologie alternative est utilisée, il s'agit de la technologie FINFET, qui consiste à enrôler la grille autour du canal. Nous en parlerons brièvement dans le chapitre 5 puisque cette année à la conférence SPIE advanced lithography qui s'est déroulée à San Jose en Californie, un papier sur les effets d'empilement sur la technologie FINFET a été présenté.

L'industrie microélectronique aujourd'hui et demain

Pour achever cette présentation conséquente de la microélectronique, je vous propose enfin un petit paragraphe sur l'état de cette industrie aujourd'hui, en termes de production et puis une petite discussion sur la suite. Tout d'abord, il faut savoir que la diminution des transistors s'accompagne de l'augmentation de la taille des puces mais aussi de la taille des plaques de silicium. Nous sommes en 2014 et les technologies 28 nm sont sur le marché du semi-conducteur. Les technologies standard, FDSOI et FINFET sont toutes les trois sur le marché. La plupart des entreprises utilisent des plaques de

silicium de 200 ou 300 mm de diamètre. Le nombre de niveaux d'interconnexions des transistors est d'environ 8. Vous trouverez dans les références [18, p.160] et [13, p.160] une description des étapes clés du procédé de fabrication des puces électroniques.

La microélectronique est aussi caractérisée par sa capacité à toujours repousser ses limites. Ainsi, pas un seul auteur de tous les ouvrages cités ici n'a pu donner une prévision correcte sur les limites de l'industrie du semi-conducteur. Prenez par exemple l'ouvrage d'Emmanuel Rosencher qui est un des plus anciens, en 1993. Vous trouverez pages 67 à 71 une liste de limites dépassées, notamment celle qui prédit qu'il sera difficile de travailler avec des technologies inférieures à 150 nm avec nos équipements de photolithographie actuelle qui utilisent des sources lumineuses à 193 nm de longueur d'onde. Dans l'ouvrage "La Micro-Nanoélectronique Enjeux et Mutations" [24, p.35] qui date de 2008, on dit que l'introduction des sources extrême ultra-violet qui doivent répondre à cette limite qui était prévue pour les technologies 90 nm est repoussée au moins au 22 nm. Actuellement on s'inquiète de l'approche des longueurs caractéristiques des effets quantiques [24, p.3]. Beaucoup d'innovations semblent encore possibles, notamment avec les nano-objets, type nanotube de carbone. Ces composants carbonés pourraient prendre la relève de la technologie CMOS selon certains [24, p.5], même si d'autres au contraire, comme Mark Horowitz professeur à l'université de Stanford dans un témoignage pour le magazine électronique de juin 2014, disent que le CMOS qui demeure très efficace continuera de dominer le monde du semi-conducteur à court et moyen terme.

Personnellement, je ne crois pas à une grosse rupture technologique dans les années à venir, je veux dire à court terme, pour cette même raison qu'est l'efficacité de la technologie CMOS actuelle. Il semblerait plutôt que d'autres techniques viennent petit à petit soutenir la technologie CMOS. Les procédés de fabrication des circuits intégrés sont en train de passer par une phase hybride. Certaines présentations à la dernière conférence SPIE advanced lithography, à laquelle j'ai assisté, ont laissé penser que demain certaines étapes critiques pourraient employer la technologie extrême ultra-violet en complément de la technologie actuelle et non en remplacement. On voit apparaître énormément de travaux sur une nouvelle technique qu'on appelle le DSA pour "Direct Self Assembly", où des motifs sur plaque de silicium sont réalisés par la réorganisation de matériaux polymères sous l'effet d'un champ électromagnétique. La photolithographie à extrême ultra-violet, le DSA, la décomposition des niveaux critiques en sous niveaux moins complexes, toutes ces techniques vont devenir un complément et un soutien à la technologie actuelle. Nous l'avons vu, nous sommes à l'aube d'une nouvelle révolution avec les objets connectés et surtout les enjeux sociétaux de type santé et énergie, et la microélectronique s'ouvre à ces marchés. C'est très probablement le domaine de la santé et de l'énergie qui va tirer la recherche pendant que les objets connectés et la sécurité vont faire prospérer le marché du semi-conducteur. C'est certainement les nano-objets carbonés qui sont les plus aptes à venir compléter la technologie CMOS à moyen terme. Alors peut-être nous verrons l'électronique moléculaire, l'utilisation des matériaux supraconducteurs, ou encore une électronique quantique prendre des proportions industrielles.

1.3 Modélisation et simulation numérique

Nous avons maintenant une vue assez large du milieu de la microélectronique mais il reste encore un domaine clé de cette thèse que nous n'avons pas abordé, il s'agit de la modélisation et simulation numérique. Ce domaine est très important déjà dans le cadre de cette thèse mais aussi parce qu'il va de paire avec le monde de la microélectronique.

1.3.1 Quelques définitions

Contrairement à ce que l'on pourrait penser, le grand public est en quelque sorte très familier avec la modélisation et la simulation numérique. En effet, les prévisions météorologiques, les jeux vidéo ou encore la réalisation de maquettes ou le modélisme au sens large, entrent tous dans la modélisation ou la simulation numérique. Intéressons-nous donc à comprendre à quoi correspondent ces deux termes.

Qu'est ce que c'est ?

D'après le Larousse illustré 2006, la simulation numérique est *"la représentation par un modèle physique ou mathématique d'un phénomène complexe, du comportement d'un appareil ou de l'évolution d'un système, à des fins d'étude, de mesure ou d'essai."* [1, p.987]. Quant à la modélisation, elle est définie par *"l'établissement des modèles"*, modèle lui-même défini par *"une structures formalisée utilisée pour rendre compte d'un ensemble de phénomènes qui possèdent entre eux certaines relations."* [1, p.697].

Ainsi, la simulation numérique se rapproche de la démarche expérimentale. Il s'agit de la réalisation d'une expérience virtuelle [5, p.152] [28, p.15]. On peut réaliser ces expériences virtuelles sur un système donné pour diverses raisons, notamment si l'expérience réelle est trop cher, trop dangereuse (nucléaire), si le système n'existe pas encore (simulation de résistance d'un barrage hydraulique avant construction) [28, p.14], ou si la durée d'une expérience est beaucoup trop longue à l'échelle humaine, avec par exemple l'étude des systèmes naturels qui évoluent sur plusieurs milliers d'années [5, p.151].

La simulation numérique est donc un moyen de calcul de la réponse d'un système à un ensemble de phénomènes donné. Mais pour faire ces calculs, il faut connaître le fonctionnement du système. C'est ce qu'on appelle le modèle. C'est lui qui va représenter le système, par un ensemble de relations ou par un ensemble de données. La qualité de la prédiction de l'expérience virtuelle, c'est à dire sa proximité avec l'expérience réelle dépend de la qualité du modèle.

Différents types de modèles

D'après l'auteur [28, p.15], il existe quatre types de modèles : mental, verbal, physique et mathématique. Le modèle mental correspond à la représentation que nous avons du monde qui nous entoure. L'auteur prend l'exemple de la conduite d'un véhicule qui nous est permise parce que nous avons développé une représentation mentale du comportement d'une voiture. Le modèle verbal correspond à la représentation du

fonctionnement d'un système par des mots, le modèle physique à la notion de modélisme, c'est à dire la représentation physique d'un système par un système simplifié plus pratique. Pensez notamment à vos vieux cours de chimie où la représentation des molécules se fait avec des billes et des batons. Enfin, les modèles que l'on rencontre beaucoup en sciences et notamment dans le cadre de cette thèse, sont les modèles mathématiques qui décrivent le fonctionnement d'un système à partir de relations mathématiques entre les grandeurs physiques de ce système. Le lecteur trouvera un approfondissement des types de modèles en [28, p.19] (Stochastique, Déterministe, Dynamique,...).

Mais il y a d'autres adjectifs concernant les modèles que nous entendons régulièrement dans le monde scientifique ou industriel, il s'agit des termes empiriques et rigoureux. L'empirisme est la caractéristique de ce qui ne s'appuie que sur l'expérience [1, p.407]. Un modèle empirique est donc un modèle qui est bâti à partir d'un ensemble d'observations ou de données expérimentales. Ainsi, la représentation d'un phénomène physique par une table de données est un modèle empirique. De même, une représentation par une formule mathématique calibrée uniquement à partir de valeurs expérimentales, c'est à dire sans fondement théorique, est un modèle empirique.

Ainsi, par opposition, on va pouvoir définir un modèle rigoureux comme étant une représentation d'un système basée sur une théorie physique. Typiquement, la représentation du comportement d'un système diffractant peut-être basé sur la théorie scalaire de la lumière ou par la théorie vectorielle des équations de Maxwell. Dans les deux cas le modèle obtenu est un modèle rigoureux.

Comment choisir ?

Suite à ces réflexions, la question du choix du modèle se pose. Quel est le meilleur modèle ? Y a-t-il un modèle juste, vrai ?

Il n'y a pas de modèle juste ou faux, correct ou incorrect [28, p.337]. Un modèle est une représentation d'un système qui a un domaine de validité, dans lequel on souhaite qu'elle fournisse une précision suffisante pour l'utilisation que l'on souhaite en faire. Ici, il y a une notion fondamentale. La qualité d'un modèle dépend de ce pourquoi il a été bâti et est directement reliée à son utilisation [13, p.110][28, p.243]. La mécanique classique peut permettre une modélisation précise du mouvement et de la position des planètes mais appliquée à la physique sub-atomique, le modèle classique n'a aucune validité. Ainsi, utiliser un modèle rigoureux n'est pas forcément synonyme de modélisation de qualité. Un modèle empirique peut tout aussi bien donner des prédictions satisfaisantes s'il est construit sur des données suffisamment précises. La qualité d'un modèle est lié à sa capacité à représenter le comportement du système, mais aussi lié à sa stabilité, c'est à dire sa capacité à rester prédictif en fonction des variations des données d'entrées du modèle.

Prudence....

Dans la littérature, on trouve beaucoup de mise en garde à l'utilisation de la simulation numérique. Pour l'auteur de [28, p.19], la simulation et modélisation ne doivent

jamais remplacer l'observation et l'expérience, ils les complètent. Claude Allègre en [5, p.151], interprète la crise financière des "subprimes" comme étant le résultat d'une modélisation mal maîtrisée par le monde des finances. Lui aussi affirme que le monde réel doit garder l'avantage sur le monde virtuel. L'auteur de l'ouvrage [38, p.5], nous conseille de ne jamais nous fier aveuglément aux prédictions d'un modèle car les méthodes numériques de simulation sont toujours des approximations qui peuvent parfois renvoyer des résultats incorrects.

1.3.2 Microélectronique et simulation, un couple tendance

Ce qui est très intéressant lorsque l'on travaille avec la microélectronique et la simulation numérique, c'est de se rendre compte que les techniques de simulations numériques évoluent en grandes parties grâce aux progrès de la microélectronique qui fournit des transistors toujours plus performants à la base des microprocesseurs, et qu'en retour, la microélectronique est certainement l'un des domaines qui utilisent le plus la modélisation et simulation numérique.

Les premières simulations étaient analogiques, on fait généralement remonter le plus ancien calculateur comme étant le marégraphe de Kelvin en 1870 [28, p.297]. Le premier ordinateur numérique fut l'ENIAC réalisé pendant la seconde guerre mondiale et réalisé sur la base de tubes à vide. Mais ce qui va vraiment transformer le monde de la simulation numérique, ce n'est pas tant le transistor, ni le circuit intégré, mais plutôt le microprocesseur inventé par Intel en 1971. C'est d'ailleurs à peu près à ce moment là que la modélisation du procédé de photolithographie a commencé [25, p.98].

Comme le fait remonter [7, p.37] *la conception des circuits est un bel exemple d'application de l'informatique à elle même*. Les EDA (Electronic Design Automation) sont apparus dans les années 1990. D'après le docteur Thomas Williams dans un article de la conférence IEEE, les EDA ne sont pas seulement un soutien majeure à l'industrie du semi-conducteur mais aussi là où l'électronique commence [57].

Pour se rendre compte de l'utilisation de la simulation dans l'industrie électronique, le plus intéressant est d'ouvrir le rapport de l'ITRS (International technology roadmap for semiconductors) de 2013 spécial Modélisation et Simulation. Relevons simplement les domaines cités en première page :

- Modélisation du procédé, pour les effets de dépôt, gravure, polissage ;
- Modélisation du procédé de photolithographie ;
- Modélisation du fonctionnement des composants électroniques ;
- Modélisation des propriétés des matériaux
- Modélisation de l'impact électrique des boîtiers des puces
- Modélisation de la fiabilité des composants réalisés,.....

Et à cette liste il faudrait ajouter la modélisation du marché des semi-conducteurs, la modélisation des prises de risques des investissements,...

1.4 Conclusion

Cette conclusion achève notre tour d'horizon sur le monde de la microélectronique et de la modélisation et simulation numérique. Nous avons déjà conclu sur la microélectronique mais revenons sur la modélisation et simulation numérique. La notion de modèle est très ancienne et peut prendre des formes diverses telles que la modélisation mentale, verbale, physique ou mathématique. La simulation numérique est une expérience virtuelle qui permet de prédire le comportement d'un système grâce au modèle choisi ou construit. La qualité de la prédiction de cette expérience virtuelle dépend de la qualité du modèle. Les modèles peuvent être empiriques s'ils sont intégralement construits sur la base de l'observation ou des mesures expérimentales, ou rigoureux s'ils s'appuient sur une théorie mathématique qui décrit les lois physiques impliquées dans l'évolution du système.

Ce premier chapitre ne contient qu'une infime partie des informations recueillies pendant la construction de ce chapitre. J'ai pris beaucoup de plaisir à effectuer toutes les recherches qui m'ont mené dans de nombreuses bibliothèques. J'ai été très surpris de découvrir que la France a historiquement été présente dans la course au transistor et j'ai été émerveillé de la plupart des chiffres étonnants ou métaphores ludiques utilisés pour décrire la microélectronique. Non seulement j'ai appris énormément de choses sur le plan culturel et professionnel mais mes recherches m'ont également amené à des lectures techniques qui m'ont permis de progresser dans ma compréhension de la modélisation de la photolithographie et à trouver de nouvelles pistes d'amélioration du simulateur que j'ai réalisé pendant mes travaux.

J'aimerais achever ce chapitre en répondant à un des objectifs que je m'étais fixé, celui de fournir une base de recherche bibliographique à ceux qui me liront. Les deux ouvrages que j'ai le plus apprécié sont "Silicon Earth" de John D. Cressler et "Nous sommes tous des robots" d'Olivier Levard. Le premier est un ouvrage très complet dédié à l'univers du semi-conducteur. On y trouve la description des semi-conducteurs, des transistors, et aussi un ensemble de sections thématiques plus originales sur les transformations sociales liées à l'électronique. L'ouvrage est récent, 2009, l'auteur est du milieu et c'est particulièrement bien écrit. L'approche historique est très bonne et il y a une bibliographie utile. Le second est un ouvrage sorti cette été en 2014 et n'a rien à voir avec la microélectronique à la base. C'est un journaliste qui parcourt le monde à la rencontre des gens qui sont à l'origine des nouvelles technologies et notamment objets connectés. En troisième et quatrième position je suggère "Micro et nano-électronique" de Hervé Fanet, un ouvrage très technique mais qui couvre une large partie de la microélectronique, et "La puce et l'ordinateur" d'Emmanuel Rosencher. Ce dernier est assez intéressant déjà parce qu'il est bien écrit et vulgarise bien les choses. Ensuite ce qui est intéressant c'est sa date : 1993. Il n'est pas suffisamment vieux pour être complètement en dehors de notre révolution mais suffisamment pour que la plupart des limites suggérées soient dépassées. Les deux derniers pour la microélectronique sont "Cinq inventions à l'origine de l'ère électronique" de Henri Lilen, qui contient des informations originales, très axées sur la France mais qui contient quelques incohérences historiques ; et "La Micro-Nanoélectronique Enjeux et Mutation" qui est un recueil de CNRS Editions d'articles très courts qui recouvrent un large domaine de la microélectronique. Enfin pour la modélisation, j'ai trouvé "Modeling of dynamic systems" de Lennart Ljung qui regroupe pas mal de réflexion sur la modélisation au sens large. Maintenant que nous

avons une bonne connaissance de base du milieu dans lequel cette thèse a pris place, nous pouvons adresser des questions plus technique, à commencer par le procédé de photolithographie qui est au cœur de notre sujet.

Chapitre 2

La photolithographie optique

Introduction

Le premier chapitre nous a permis de situer le contexte de cette thèse et de définir les notions importantes de microélectronique et de modélisation numérique. Ce second chapitre est totalement dédié au procédé de photolithographie optique, étape au cœur de la fabrication des circuits électroniques, principal acteur de la miniaturisation de ces composants et surtout étape du procédé directement concernée par les travaux de cette thèse. Ce chapitre permet d'introduire le sujet et un ensemble de généralités indispensables à la compréhension de ce manuscrit. Dans un premier temps, nous décrirons la constitution d'un équipement de photolithographie par projection optique et nous aborderons chaque partie de cet équipement de la source optique au substrat. Dans un second temps, les paramètres physiques du procédé que sont la dose et le focus d'exposition seront décrits. Nous évoquerons l'impact de la variabilité de ces paramètres du procédé sur le contrôle de la forme et des dimensions des motifs imprimés dans la résine. Nous définirons la fenêtre de procédé qui fixe les limites acceptables de ces variations. Enfin, dans le troisième temps, nous aborderons la notion de résolution. Nous expliquerons quelles sont les limites de cette résolution et quelles sont les techniques permettant de l'améliorer.

2.1 Principe et constitution de l'équipement

L'objectif de la photolithographie est de permettre un traitement (gravure, implantation ionique,...) spatialement sélectif de la plaque sur laquelle les composants électroniques sont fabriqués. Le schéma ci-dessous résume les différentes étapes clés de ce procédé :

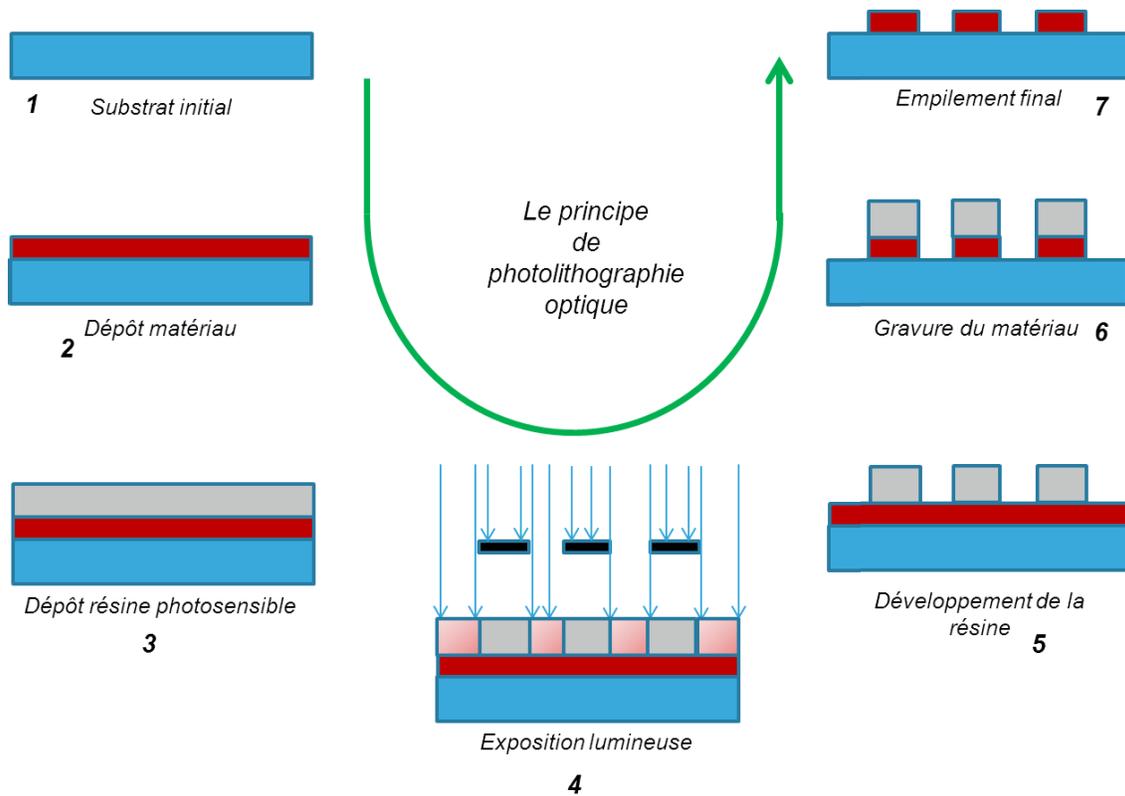


FIGURE 2.1 – Le principe du procédé de photolithographie optique.

Lors de la première étape, une résine sensible à l'exposition lumineuse est déposée sur la plaque. L'exposition lumineuse s'effectuera à travers un réticule sur lequel sont gravés les motifs à imprimer dans la résine. Ces motifs permettront de distinguer les zones où la résine protégera ou non la plaque du futur traitement. Cette exposition se fait à l'aide d'un système schématiquement décrit sur la figure 2.2. Cette illustration met en évidence quatre parties dans un équipement de photolithographie, à savoir le système d'illumination, le masque ou réticule, l'optique de projection et le substrat. Nous allons détailler ces différentes parties dans les paragraphes suivants.

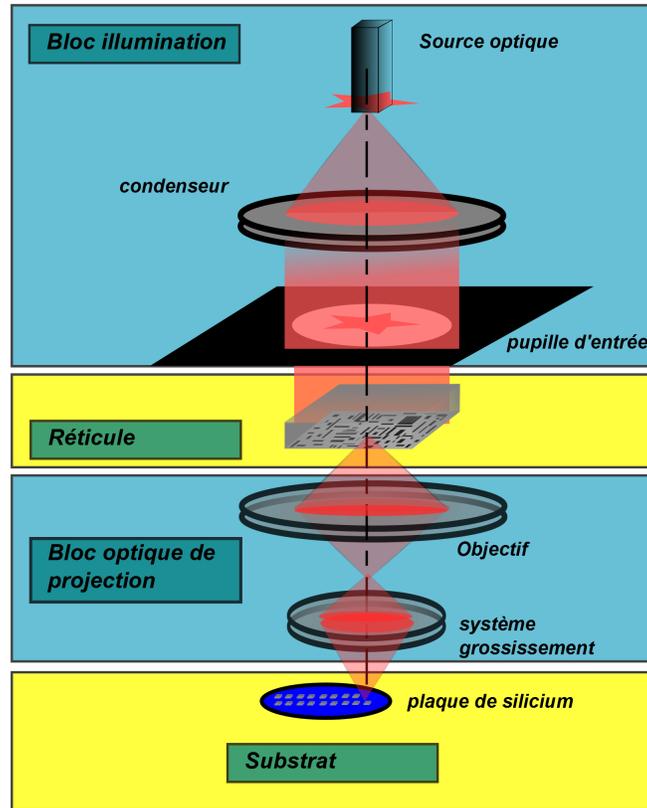


FIGURE 2.2 – Constitution d'un système de photolithographie optique

2.1.1 Le système d'exposition

Un équipement de photolithographie est composé de deux parties appelées la piste et le système d'exposition. La piste est la partie du système qui permet l'insertion des plaques ainsi que les étapes de procédé précédant et succédant à l'exposition lumineuse comme le couchage de la résine ou son développement. De la même manière que les modules qui le composent (source, optique de projection,...), l'équipement, et particulièrement son mode d'exposition, a évolué au fil des années. Globalement, la tendance est à l'augmentation de la distance entre le réticule et la résine photosensible, et à la diminution de la surface d'exposition sur le substrat [59, p.13]. La frise figure 2.3 donne un aperçu de l'évolution du mode d'exposition.

Sur cette frise historique, nous pouvons voir que les premiers équipements de photolithographie, utilisés depuis les années 1960 jusqu'au début des années 1970, sont des équipements de lithographie par contact entre le masque contenant les motifs à imprimer et la résine photosensible [25, p.10] [59, p.14]. Cependant, ce contact est responsable de dégradations sur le masque et de défauts dans la résine photosensible. Ainsi, bien qu'offrant une résolution inférieure, la photolithographie de proximité a été introduite [59, p.14]. Grâce à un espace créé entre le masque et la résine photosensible, les dégradations des deux parties sont éliminées réduisant ainsi le coût de l'étape de photolithographie [25, p.10]. Cet espace, entre $5 \mu\text{m}$ et $25 \mu\text{m}$, doit être le plus petit

possible pour éviter une perte de résolution due aux phénomènes de diffraction [25, p.10].

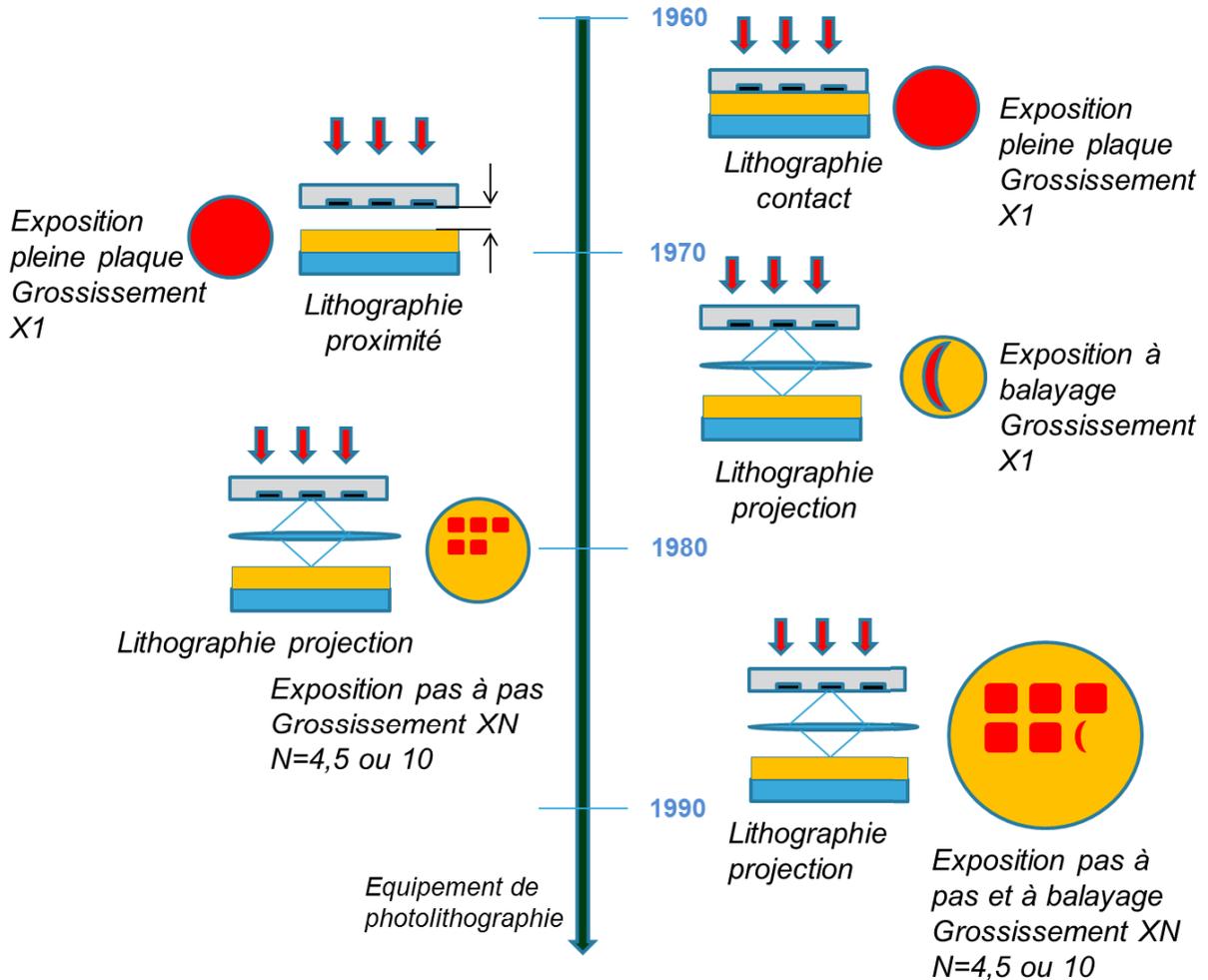


FIGURE 2.3 – Evolution de l'équipement de photolithographie

Au milieu des années 1970, la photolithographie par projection fait son apparition [59, p.15]. L'image du masque est alors projetée dans la résine photosensible à l'aide d'un dispositif optique. Cependant, la réalisation de lentilles de projection de qualité pour l'exposition d'une plaque entière est difficile. L'introduction de l'exposition à balayage permet de n'utiliser qu'une partie des lentilles et de s'affranchir d'une partie des défauts qu'elles présentent. Toutefois, la taille des plaques et surtout des puces augmente considérablement et le contrôle des dimensions du masque avec une projection sans réduction optique devient difficile [59, p.15]. Introduits fin des années 1970 et commercialisés début des années 1980, des équipements avec une optique de projection réductrice effectuent une exposition pas à pas sur la plaque [25, p.14] [59, p.15]. Mais au fur et à mesure de l'avancée des noeuds technologiques ces difficultés grandissent. C'est ainsi que fin des années 1980, un mode d'exposition hybride apparaît, utilisant à la fois l'optique de réduction, l'exposition pas à pas, et l'exposition à balayage [25, p.16].

Un autre aspect de l'équipement utilisé aujourd'hui, moins souvent abordé et pour-

tant représentant une véritable prouesse mécanique, est le système de positionnement de la plaque sur laquelle sont fabriqués les puces électroniques. Un paragraphe de l'ouvrage [25, p.9] lui est consacré. Les plaques circulaires de 200 mm ou 300 mm de diamètre sont maintenues sur un support grâce à un système de vide. Le système de positionnement, basé sur de l'interférométrie, se décale et s'aligne pour l'exposition pas à pas en moins d'une seconde avec une précision donnée.

2.1.2 Le système d'illumination

La première partie d'un équipement de photolithographie par projection est le système d'illumination. C'est lui qui va fournir l'énergie lumineuse nécessaire au transfert des motifs du réticule dans la résine photosensible. Ce système, composé d'une source lumineuse monochromatique et d'un condenseur optique, est caractérisé par la puissance optique de la source ainsi que sa longueur d'onde. Il doit permettre une illumination uniforme du réticule contenant les motifs à imprimer. Les autres paramètres de l'illumination sont le facteur de cohérence, la polarisation et la forme géométrique de la source, qui seront abordés dans la section de l'amélioration de la résolution.

La source lumineuse

La puissance de la source est un des paramètres clés de la vitesse d'exposition des plaques [59, p.6] [25, p.10], donc de la capacité de l'équipement. Le coût de cette étape du procédé de fabrication des puces est donc fortement lié à la puissance de la source. On peut trouver dans la littérature des références aux lampes à décharge de mercure haute pression [59, p.6] utilisée notamment pour la lithographie à 365 nm et 436 nm. Pour satisfaire des critères de puissance lumineuse et de monochromaticité de la source, le développement s'est naturellement tourné vers l'utilisation des lasers excimères (les lasers monomodes posant des problèmes d'interférences [59, p.6]). Le tableau ci-dessous tiré de la référence [30, p.136] donnent un aperçu des types de sources utilisées :

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

TABLE 2.1 – Type de sources lumineuses utilisées en photolithographie optique

La longueur d'onde 157 nm et la suivante à 126 nm [30, p.305] ne sont pas ou peu utilisées dans l'industrie car elles présentent des coûts d'utilisation trop élevés. Pour utiliser une source d'une longueur d'onde donnée en photolithographie, il est nécessaire non seulement d'avoir une source de puissance suffisante mais aussi l'optique de projection et une résine adaptées. Les lentilles doivent être réalisées avec des matériaux qui présentent une transmission suffisante à cette longueur d'onde et une résine absorbante. La prochaine longueur d'onde utilisable se trouve dans l'extrême ultra-violet à 13,5 nm. Cependant, il reste encore du travail en terme de rendement optique pour que cette technologie soit utilisable à l'échelle industrielle.

La méthode d'illumination de Köhler

Avoir une source lumineuse monochromatique capable de fournir de la puissance n'assure pas un transfert de qualité des motifs du réticule. En effet, d'autres problèmes subsistent encore. La source est composée d'un ensemble de points ne menant pas à un phénomène d'interférence (voir le paragraphe Cohérence et polarisation de la partie 2.3.3 Optimisation de la source). De ce fait, la variation d'intensité entre les différents points de la source va engendrer des fluctuations d'intensité au niveau de la résine photosensible [59, p.7]. Ensuite, si on suppose une illumination du réticule par une onde plane, les motifs éloignés de l'axe optique vont générer des ordres de diffraction non collectés par la pupille. Ainsi deux motifs identiques seront imagés différemment en fonction de leur position sur le réticule. La solution utilisée en photolithographie, nous la devons aux physiciens et industriels Ernst Abbe [1840-1905] et August Köhler [1866-1948]. Le premier, développeur pour la société Zeiss, est l'inventeur du condenseur, utilisé pour l'illumination des échantillons en microscopie. Le second est l'inventeur de la méthode qui porte son nom : la méthode d'illumination de Köhler, illustrée ci-dessous, qui consiste à former l'image de la source sur la pupille d'entrée de l'optique de projection et à placer le réticule à la pupille de sortie du condenseur [37, p.66].

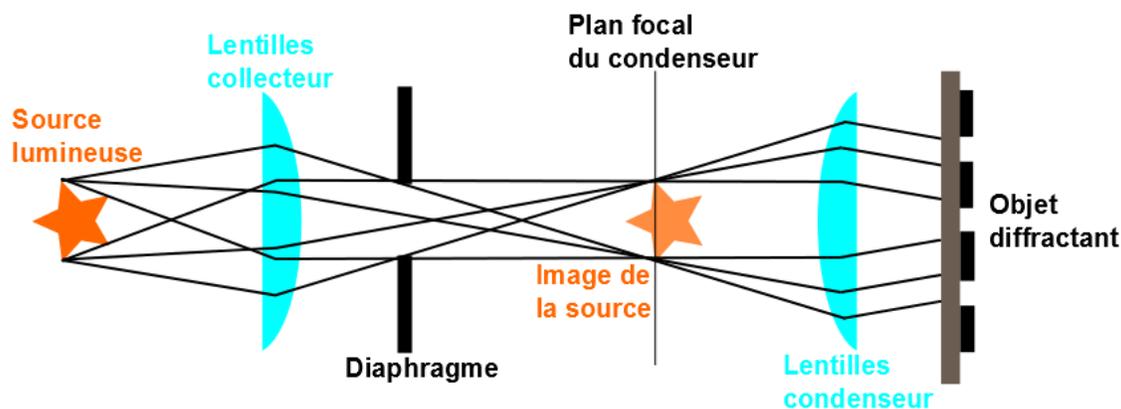


FIGURE 2.4 – Méthode d'illumination de type Köhler.

Ainsi, en plaçant la source optique dans le plan focal du condenseur comme sur la figure suivante, chaque point source illumine le réticule par un ensemble de faisceau parallèle [59, p.7] :

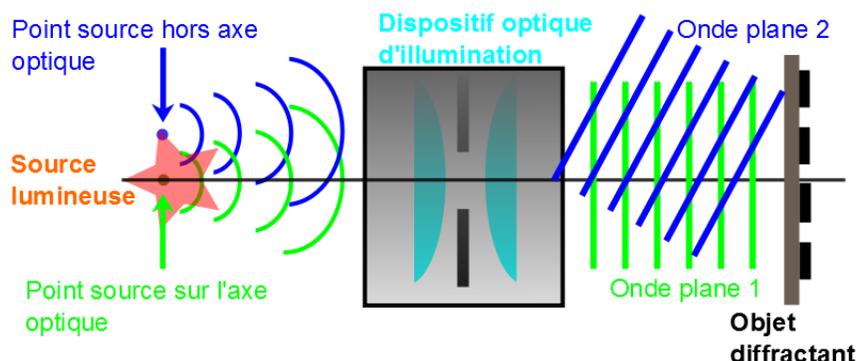


FIGURE 2.5 – Illustration de l'illumination du réticule par un ensemble d'ondes planes

Un point source génère donc une onde plane qui va illuminer le réticule sous incidence normale pour le point sur l'axe optique et sous incidence oblique pour les points s'éloignant de l'axe. Grâce à cette méthode, les défauts liés à la non uniformité de l'intensité des différents points sources sont moyennés sur l'ensemble du réticule [59, p.7].

2.1.3 Le réticule ou le masque

En sortie du condenseur se trouve le réticule, communément appelé masque même si à l'origine de la microélectronique ces termes font référence à des outils différents [30, p.230]. Grâce au condenseur, les motifs à imprimer dans la résine présents sur le réticule vont diffracter la lumière issue de la source. Ce réticule est un élément critique de la photolithographie car les erreurs de dimension des motifs et les défauts qui s'y trouvent vont être reproduits dans la résine et cela autant de fois que le réticule est utilisé sur la même plaque. Aujourd'hui, les réticules sont des éléments carrés d'environ 15 cm de côté pour quelques millimètres d'épaisseur. Leur fabrication est basée sur un procédé similaire à celui de la photolithographie. Les motifs sont réalisés dans une couche absorbante de quelques dizaines de nanomètres déposée sur un substrat en silice, matériau lui-même retenu pour ces propriétés thermiques et de transparence dans les ultra-violets. En effet, l'étape d'exposition lumineuse augmente la température du réticule, ce qui peut par expansion thermique créer des erreurs de dimension de plusieurs nanomètres dans la résine. Les réticules se déclinent sous plusieurs technologies, que nous aborderons dans la section liée à l'amélioration de la résolution, et aussi sous deux types de polarité. Si les motifs sont définis par la couche absorbante, on parle de polarité de champ clair. Si au contraire, les motifs sont gravés dans la couche absorbante, la polarité est dite de champ sombre.

2.1.4 L'optique de projection

Le premier rôle de l'optique de projection va être de collecter les ordres de diffraction et de les rediriger dans la résine photosensible où l'image du réticule sera reconstituée. L'optique de projection, constituée de plusieurs dizaines de lentilles, est caractérisée par deux paramètres que sont l'ouverture numérique et le grossissement du système. Le grossissement est généralement de l'ordre de 0,25, c'est à dire qu'on divise par quatre la dimension des motifs du réticule lors de l'impression dans la résine. Cette réduction effectuée par l'optique de projection permet de gagner en contrôle des dimensions et de placement des motifs [59, p.14]. Le second paramètre, l'ouverture numérique a été introduit par Ernst Abbe pendant ses travaux en microscopie chez Carl Zeiss, et est définie comme suit [21, p.215] :

$$ON = n_i \sin \theta_{max} \quad (2.1)$$

où ON est l'ouverture numérique, n_i est l'indice de réfraction optique du milieu en contact avec l'objectif et θ_{max} est l'angle maximal que peut faire un rayon lumineux avec l'axe optique passant par la lentille. La pupille d'entrée de l'optique de projection se comporte comme un filtre. Elle permet de collecter les ordres de diffraction qui présentent un angle d'incidence avec l'axe optique inférieur à l'angle maximal autorisé, celui là même qui définit l'ouverture numérique.

2.1.5 Le substrat

La dernière partie que nous allons étudier est la plaque de silicium qui va recevoir l'exposition. Cette partie est très importante dans le cadre de notre thèse car c'est ici que va se trouver toute la plus-value de notre travail. Les ordres de diffraction résultant de l'interaction entre l'illumination et le réticule ont été collectés par l'optique de projection. Ils sont maintenant reconduits dans la résine photosensible présente sur le substrat. L'image des motifs présents sur le réticule va être reconstituée par interférence des ordres diffractés.

La résine photosensible

La formation de l'image va se produire dans la couche de résine photosensible déposée sur la plaque avant l'exposition. La résine photosensible est un composé organique capable d'absorber l'énergie sous forme lumineuse pour activer une réaction chimique modifiant ses paramètres physico-chimiques, la rendant notamment soluble à un produit de développement aqueux [39, p.7]. Les résines sont caractérisées optiquement parlant (d'autres propriétés notamment mécaniques sont importantes) par leur absorption à la longueur d'onde de la source. Une résine peu absorbante donnera une sensibilité trop faible à l'exposition, tandis qu'une résine trop absorbante induira une différence d'exposition trop importante entre le haut et le bas de la résine [59, p.18]. Le procédé résine se décline comme le réticule sous deux polarités. On distingue le procédé résine positif où la partie exposée sera retirée au développement et le procédé résine négatif où la partie exposée restera sur la plaque comme le montre la figure suivante.

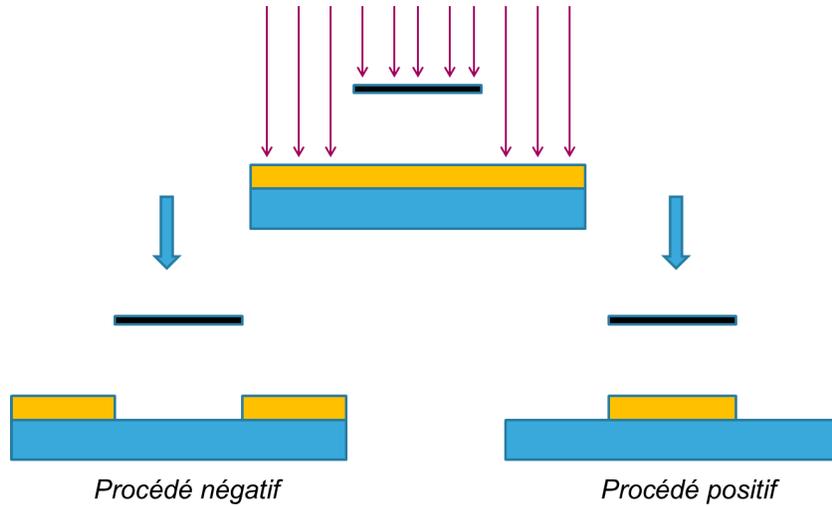


FIGURE 2.6 – La polarité de la résine

L'empilement des couches minces

Comme nous l'avons abordé lors de l'introduction à la photolithographie, cette étape de procédé sera reproduite de nombreuses fois lors de la fabrication des circuits intégrés. De ce fait, lors d'une exposition à un niveau donné, d'autres expositions ont pu avoir lieu et donc plusieurs couches minces peuvent déjà avoir été déposées/gravées sur le substrat de silicium de départ. C'est le cas par exemple pour l'étape à laquelle vont principalement se passer ces travaux : l'étape d'implantation des sources et drains des transistors, qui va nous servir d'exemple.

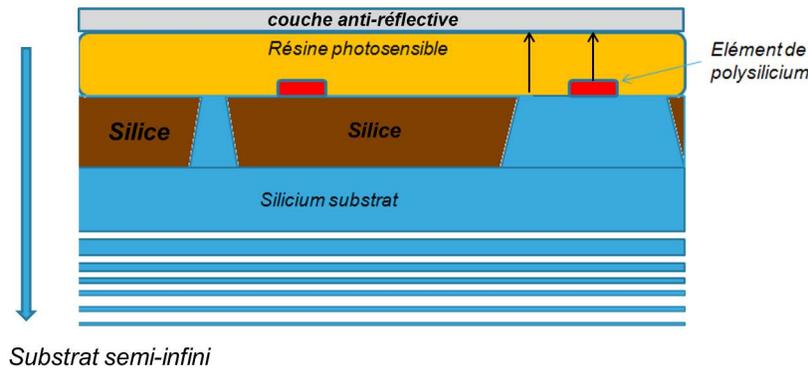


FIGURE 2.7 – Description de l'empilement des couches minces à l'étape de photolithographie de l'implantation des sources et drain en technologie 28 nm.

A cette étape du procédé, illustrée par la figure 2.7, la résine photosensible est déposée sur un substrat qui possède déjà trois niveaux, le substrat silicium, un niveau comportant à la fois de la silice et du silicium, puis un niveau possédant quelques éléments de polysilicium. La résine photosensible est déposée au sommet de cette empilement, ce qui pose des problèmes de planéité de la résine et d'inhomogénéité de son épaisseur. On comprend alors que les différentes couches réalisées peuvent également apporter des variations dans la planéité de la surface de la résine.

Les couches anti-reflet

D'autres couches spécifiques accompagnent généralement la résine photosensible pendant l'étape de photolithographie optique. Il s'agit des couches anti-reflet, qui peuvent être déposées au-dessus, comme pour le schéma de l'empilement précédent, ou en dessous de la résine. Lorsque l'image du réticule est transférée sur la plaque de silicium, les interfaces entre les différents matériaux constitutifs de l'empilement génèrent des réflexions optiques. Ces réflexions sont responsables de surexposition à certains endroits de la résine mais également de l'apparition d'interférences et d'ondes stationnaires dans la résine. Les éléments d'un matériau donné, comme le polysilicium, peuvent également diffracter la lumière dans les niveaux inférieurs à la résine. Ces phénomènes rendent difficile le contrôle de la dimension des motifs imprimés. Les couches anti-reflet permettent de limiter ce phénomène.

Premier décor de notre thèse

Et c'est ainsi que le premier décor de cette thèse vient de s'implanter à travers les explications ci-dessus. Si les couches anti-reflet sont un outil capable de limiter les phénomènes optiques issus des couches minces sous la résine photosensible, il est à noter que la description de l'empilement utilisée comme exemple ci-dessus, ne contient pas de couche anti-reflet sous la résine. En effet, l'utilisation de couches anti-reflet n'est pas toujours possible car cela peut engendrer des difficultés techniques, des coûts et des temps de procédés trop importants pour être considérée comme rentable. La caractérisation et la modélisation des effets d'empilement des couches sous la résine sont le cœur de cette thèse.

2.2 Les paramètres du procédé lithographique

Maintenant que nous avons une vue globale de la constitution et du fonctionnement de l'équipement, il nous est nécessaire de nous intéresser aux paramètres du procédé lithographique. L'objectif de la photolithographie est certes de délimiter les zones de traitement futur mais, pour ce faire, une maîtrise des dimensions des motifs imprimés dans la résine est très importante. [37, p.326] explique que malgré le nombre très important de sources d'erreurs pendant l'étape du procédé lithographique (propriété résine, temps de recuit, vibrations mécaniques,...), elles se traduisent toutes par une erreur de dose ou de focus, les deux paramètres clés de la photolithographie optique. Il faut donc à la fois déterminer avec précision la dose et le focus d'exposition, mais aussi prendre en compte les erreurs engendrées par leurs variations respectives pendant l'exposition lumineuse. Ces variations, lorsqu'elles conduisent à des dimensions hors spécifications, peuvent dégrader la qualité et la fiabilité des composants voire même remettre en question leur fonctionnalité. De ce fait, les variations acceptables des paramètres de procédé vont nous permettre de définir une latitude d'exposition et une profondeur de champ dans lesquelles nous devons nous trouver durant l'exposition. La fenêtre de procédé et la profondeur de champ, qui diminuent au fur et à mesure de l'avancée des noeuds technologiques, peuvent et doivent être caractérisées expérimentalement pour chaque étape de lithographie d'un produit.

2.2.1 Dose et latitude d'exposition

On trouve plusieurs types de définition de la dose d'exposition dans la littérature. Par exemple, on trouve dans [51, p.64] la définition :

$$Dose = \frac{Energie\ incidente\ [mJ]}{Surface\ exposée\ [cm^2]} \tag{2.2}$$

On trouve dans [37, p.198] la définition :

$$Dose = \int_0^t I(t) dt \tag{2.3}$$

En photolithographie, on exprime souvent la dose comme une quantité homogène à une énergie par abus de langage. La dose est une quantité d'énergie absorbée par la résine. Il s'agit donc d'une quantité d'énergie par unité de volume. Lors de l'exposition lumineuse, la source fournit une puissance optique par unité de surface et la vitesse du balayage permet de moduler le temps d'exposition [37, p.107]. Le produit de la puissance de la source en W/cm^2 par le temps d'exposition en seconde permet de remonter à la définition donnée par [51, p.64] vue depuis l'illumination. Cependant, nous ne disposons dans nos travaux que de valeurs données en mJ. Il serait peut-être plus convenable de parler d'énergie d'exposition mais il faudrait tout de même ramener ce paramètre à l'unité de volume de résine considéré. Nous nous proposons donc de conserver cette notation de la dose en mJ. Ce qui est important, c'est la détermination de la dose d'exposition. Les dimensions des motifs imprimés dans la résine photosensible suivent une loi linéaire en fonction de la dose au meilleur focus. Ainsi il suffit de retrouver expérimentalement cette loi pour une structure donnée et de déterminer la dose d'exposition à laquelle la dimension du motif considéré correspond à celle attendue par le lithographe. Le graphique suivant donne quelques exemples de dimension de motif en fonction de la dose d'exposition :

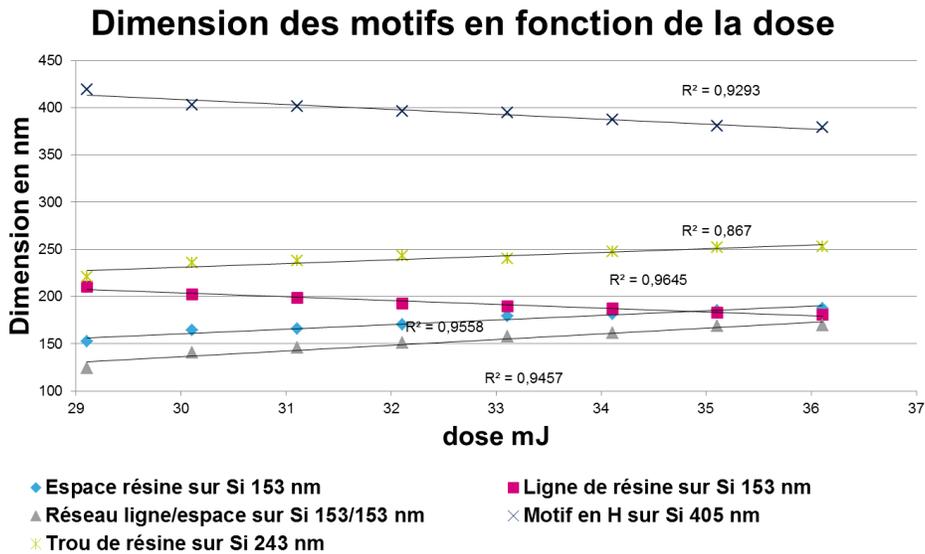


FIGURE 2.8 – Variation de la dimension des motifs en fonction de la dose.

Ainsi, la dose d'exposition peut être fixée à partir d'une structure de référence dont on connaît la dimension optimale, ou bien à partir d'un groupe de structures pour limiter l'erreur entre les dimensions idéales et celles réellement obtenues. Il est à noter que pour obtenir des valeurs expérimentales de dimensions dans la résine, il est nécessaire de passer par une méthode d'imagerie. Généralement c'est le microscope électronique à balayage qui est utilisé pour ce type de mesures. Cependant, l'algorithme de traitement des images et d'extraction des dimensions des motifs n'est pas unique et génère donc une incertitude importante sur la dimension finale. Ces difficultés seront présentées dans le chapitre 4. Comme nous l'avons indiqué précédemment, il existe une variabilité du paramètre de dose pendant l'exposition. La latitude d'exposition est définie comme étant l'intervalle de variabilité de la dose acceptable, c'est à dire telle que les dimensions des motifs obtenus restent à l'intérieur des spécifications fixées. Cependant, la sensibilité des motifs à la dose est dépendante de la valeur du focus.

2.2.2 Focus d'exposition et profondeur de champ

La notion de focus en photolithographie est moins triviale. [51, p.68] définit le focus dans la résine comme étant la position sur l'axe optique pour laquelle l'image du réticule possède un contraste maximal. Par conséquent, l'image se dégrade quand on s'éloigne de part et d'autre de ce point de fonctionnement optimal. Les dimensions des motifs ne réagissent pas linéairement au focus. Les courbes figure 2.9 montrent l'évolution de la dimension de certains motifs en fonction du focus.

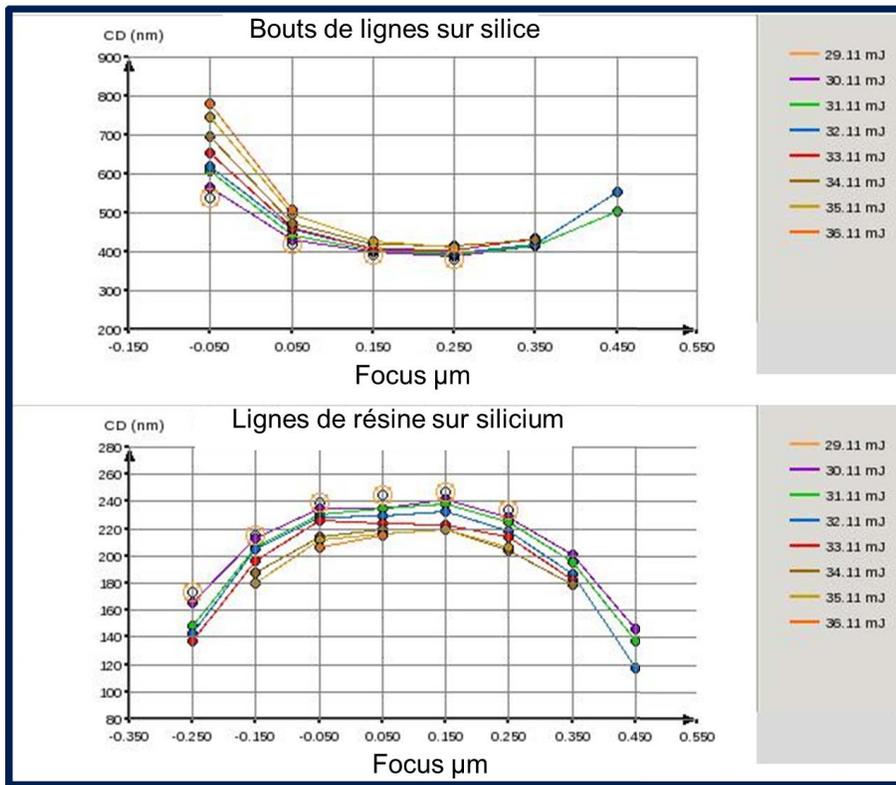


FIGURE 2.9 – Courbes de Bossung : variation de la dimension de motifs en fonction de la dose et du focus d'exposition.

En observant ces courbes, on s'aperçoit que chaque courbe passe par un extremum local. C'est à ce point de fonctionnement que les motifs sont les moins sensibles aux variations de focus. On peut donc définir ce point comme étant la position du meilleur focus dans la résine. L'intervalle de variabilité acceptable du focus, c'est à dire l'intervalle sur lequel les dimensions obtenues restent dans les spécifications du lithographe, s'appelle la profondeur de champ. Cependant, la sensibilité des dimensions au focus dépend de la dose d'exposition.

2.2.3 Matrice d'exposition dose/focus et courbes de Bossung

La sensibilité des dimensions au focus dépend de la dose. La sensibilité des dimensions à la dose dépend du focus. Pour caractériser complètement le comportement de la résine à la dose et au focus pour un motif donné, il faut faire varier ces deux paramètres à la fois. C'est tout l'intérêt des matrices d'expositions dose/focus. Le principe est d'observer les variations des dimensions des motifs sur une plaque qu'on a exposé à plusieurs doses et focus différents. Le traitement de ces données se fait généralement à travers le tracé des courbes de Bossung. Ces courbes, outil indispensable du lithographe, correspondent à la variation de la dimension du motif en fonction du focus pour plusieurs doses. La figure 2.9 est un exemple de courbes de Bossung.

2.2.4 La fenêtre de procédé

La fenêtre de procédé est un moyen différent d'exprimer les notions de latitude d'exposition et de profondeur de champ [37, p.332]. Les courbes de Bossung nous donnent toutes les informations nécessaires en terme de sensibilité des motifs en fonction des deux paramètres clés de la photolithographie. L'idée de la fenêtre de procédé est de réunir ces informations dans un nouveau type de graphique. La fenêtre de procédé est le tracé de la limite de spécification d'un motif dans le plan dose/focus :

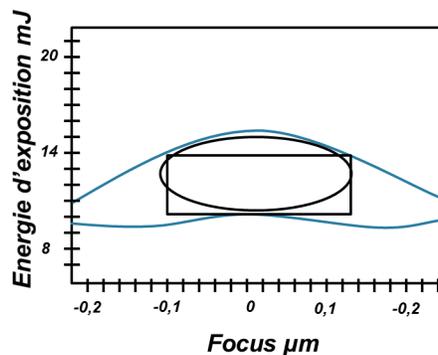


FIGURE 2.10 – Représentation graphique de la fenêtre de procédé.

On obtient ainsi une surface fermée de forme rectangulaire ou elliptique, à l'intérieur de laquelle la dimension obtenue est en accord avec les spécifications fixées et donc où le couple dose/focus sera considéré comme acceptable.

Ainsi, le procédé de photolithographie est principalement géré par deux paramètres principaux, la dose et le focus, intimement liés de par leurs actions sur les motifs imprimés dans la résine. Pour contrôler avec précision les dimensions de ces motifs, une

caractérisation de la sensibilité du procédé au couple dose/focus est essentielle. A partir des mesures expérimentales sur une matrice d'exposition dose/focus, le lithographe pourra établir les courbes de Bossung puis définir la latitude d'exposition, la profondeur de champ et la fenêtre de procédé. Mais malgré ces outils performants, la résolution de la photolithographie optique est limitée. D'autres techniques permettent d'améliorer cette résolution.

2.3 La résolution et techniques d'amélioration associées

2.3.1 La résolution

Lorsque l'on aborde la question de la résolution en photolithographie, la plupart des références se tournent vers les définitions de la résolution et de la profondeur de champ de Rayleigh [37, p.105] [25, p.32] :

$$\text{Résolution} = k_1 \frac{\lambda}{ON} \quad (2.4)$$

$$\text{Profondeur de champ} = k_2 \frac{\lambda}{ON^2} \quad (2.5)$$

où k_1 et k_2 sont des facteurs de proportionnalité représentatifs d'un procédé donné, λ est la longueur d'onde de la source utilisée et ON est l'ouverture numérique du système optique.

Dans ce cas, l'existence d'une résolution limite d'un système de photolithographie est issue des lois fondamentales de la diffraction. La résolution est alors limitée parce que le nombre d'ordres de diffraction qui seront collectés par les lentilles est fini. Les solutions pour l'améliorer sont donc de diminuer la longueur d'onde ou d'augmenter l'ouverture numérique du système pour récolter davantage d'ordres de diffraction. Cependant, le critère de Rayleigh ne permet pas vraiment de prédire l'évolution de la résolution en microélectronique [30, p.15] [30, p.301]. En effet, il existe d'autres limites à la résolution, qui ne sont pas d'origine optique, comme la réponse de la résine [37, p.21], la planéité du substrat, les capacités de contrôle des paramètres du procédé lithographique ou encore la qualité des lentilles [37, p.413] [30, p.301]. Ces autres facteurs de limitation de la résolution et de la profondeur de champ sont généralement pris en compte dans les facteurs k_1 et k_2 . Une vision très intéressante et plus complète de la définition de la résolution est celle de Chris Mack [37] qui lui dédie tout un chapitre. Il explique que si effectivement la littérature fait souvent référence à la résolution comme une notion liée à la limite de la diffraction définie par Rayleigh, ce n'est pas cette définition que l'on retiendra en pratique dans le monde industriel. [37, p.413] distingue la définition de la résolution du chercheur, qui est celle de la dimension du plus petit motif imprimé sur une série d'expériences, et celle de l'ingénieur production en microélectronique qui est celle de la plus petite dimension imprimable dans la résine permettant l'obtention d'un rendement minimum pour un produit et une technologie donnés. Ainsi, il inclut dans sa définition de la résolution et de la profondeur de champ les notions de contrôle du procédé et de limites de spécifications des dimensions obtenues sur plaque. Nous

retiendrons des informations explicitées par [37, p.412], les éléments essentiels suivants :

- la résolution dépend du type de motif considéré ;
- il existe au moins deux types de résolutions, chacune limitée par des paramètres physiques différents de la lithographie, et chacune influençant des caractéristiques différentes des circuits ;
- la première résolution, se rapprochant de la définition de Rayleigh, est le plus petit pas d'un réseau de motifs imprimable. Cette résolution limite la proximité des transistors sur une même puce et affecte directement le coût de la puce ;
- la seconde, limitée par les erreurs du procédé, est la plus petite dimension imprimable d'un motif. Elle est liée à la qualité individuelle des transistors et donc influe sur la vitesse et la consommation du circuit.

Finalement, [37, p.413] donne les définitions de la profondeur de champ et de la résolution suivantes :

La **profondeur de champ** est *"l'intervalle de focus pour lequel le profil de la résine pour une structure donnée reste dans toutes les spécifications"*.

La **résolution** est *"la plus petite dimension d'un type de motif donné qui peut être imprimé avec une profondeur de champ donnée"*.

Ainsi, on comprend qu'au delà de la diminution de la longueur d'onde de la source et de l'augmentation de l'ouverture numérique, le monde de la microélectronique va également essayer de diminuer la résolution en travaillant sur les facteurs k_1 et k_2 , c'est à dire sur tous les éléments du procédé de photolithographie. Ces avancées en matière de résolution s'effectuent sur d'autres modes d'utilisation de l'équipement, l'optimisation de la source optique, la création de nouveaux types de réticules, l'amélioration du comportement de la résine photosensible et sur des techniques dites de correction des effets de proximité optique. Toutes ces pistes énoncées composent ce qu'on appelle "les techniques d'amélioration de la résolution".

2.3.2 Amélioration de l'utilisation du système d'exposition

La première piste dans l'amélioration de la résolution se trouve sur l'équipement lui-même.

Réduction de la longueur d'onde de la source

Nous avons montré, notamment à travers la définition donnée par Rayleigh, que la résolution dépend de la longueur d'onde au premier ordre. Ainsi, au fur et à mesure de la miniaturisation des transistors, de nouvelles sources ont vu le jour, permettant ainsi d'aborder de nouveaux nœuds technologiques. Voici un résumé de l'évolution des sources donné par [30, p.19] :

Longueur d'onde	Ouverture numérique	Résolution de Rayleigh	Année de première utilisation	Source lumineuse
436 nm	0.30	0.89 μm	1982	lampe Hg
365 nm	0.45	0.49 μm	1990	lampe Hg
365 nm	0.60	0.37 μm	1994	lampe Hg
248 nm	0.50	0.30 μm	1994	lampe Hg ou laser KrF excimer
248 nm	0.60	0.25 μm	1997	laser KrF
248 nm	0.70	0.22 μm	1999	laser KrF
193 nm	0.60	0.20 μm	1999	laser ArF
193 nm	0.75	0.16 μm	2001	laser ArF

TABLE 2.2 – Evolution des caractéristiques des sources optiques pour la photolithographie

Aujourd'hui, nous travaillons principalement avec les sources 193 nm et 248 nm. Ce que nous montre le tableau, c'est que l'amélioration de la résolution se fait également à travers l'augmentation de l'ouverture numérique. Par exemple, la photolithographie à immersion est un moyen d'augmenter fortement l'ouverture numérique du système optique.

Lithographie à immersion

L'ouverture numérique, contrairement à la longueur d'onde de la source, est limitée. D'après la définition donnée dans le paragraphe sur l'optique de projection, l'ouverture numérique est le produit de l'indice optique du milieu de la lentille de sortie multiplié par le sinus de l'angle maximal que peut faire un rayon avec l'axe optique en passant par le système. Une solution déjà utilisée en microscopie pour l'augmentation de l'ouverture numérique est de placer la lentille de sortie dans un milieu qui possède un indice optique supérieur à celui de l'air, notamment l'eau à 1,33. Cette technique s'appelle la

photolithographie à immersion et permet d'améliorer la résolution optique finale du système.

Décomposition en impression multiple

Une des techniques utilisées pour imprimer des motifs avec une résolution de pas inférieur à la limite fixée par l'optique est l'impression multiple. Le circuit initial qui devrait être présent sur le réticule pour l'exposition lumineuse est divisé en deux impressions en utilisant deux réticules différents. Le principe de la double impression est exposé dans les travaux de [62, p.45]. Cette technique permet de relâcher les contraintes de procédé sur chacun des deux réticules mais soulève des difficultés liées à la décomposition des circuits et à l'alignement des impressions successives. Les difficultés rencontrées en terme de résolution rendent l'utilisation de cette technique rentable par amélioration du rendement [59, p.71].

2.3.3 Optimisation de la source

La réduction de la longueur d'onde mise à part, pour une source fixée, il existe des moyens d'améliorer la résolution. Les techniques que nous allons aborder sont la manipulation de la cohérence et la polarisation de la source, l'utilisation d'une illumination hors-axe et l'optimisation de la source concurrentiellement avec les motifs du réticule.

Cohérence et polarisation

Pour une source donnée, deux paramètres permettent encore d'améliorer la résolution des motifs présents sur le réticule. Il s'agit de la cohérence et de la polarisation de cette source. En optique, lorsque l'on aborde la question de la cohérence d'une source lumineuse, il faut distinguer deux types de cohérence : la cohérence temporelle et la cohérence spatiale [21, p.560]. Dans le cadre industriel de la photolithographie, la cohérence temporelle n'est quasiment jamais considérée. De ce fait, la littérature fait essentiellement référence à la notion de *cohérence* pour parler de la cohérence spatiale [37, p.56]. La notion de cohérence spatiale traduit la corrélation entre la phase des points d'une onde lumineuse en deux endroits différents de l'espace. Elle correspond à la capacité de l'onde à donner naissance à des interférences. Dans le cadre de l'illumination de Köhler, nous avons vu que chaque point source permet d'illuminer le réticule avec une onde plane d'un angle d'incidence donné, correspondant à la distance entre le point source et l'axe optique. Ainsi, nous pouvons donner les définitions suivantes :

- l'illumination *cohérente* correspond à l'illumination du réticule par une source ponctuelle. On suppose alors que le réticule est illuminé par une onde lumineuse issue d'une seule direction [37, p.56] ;
- l'illumination *incohérente* correspond à l'illumination du réticule par une source étendue telle que tous les angles compris entre -90 degrés et 90 degrés sont permis [37, p.59] ;
- l'illumination *partiellement cohérente* correspond à l'illumination du réticule sous un intervalle d'angles d'incidence fixé [37, p.58].

Une expression possible de la cohérence d'une source lumineuse est alors donnée par :

$$\sigma = \frac{n_i \sin \theta_{max}}{ON} \quad (2.6)$$

où σ est le facteur de cohérence, n_i l'indice optique du milieu entre la source et le réticule et θ_{max} le demi angle du cône d'illumination donné par la source. Le facteur de cohérence partiel peut aussi s'exprimer de l'autre côté de l'optique de projection et est égale au facteur précédemment défini, multiplié par le grossissement du système de projection [62, p.24]. C'est généralement celui-ci qui est utilisé en microélectronique et que nous utiliserons donc par la suite. Nous avons dans ces conditions :

- $\sigma = 0$ *illumination cohérente* ;
- $0 < \sigma < 1$ *illumination partiellement cohérente* ;
- $\sigma = 1$ *illumination incohérente*.

L'utilisation d'une source partiellement cohérente permet un gain en résolution et en profondeur de champ. Elle permet d'utiliser des points sources écartés de l'axe optique et donc d'illuminer le réticule sous incidence oblique. Cela permet de décaler les ordres de diffraction et de capter des ordres qu'on ne pourrait pas avoir avec un unique point source placé sur l'axe optique [30, p.259].

La seconde possibilité est d'utiliser une source polarisée [21, p.325]. [39, p.13] montre que l'utilisation d'une onde polarisée peut améliorer la résolution de la photolithographie par amélioration du contraste de l'image obtenue dans la résine.

Illumination hors-axe et géométrie de la source

Lors de la diffraction de la lumière issue de la source par les motifs du réticule, les basses fréquences spatiales correspondent aux ordres de diffraction les plus faibles, passant le plus près de l'axe optique dans la pupille d'entrée de l'optique de projection [25, p.87]. Ainsi, l'ordre 0 contient les plus basses fréquences et notamment la composante continue de l'intensité qui ne participe pas à la formation de l'image. L'utilisation d'une illumination hors axe consiste à éliminer la partie de l'illumination sur l'axe permettant de supprimer la composante continue et ainsi d'améliorer le contraste de l'image obtenue dans la résine et la profondeur de champ [30, p.259]. On peut donc constater que la modification de la surface de la source peut entraîner des modifications dans la résolution du procédé lithographique. Ainsi, de nombreux types de sources sont disponibles permettant d'optimiser l'exposition lumineuse en fonction des motifs à imprimer dans la résine. Les images ci-dessous donnent des exemples de sources typiques utilisées :

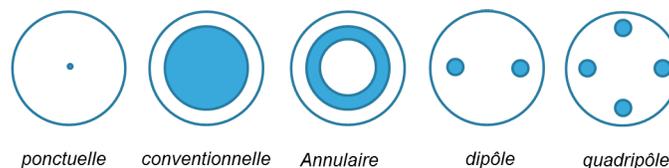


FIGURE 2.11 – Différentes géométries de source optique.

Les sources de type dipôle permettent d'utiliser l'incidence oblique qui crée un décalage dans la figure de diffraction obtenue [37, p.57]. On sait que l'incidence oblique permet notamment de récupérer les ordres 0 et 1 ou 0 et -1 pour des motifs où seul

l'ordre 0 est passant pour une illumination sur l'axe [30, p.259]. Cependant, l'utilisation d'une illumination issue d'une direction angulaire peut provoquer des problèmes d'imagerie sur certains motifs [37, p.429]. La solution pour s'affranchir de ces difficultés est d'utiliser une source symétrique, donc un dipole. L'utilisation d'une illumination de type dipôle suivant les deux axes mènent à la source de type quadripole [37, p.430] introduite en 1992 par des chercheurs de Canon et Nikon [25, p.87]. Finalement, nous nous dirigeons vers des sources dites *pixellisée*, c'est à dire totalement optimisée point par point pour l'obtention de certains motifs dans la résine. La source la plus utilisée est celle de forme annulaire.

La co-optimisation source réticule et la co-optimisation source réticule cible

Malgré toutes ces possibilités et celles qui seront exposées juste après, il est presque impossible d'obtenir certains motifs sans modifier de manière trop importante les motifs environnants. Une solution consiste à ne plus considérer le motif présent sur le réticule comme le modèle de celui que l'on souhaite obtenir sur plaque mais simplement comme un motif diffractant. Ainsi, en optimisant concurrentiellement le motif diffractant du réticule et la source, on peut réussir à imprimer des motifs difficiles à obtenir autrement [59, p.176]. Une nouvelle méthode intitulée la co-optimisation source-masque-cible a vu le jour dans les travaux de thèse de [4, p.19]. Cette méthode consiste à appliquer une rétroaction sur le redimensionnement des motifs du réticule après avoir optimisé la forme de la source optique.

2.3.4 Différentes technologies de réticule

L'avancée dans l'amélioration de la résolution s'est également faite à travers l'évolution des réticules. Le réticule de base, toujours utilisé, est celui que l'on appelle réticule binaire. Il est constitué d'un substrat en verre de silice sur lequel on dépose un matériau absorbant pour définir les motifs. Ce type de réticule possède une transmission maximale en l'absence de matériau absorbant et est censé fournir une transmission nulle là où le matériau absorbant est présent. Cependant, d'autres types de réticules sont utilisés pour améliorer le contraste de l'image aérienne tels que le réticule à décalage de phase alterné ou à décalage de phase atténué.

2.3.5 Les avancées dans la résine photosensible

Enfin, de nouvelles résines photosensibles sont également venues apporter leurs contributions dans le gain en résolution obtenu au fur et à mesure de l'apparition des nouveaux nœuds technologiques. Nous ne nous attarderons pas sur la chimie de ces résines, le lecteur pourra trouver toutes ces informations dans [25, p.504]. Durant les premiers pas de la photolithographie, notamment avec la lithographie contact, la résine négative historiquement utilisée présentait une résolution faible due notamment au gonflement de la résine durant l'exposition et à son manque d'absorption aux sources 436 nm [25, p.504]. Finalement, cette résine a été remplacée par une résine positive présentant de meilleures propriétés pour les longueurs d'onde qui ont précédé le 248 nm.

C'est l'apparition de la résine à amplification chimique [59, p.6] qui a permis d'obtenir une bonne résolution avec la lithographie à 248 nm.

2.3.6 La correction des effets de proximité optique

Nous abordons la dernière partie de l'amélioration de la résolution. Jusqu'à présent, nous n'avons vu ce gain en résolution qu'à travers l'évolution des différents éléments du procédé lithographique. Nous avons vu comment améliorer l'utilisation de l'équipement, qu'il était possible d'adapter une partie de l'illumination, d'utiliser des réticules à décalage de phase et que la résine avait également évolué. Il existe encore différentes techniques comme la correction des aberrations du front d'onde par exemple. La dernière technique que nous allons aborder, ou plutôt l'ensemble des techniques, est la *correction des effets de proximité optique*. Nous entrons dans une philosophie totalement différente des techniques présentées précédemment. Il ne s'agit pas ici de faire évoluer un des acteurs du procédé lithographique. L'idée est d'être capable d'anticiper les infidélités des motifs dans la résine par rapport au réticule, soit grâce à la caractérisation, soit grâce à la modélisation, et d'apporter les modifications nécessaires aux motifs présents sur le réticule avant sa fabrication. Ces techniques et les phénomènes corrigés feront l'objet du chapitre suivant.

2.4 Conclusion

Le procédé de photolithographie est l'étape centrale de la fabrication des composants en microélectronique. Elle permet de préparer les plaques de silicium à un futur traitement dépôt/gravure/implantation de certaines régions spécifiques de la plaque. Les équipements de photolithographie, pouvant coûter jusqu'à une centaine de millions d'euros, sont une combinaison de modules de très haute technologie. Ces équipements sont composés de sources lumineuses avec des longueurs d'onde de plus en plus petites, une optique de projection très complexe et un contrôle du déplacement et de l'alignement des plaques très précis. Néanmoins, les paramètres du procédé que sont la dose et le focus d'exposition ont des variabilités durant l'exposition lumineuse qui peuvent rendre délicat le contrôle de la forme et des dimensions des motifs dans la résine après développement. C'est la raison pour laquelle, la caractérisation de la fenêtre de procédé, c'est à dire de la latitude d'exposition et de la profondeur de champ est nécessaire. Mais la maîtrise de la fenêtre de procédé n'est pas le seul moyen utilisé pour améliorer la résolution du système de photolithographie optique. L'optimisation de la forme de la source optique, la gestion de la cohérence et de la polarisation de cette source, l'utilisation de réticule et résine améliorant le contraste de l'image sont autant de moyens permettant l'obtention de motifs de qualités, de plusieurs types et de dimensions diverses sur la plaque. Un ensemble de techniques, dites de *correction des effets de proximité* a également vu le jour dans le cadre de l'amélioration de la résolution. Ces techniques ne sont pas basées sur l'amélioration d'un des modules de l'équipement. Il s'agit plutôt de caractériser et de modéliser les phénomènes responsables des écarts entre les motifs attendus et ceux réellement obtenus, et de les anticiper en redimensionnant les motifs du réticule. Nos travaux de thèse s'intègrent dans ces techniques qui seront donc traitées dans le chapitre suivant.

Chapitre 3

Correction des effets de proximité optique

Parmis les techniques d'amélioration de la résolution citées dans le paragraphe précédent, la technique dite de "correction des effets de proximité optique" nous intéresse particulièrement. En effet, c'est dans le cadre de cette technique que nous allons chercher à prendre en compte l'impact de l'empilement des couches minces sous la résine photosensible. Malgré le nom donné à cette technique, elle ne consiste pas seulement à traiter les phénomènes de proximité optique mais les distorsions optiques au sens large, voire même à prendre en compte tout phénomène issu du procédé qui pourrait générer un écart entre le motif imprimé et celui idéalement attendu. La complexité et la qualité de la modélisation et de la correction de ces phénomènes augmentent d'année en année. Les premières corrections étaient basées sur des modèles purement empiriques sous forme de tables de données [dimension masque dessinée/dimension plaque obtenue] et appliquées à partir de règles géométriques simples. Les corrections des technologies avancées mettent en œuvre des modèles comportant des modules rigoureux (mais pas uniquement), souvent basés sur la théorie optique d'Hopkins, et des algorithmes de correction beaucoup plus complexes. La première partie de ce chapitre s'attache à la présentation des phénomènes pris en compte par les techniques de correction de proximité optique qui seront, elles, présentées dans la seconde partie. En troisième partie, nous proposons quelques notions de bases sur la modélisation du procédé de photolithographie avant de conclure.

3.1 Origines et impacts

Les origines des difficultés rencontrées dans le contrôle de la forme et de la dimension des motifs en photolithographie peuvent être catégorisées en trois parties. La première source de problèmes est issue des lois optiques fondamentales de la formation de l'image aérienne dans la résine, notamment des phénomènes de diffraction [59, p.91]. La seconde catégorie correspond aux phénomènes physico-chimiques qui se produisent dans la résine à la formation de l'image. La dernière enfin n'est pas imputable directement à la technique de photolithographie mais plutôt au traitement de la plaque qui va suivre. La dimension finale d'un motif, après une étape de gravure par exemple, peut-être décalée par rapport à la dimension de la résine après exposition. Ces décalages peuvent être également anticipés et pré-correctés dans les techniques dites de "correction des effets de proximité optique". Certaines variabilités du procédé de photolithographie (dose, focus, aberration des lentilles,...) peuvent également apporter leurs contributions à ces difficultés. Pour nous situer dans ce contexte, les effets d'empilement des couches minces que nous traitons dans ces travaux se placent plutôt dans la première catégorie. Nous nous intéressons à l'impact des phénomènes optiques de type diffraction, interférences ou d'ondes stationnaires, qui apparaissent dus à la présence d'un empilement de couches minces sous la résine photosensible.

3.1.1 L'effet de densité ou de proximité

L'effet de proximité ou de densité est la variation des dimensions d'un motif en fonction de la présence d'autres motifs dans son environnement. C'est à dire que deux motifs présentant les mêmes dimensions sur le masque s'imprimeront différemment dans la résine. Pour illustrer nos propos, intéressons nous à la ligne centrale d'un réseau de lignes. Lorsque l'espacement de la ligne tend vers l'infini, ou plus simplement lorsque les différentes lignes n'ont plus d'influence les unes sur les autres, la ligne est dite isolée. Lorsqu'au contraire l'impression de ces lignes dépend de leur espacement, la structure est dite dense. Le graphique 3.1 page suivante permet de comparer les images dans la résine simulées d'un réseau de lignes en fonction de la densité du réseau. La ligne de résine est dessinée à chaque fois avec une dimension de 600 nm au niveau du réticule (150 nm niveau de la résine), mais avec des périodes différentes. On distingue bien un écart important entre ces images. Si on cherche un seuil pour obtenir une dimension d'environ 300 nm pour la ligne isolée, on obtient les dimensions de respectivement 303 nm, 276 nm et 296 nm pour les trois images proposées. La différence entre la diffraction par des réseaux denses et par des structures isolées tend à diminuer lorsque les dimensions des motifs augmentent. Cependant, plus la taille des motifs diminue, plus l'effet est important. Ce phénomène peut avoir des répercussions très importantes sur la qualité des circuits réalisés. La référence [25, p.34] mentionne le fait que la vitesse maximum de fonctionnement d'un circuit logique est fortement influencée par l'uniformité de la dimension des grilles des transistors sur la surface globale du circuit.

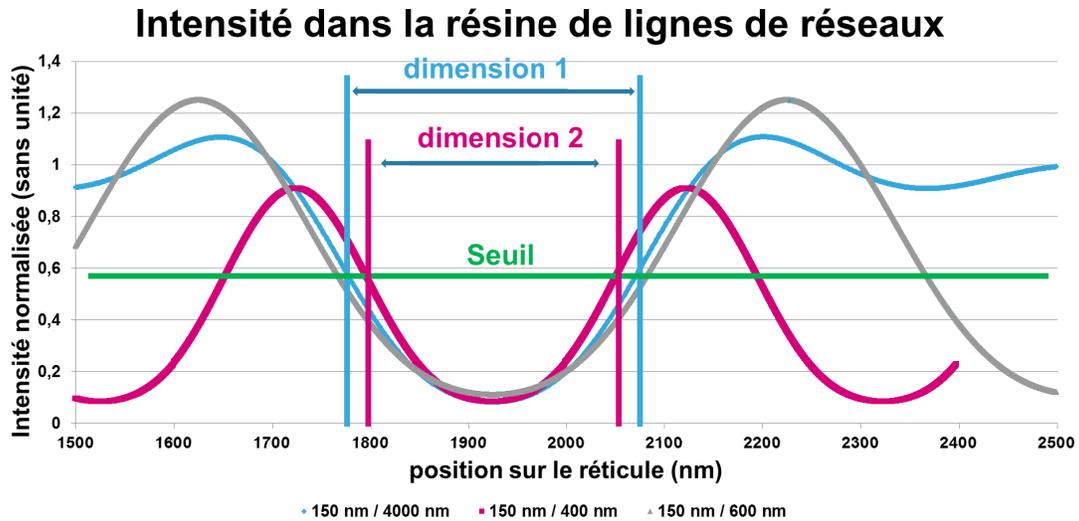
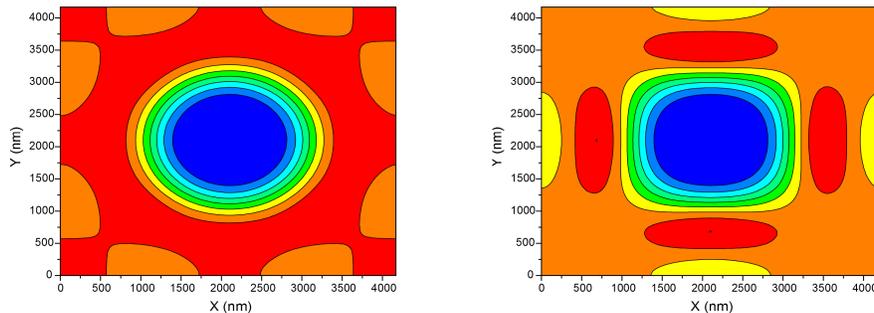


FIGURE 3.1 – Intensités dans la résine de réseaux de lignes.

3.1.2 Le filtrage de la pupille

La pupille du système d'exposition est l'élément qui va collecter les ordres de diffraction en sortie du réticule. Cependant, elle ne récupérera qu'un nombre fini d'ordres de diffraction, ce qui va nous faire perdre des informations optiques dans les hautes fréquences. Ce filtrage passe-bas est donc responsable notamment de l'arrondissement des angles des motifs imprimés et du retrait de bout de ligne. Avec le simulateur, on peut s'amuser à changer l'ouverture numérique pour en observer les effets. Les ordres de diffraction collectés par la pupille sont répertoriés dans des fichiers textes. On peut ainsi compter le nombre d'ordre collectés pour une ouverture et une direction de propagation données, et aussi observer l'image aérienne :


 FIGURE 3.2 – Image aérienne d'un motif carré 2D périodique pour différentes valeurs de l'ouverture numérique. A gauche $ON=0,6$ à droite $ON=0,8$.

Ces simulations ont été faites avec 8 points sources, 4 ondes transverses électriques et 4 ondes transverses magnétiques, symétriquement placées autour du point $(0;0)$ dans l'espace des directions de propagation des ondes. On observe bien une image aérienne avec un contour arrondi pour une ouverture numérique de 0,6 et un contour qui se rapproche d'un rectangle pour une ouverture numérique de 0,8. Les simulations ont

généralisé des fichiers dans lesquels sont répertoriés respectivement 21 et 39 ordres de diffraction pour chaque onde considérée. Une augmentation de l'ouverture numérique permet bien de collecter plus d'ordre de diffraction et d'informations hautes fréquences.

3.1.3 La non linéarité des variations de dimension

Dans le paragraphe précédent nous avons évoqué l'effet de densité qui pour une même dimension de motif sur le réticule renvoie des dimensions sur la plaque dépendantes de l'environnement de ce motif. Dans ce paragraphe, nous parlons cette fois d'une variation de la dimension d'un motif sur le réticule qui n'est pas linéairement reconduite sur plaque [59, p.91]. Comme l'effet de densité, ce phénomène augmente lorsque les dimensions des motifs diminuent. Nous n'illustrerons pas ce phénomène ni en simulation ni en mesure. En effet, ce phénomène n'a pas été modélisé dans le simulateur que nous avons réalisé. De plus, les incertitudes et le bruit de mesure sur nos images électroniques sont trop importantes pour le phénomène concerné. Dans la référence [37, p.348], il est expliqué que la supposition selon laquelle *"si le plus petit motif d'une structure donnée est bien résolu alors les motifs de taille plus importante le seront aussi"* est éronnée. Si l'on souhaite imprimer simultanément la plus petite dimension d'un motif donné et des dimensions plus importantes de ce même motif, il est proposé dans cette référence de définir la résolution comme étant *"la plus petite dimension d'un motif telle que ce motif à sa plus petite dimension et aussi à des dimensions plus importantes puissent être imprimés simultanément avec une profondeur de champ donnée"*. Dans ce cas, on parle de la résolution linéaire du système. En dehors de ce domaine, la non-linéarité de l'impression des motifs engendre des erreurs importantes qui doivent être corrigées.

3.1.4 Les effets de la résine photosensible

La résine photosensible est aussi responsable de phénomènes indésirables capables d'induire une différence entre le motif obtenu et celui attendu. Tout d'abord, la présence de ce film mince implique des phénomènes optiques de type ondes stationnaires. Ces ondes stationnaires vont induire une modification du profil de la résine. Ces phénomènes sont directement reliés à l'épaisseur de la résine qui devra donc être choisie pour fournir par exemple la meilleure uniformité des dimensions des motifs face aux variations du procédé lithographique. Ensuite, des phénomènes physico-chimiques peuvent entrer en jeu comme les phénomènes de diffusion acide/base. En effet, la résine photosensible est un composé organique qui va générer un composé acide à l'absorption de l'énergie lumineuse fournie par la source. Cet acide photo-généré va diffuser dans la résine, modifiant les limites spatiales fixées par l'exposition du réticule. Un autre phénomène intéressant est celui de l'érosion de la résine. L'acide photo-généré peut, dans le cas notamment de l'étape de photolithographie pour l'implantation des sources et drains, réagir chimiquement avec la couche anti-réfléctive située au-dessus de la résine, réduisant ainsi l'épaisseur de la résine. Nous pouvons également trouver dans la littérature des éléments indiquant que certains paramètres résines comme le contraste peuvent influencer les effets de proximité optique [37, p.421].

3.1.5 Autres exemples

Enfin, il existe une multitude de phénomènes limitant la fidélité des motifs sur la plaque par rapport à ceux qui sont dessinés sur le réticule, comme l'effondrement ou le décollement de la résine sous une certaine dimension, l'étape de gravure ou de dépôt qui va suivre, les variations de dose et de focus d'exposition, les aberrations des lentilles [37, p.343]. Et bien entendu il y a les effets d'empilement des couches minces sur la plaque. Ces phénomènes peuvent être mécaniques, comme l'adhérence de la résine en fonction du substrat sur lequel elle est déposée, ou d'origine optique, ce qui nous intéresse particulièrement dans ces travaux de thèse.

Le second décor de notre thèse

Nous venons d'introduire le second décor de cette thèse. Nos travaux s'articulent donc autour des effets d'empilement des couches minces d'origine optique mais aussi dans le cadre des techniques de correction des effets de proximité optique. Un de nos objectifs sera donc d'étudier les possibilités de prendre en compte et de corriger ces phénomènes à l'aide des techniques qui vont être abordées dans les paragraphes suivants.

3.2 La correction du réticule

Ce que montrent les différents phénomènes présentés ci-dessus, qu'ils soient issus de l'optique de l'imagerie, du comportement physico-chimique de la résine ou du futur traitement, c'est que les dimensions sur le réticule et sur la plaque n'entretiennent pas de relation simple. Les variabilités associées à chacun de ces effets sont cumulées et rendent les spécifications impossibles à respecter. Ces phénomènes doivent être mesurés, modélisés, corrigés. Les techniques de correction des effets de proximité, qui rappelons-le, vont tenter d'adresser tous ces phénomènes, sont basées sur un raisonnement inversé par rapport à la lithographie en tentant de répondre à la question : "Quelle doit-être la dimension du motif sur le réticule, compte tenu des effets observés, pour obtenir la dimension idéalement recherchée sur la plaque?". L'idée de base de ces corrections est donc de tenter de compenser les effets en amont sur le réticule en redimensionnant les motifs pour obtenir sur plaque les motifs désirés. Ces différents phénomènes parasites se sont amplifiés au fur et à mesure de l'avancée des nœuds technologiques. Par conséquent, les types de corrections ont eux aussi évolués, passant de tables de correction appliquées à partir de règles géométriques à des modèles semi-rigoureux permettant de calculer le contour de la résine après exposition.

3.2.1 Corrections basées sur des règles géométriques

La plupart des effets répertoriés précédemment génèrent des erreurs systématiques. Par conséquent, la première stratégie de correction mise au point consiste à caractériser ces phénomènes sur des motifs simples afin de créer des tables de correction. Le schéma ci-dessous permet d'illustrer ces types de corrections basées sur des règles géométriques :

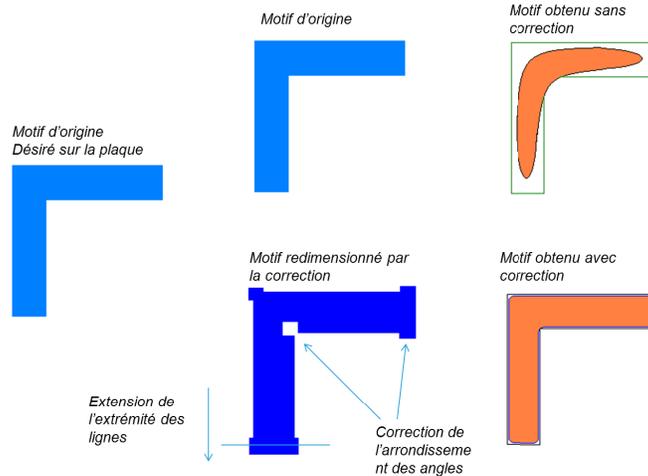


FIGURE 3.3 – Exemple de correction des motifs du réticule

Comme nous pouvons le voir sur cette illustration, le redimensionnement des motifs au niveau du réticule va permettre de diminuer l'écart entre le contour résine visé et celui réellement obtenu. Les retraits de bout de lignes sont corrigés par extension, l'arrondissement des coins par ajout ou retrait de surface du polygone sur le réticule. L'utilisation de motifs diffractants non résolus mais assistant la résolution des motifs peuvent être utilisés par exemple pour densifier l'environnement d'un motif isolé.

L'effet de densité génère lui aussi une erreur systématique que l'on peut complètement caractériser avec des mesures de réseau de lignes où l'on fait varier la dimension de la ligne et le pas du réseau [37, p.420]. Pour obtenir une correction de qualité avec ce type de fonctionnement, deux choses fondamentales sont nécessaires : le bon ensemble de règles et les bonnes valeurs pour chaque règle [37, p.424]. La difficulté avec ces corrections, c'est qu'elles sont très dépendantes du type de motifs considérés. Le nombre de règles nécessaires à la correction de circuits en deux dimensions devient vite trop important. Dès le nœud technologique 90 nm, une méthode de correction basée sur une modélisation de l'exposition photolithographique devient nécessaire [37, p.425].

3.2.2 Corrections basées sur une modélisation mathématique

Etant donné que chaque règle doit être paramétrée à partir de mesures expérimentales, conserver ce type de correction malgré un nombre de règles en constante augmentation requiert des ressources matérielles trop importantes [37, p.425]. Les tables de correction réalisées expérimentalement doivent laisser leur place (bien que n'ayant pas totalement disparues) à la modélisation mathématique du procédé de photolithographie optique. Cependant, le défi est de taille. La simulation numérique doit être appliquée

à des puces complètes en restant rapide et précise. Ce mode de correction s'effectue en deux étapes, la création et calibration d'un modèle, puis l'utilisation du modèle dans un algorithme de correction du réticule définissant ainsi la géométrie finale de ses motifs.

La création et la calibration d'un modèle

La première étape consiste donc à créer le modèle qui sera utilisé plus tard pour la simulation des contours de la résine obtenus après exposition. Différentes plateformes logicielles sont proposées par des professionnels. Même s'il existe de nombreuses différences dans le fonctionnement de ces plateformes, on retrouve certains points communs liés aux contraintes de simulation. Notamment, ces modèles sont généralement composés de deux modules distincts :

- le premier module, appelé modèle optique, modélise l'intensité obtenue dans la résine à travers l'exposition du réticule. Ce sont des modèles rigoureux souvent basés sur la théorie optique d'Hopkins.
- le second module, appelé modèle résine, modélise les effets physico-chimiques de la résine photosensible. Ce sont des modèles empiriques.

La création et la calibration d'un modèle ne sont pas les étapes les plus limitantes en terme de temps de calculs mais la calibration nécessite des ressources matérielles. La création de modèle se fait à partir de la description du système comme paramètres d'entrée. Ensuite, la calibration des paramètres du modèle optique (focus, dose, position de l'image aérienne,...) et la calibration des termes du modèle résine utilisé se font à l'aide des mesures expérimentales. Ce mode de fonctionnement apporte un avantage fondamental par rapport à l'utilisation de règles géométriques. Le modèle est capable de prendre en compte la plupart des phénomènes du procédé de photolithographie avec une quantité de mesures réduite.

L'algorithme de correction

Une fois le modèle créé et calibré, il va falloir l'utiliser pour la correction du niveau du circuit électronique correspondant sur toute la puce. Un algorithme de correction suivant un processus itératif est utilisé. Une première correction basée sur des tables de données peut être appliquée pour donner naissance au réticule virtuel de départ. Les contours des motifs présents sur ce réticule informatique vont être fragmentés, et un site d'évaluation de l'erreur entre le fragment et le contour résine souhaité sera créée par fragment. Après chaque modélisation du contour de la résine obtenu, les différents fragments sont déplacés dans le respect d'un certain nombre de règles pour diminuer l'erreur entre le contour souhaité et le contour simulé. Ce processus itératif permet l'obtention de la géométrie finale des motifs du réticule du niveau considéré. L'algorithme proposé ici est une version simplifiée de ce qui existe actuellement. En effet, il faut également générer les motifs diffractants non résolus d'aide à l'impression, les prendre en compte dans les modèles, etc. A chaque niveau de photolithographie nécessitant l'application des techniques de correction des effets de proximité optique correspond un

algorithme et un modèle. Les contraintes sévères en termes de temps et puissance de calcul apparaissent alors. En effet, à chaque itération, l'application du modèle doit être effectuée sur toute une puce. Et cela à chaque niveau à traiter de chaque produit.

Précision ou vitesse, il faut choisir

Les corrections basées sur la modélisation doivent être rapides, parallélisables pour bénéficier de la puissance de calcul mise à disposition et précis. C'est la raison pour laquelle les modèles comportent une partie optique rigoureuse et une partie résine empirique. Cependant, il est parfois nécessaire de développer des modèles plus précis au détriment du temps de simulation et de l'économie des ressources informatiques. L'avancée des nœuds technologiques contraint à prendre en compte de plus en plus de phénomènes, donnant naissance à des modèles résines plus complexes. Certains phénomènes optiques comme ceux issus de l'aspect tri-dimensionnel du réticule obligent les professionnels à remplacer les modèles optiques scalaires par des modèles vectoriels. Ainsi, pour chaque niveau, de chaque produit, de chaque technologie, un choix important doit être fait pour obtenir une modélisation suffisamment précise mais avec des ressources fixées. Cette contrainte est un élément essentiel des travaux présentés dans ce manuscrit.

Troisième décor de notre thèse

Nous abordons ici le troisième et dernier décor de notre thèse. Nous savons maintenant que ces travaux concernent les effets optiques d'empilement des couches minces et que nous allons nous intéresser aux possibilités de prise en compte de ces effets dans le cadre des techniques de correction des effets de proximité optique. Un troisième thème dans ces travaux est soulevé par les paragraphes précédents, celui du rapport entre la vitesse et la précision d'une correction de type simulation numérique, à partir de modèles empiriques, semi rigoureux, ou rigoureux. Nous aurons donc à évaluer, en fonction de l'amplitude et de la complexité des phénomènes caractérisés, la précision et le besoin en ressources informatiques temps/mémoire de ce type de correction. Nous pourrons ainsi proposer un mode de travail optimal pour la correction de ces effets à chaque responsable de niveau de photolithographie en fonction de la puissance des effets, de la tolérance des dimensions envisageables et des ressources disponibles.

3.3 Modélisation de la photolithographie optique

Nous proposons dans cette section d'aborder quelque peu la modélisation du procédé de photolithographie utilisée dans l'industrie microélectronique et notamment dans le cadre des techniques de correction des effets de proximité optique. Cette section s'attache donc à donner quelques bases de la modélisation de la photolithographie utilisée aujourd'hui, mais n'a pas vocation à établir la théorie de la formation de l'image dans la résine photosensible. L'objectif ici est plutôt d'explicitier les problématiques liées à cette modélisation et de donner quelques indices sur les solutions employées. Nous donnerons quelques éléments de modélisation en explicitant les approximations parfois dépassées, et nous expliquerons comment fonctionnent les simulations rapides utilisées

aujourd'hui. Enfin nous parlerons brièvement de l'évolution de cette modélisation qui devient de plus en plus complexe pour pallier les insuffisances de ses approximations.

3.3.1 La problématique

La problématique liée à la modélisation de la photolithographie optique dépend de ce que l'on souhaite en faire. Dans l'ouvrage [25, p.141], on distingue quatre types d'utilisation de cette modélisation :

- elle peut être utilisée comme un outil de recherche permettant de réaliser des expériences virtuelles pour valider ou invalider l'intérêt d'évolutions ou modifications du procédé lithographique ;
- elle peut être également utilisée comme un outil de développement du procédé en permettant l'optimisation de ces paramètres pour un résultat d'exposition plus proche de celui recherché ;
- l'ouvrage fait référence à une utilisation industrielle, permettant de se substituer à l'expérience et aux tests pour la prise de décision en production par les ingénieurs ce qui permet de gagner du temps et de l'argent ;
- et enfin une utilisation qui m'est familière, à savoir comme un outil d'apprentissage permettant d'avoir un retour sur expérience beaucoup plus rapide que l'expérience physique.

Compte-tenu de ces définitions, nous pouvons probablement classer la correction des effets de proximité optique dans la seconde, puisque dans ce cas, la modélisation permet l'optimisation des dimensions des motifs du réticule. Alors il va de soi que les problématiques ne sont pas les mêmes pour chacune de ces utilisations. La modélisation pour une utilisation industrielle doit privilégier le temps de simulation, c'est la raison pour laquelle les modèles de lithographie en correction des effets de proximité optique sont basés principalement sur la théorie scalaire de la diffraction, alors que les logiciels permettant la recherche ou l'apprentissage peuvent se permettre d'être plus gourmand en temps de simulation en échange d'une précision supérieure. Dans ce cas, la modélisation sera plutôt basée sur une description vectorielle de la lumière et les équations de Maxwell.

3.3.2 Modèles et approximations

Nous allons principalement nous concentrer sur la modélisation du procédé lithographique pour la correction des effets de proximité optique. Le principal phénomène optique utilisé par la photolithographie optique de projection est le phénomène de diffraction. Comme il est écrit dans l'ouvrage [37, p.39], les équations de Maxwell permettent de décrire ce phénomène mais mènent à des équations aux dérivées partielles lourdes à résoudre. Nous allons donc trouver d'autres moyens pour modéliser ce système en nous basant notamment sur la théorie scalaire de la diffraction. Nous avons déjà exposé le principe de la photolithographie optique par projection. Le réticule va

diffractionner la lumière issue de la source d'exposition. Les ordres de diffraction en sortie du réticule seront collectés par la pupille puis projetés par l'optique de projection dans la résine photosensible. Il nous faut donc une description du comportement de ces différents modules, à savoir, l'illumination, le réticule, la pupille, l'optique de projection et l'empilement de couches minces sur le substrat.

L'illumination

Rappelons que le système d'illumination à modéliser est un système d'illumination de type Köhler. Une source lumineuse est donc placée dans le plan focal d'un condenseur. Cette source, généralement étendue, peut être considérée comme une infinité de points sources qui donneront chacun une onde plane en sortie du condenseur [50, p.31]. Les différents points sources étant incohérents spatialement entre eux, l'intensité finale est la somme des intensités issues de chaque onde plane. Il est intéressant ici de noter qu'il peut y avoir deux sortes de modélisation. Dans le cadre de la correction des effets de proximité, on va se diriger vers une simplification du problème par une représentation scalaire de la lumière et une formulation astucieuse, que nous allons détailler dans le paragraphe suivant. Dans les outils de modélisation rigoureux, on va proposer la possibilité de travailler avec une description vectorielle de la lumière. Dans ce cas, il va falloir effectuer la résolution du système pour chaque point de la source lumineuse, c'est à dire pour chaque onde plane. Ainsi, il est nécessaire de décrire la source par un ensemble d'ondes planes suffisamment représentatif de la source de départ. Nous avons donc ici une première approximation. Mais ce nombre de points sources peut encore être trop important pour une simulation d'une durée raisonnable, alors on trouve dans la littérature une seconde approximation [43, p.50]. Celle-ci suppose que deux points sources très proches seront diffractés de la même manière par le réticule [43, p.60]. Ainsi, si on suppose que 100 points sources sont nécessaires pour représenter une source conventionnelle, on pourra calculer rigoureusement la propagation des ondes pour seulement une dizaine d'entre eux et déterminer le comportement des points restants par interpolation. Cette problématique est intéressante car aujourd'hui le simulateur réalisé dans le cadre de cette thèse effectue le calcul pour chaque point source. Un moyen de diminuer le temps de calcul par interpolation d'un sous ensemble de points sources est en cours.

Le réticule

Nous arrivons maintenant au réticule qui est l'objet diffractant du système. Pour effectuer le calcul de la figure de diffraction, il va nous falloir déterminer la transmission du réticule. D'ici proviennent des approximations importantes utilisées aujourd'hui en modélisation de la photolithographie optique qui vont nous permettre de travailler avec une description scalaire de la lumière. L'objectif est de représenter les phénomènes de diffraction et d'interférences lumineuses du procédé de photolithographie à partir d'une représentation scalaire de la lumière. On cherche donc à négliger le couplage des champs électriques et magnétiques. Le principe est de supposer que le réticule n'influence pas la

polarisation de la lumière incidente et que la diffraction sera indépendant de la polarisation de l'onde incidente ainsi que de l'angle d'incidence [37, p.40]. Cette approximation est valide sous deux conditions :

- si l'épaisseur du réticule est faible devant la longueur d'onde de la source. Cette condition est vérifiée d'après la littérature lorsque l'épaisseur du réticule est inférieure à la longueur d'onde divisée par deux [37, p.40].
- si les motifs du réticule sont grands devant la longueur d'onde de la source. La littérature mentionne la condition comme nécessitant des motifs de dimensions supérieures à deux fois la longueur d'onde [37, p.40].

La première condition est dépassée dans certains cas, avec des épaisseurs de réticule de l'ordre de 100 nm pour une longueur d'onde en 193 nm. La seconde condition permet de s'assurer que les oscillations du champ proche au niveau des contours d'un motif ait le temps de converger d'un bord à l'autre du motif. Cette approximation commence également à être dépassée avec la longueur d'onde à 193 nm. Les motifs sur plaque de silicium ne devraient pas être plus petits que la centaine de nanomètres (pensez que le motif sur le réticule est quatre fois plus grand, à comparer avec deux fois la longueur d'onde) pour les technologies actuelles 28 nm.

Cependant, en supposant que ces approximations soient acceptables, elles permettent en effet de grandement simplifier la modélisation de la diffraction du réticule. On peut alors supposer que la fonction de transmission du réticule est représentée par le réticule lui-même, c'est à dire que, dans le cas d'un réticule binaire, la transmission vaut 0 là où un motif absorbant est présent, 1 en absence de matériau absorbant. A la frontière entre les matériaux absorbant et non absorbant la transmission est représentée par une fonction échelon, c'est la raison pour laquelle ces approximations sont regroupées sous le nom des "conditions de frontière de Kirchoff" [37, p.40]. De ce fait, la transmission du réticule est indépendante de la polarisation de l'onde incidente qui peut donc être ignorée.

la pupille et l'optique de projection

La modélisation de la pupille est relativement simple. Son rôle est de collecter les ordres diffractés par le réticule. Sa taille étant limitée dans l'espace, une partie des ordres diffractés ne pourra pas passer par la pupille qui peut donc être modélisée par un élément de filtrage.

Quant à l'optique de projection, son comportement se modélise principalement par la réduction des motifs d'un facteur 4. Néanmoins, la nécessité d'améliorer la précision des modèles de photolithographie optique avec la diminution des dimensions des transistors nous pousse à tenter de modéliser l'effet des aberrations des lentilles de l'optique de projection. En effet, plusieurs défauts peuvent dégrader la résolution de la photolithographie, à savoir les défauts de fabrication et d'assemblage des lentilles. Les erreurs engendrées par ces défauts des lentilles sur le front d'onde sont modélisées par modification de la phase du front d'onde idéal, c'est à dire sans aberration. Ces modifications de phase sont mathématiquement représentées par les polynômes de Zernike [30, p.105].

le substrat

Nous entrons dans la partie du système d'exposition qui nous concerne le plus, avec le substrat composé d'un empilement de couches minces dont la résine photosensible. Il y a ici trois types d'effet à modéliser.

Le premier correspond aux phénomènes de type optique, à savoir phénomènes de réfraction/réflexion et apparition d'ondes stationnaires et interférences [14]. Dans l'ouvrage [25, p.106], une liste de modèles de différents niveaux d'approximations est proposée pour la projection de l'image aérienne dans la résine et pour la prise en compte des ondes stationnaires, avec par exemple le modèle scalaire d'ordre 0 qui est intéressant pour les systèmes à faible ouverture numérique et qui ne prend pas en compte les erreurs de focus, le modèle d'ordre 1 qui ajoute la notion de focus, ou un modèle scalaire dédié aux systèmes d'ouverture numérique plus important. Dans le cas de nos simulations, nous travaillons avec une résolution des équations de Maxwell et un calcul du champ électromagnétique directement dans la résine photosensible. Le second type de phénomène à modéliser est optique et chimique. Il s'agit de modéliser les variations d'absorption de la résine au fur et à mesure de l'exposition lumineuse. Ce phénomène a été modélisé pour la première fois par Frederick Dill, au début des années 1970, qui propose une modélisation sur les trois paramètres A,B et C qui portent son nom. On exprime l'absorption α sous une forme linéaire de la concentration du composant photoactif de la résine :

$$\alpha = AM(z, t) + B \quad (3.1)$$

où M est la quantité du composant photoactif à la position z dans la résine après la durée d'exposition t, A et B sont les paramètres de dépendance et d'indépendance de l'absorption au composant photoactif. C est le paramètre de sensibilité optique lié à la vitesse de disparition de l'élément photoactif qu'on retrouve dans l'équation cinétique de sa réaction de disparition :

$$\frac{\partial M(z, t)}{\partial t} = -I(z, t)M(z, t)C. \quad (3.2)$$

où I représente l'intensité lumineuse.

Enfin, le dernier type de phénomènes à modéliser au niveau de la résine photosensible est d'ordre physico-chimique, puisqu'il s'agit de modéliser la diffusion des acides et bases photogénérés pendant l'exposition lumineuse et pendant les étapes de recuit de la résine. Il est important de noter que contrairement aux modèles proposés précédemment, il s'agit ici souvent de modèles empiriques calibrés mathématiquement par un ensemble de données mesurées. Le lecteur trouvera dans la thèse [39], une description de quelques modèles résines classiques utilisés en industrie. Enfin, le développement de la résine est également modélisé pour extraire un contour simulé.

Vers des modules plus complexes

Finalement, la modélisation de la photolithographie repose sur la méthode scientifique proposé dans la section modélisation du premier chapitre. En effet, le système de

photolithographie, système très complexe, est divisé en sous parties dont le comportement est modélisé par les lois de la physique avec un niveau d'approximation donné. Cependant, ces approximations sont de plus en plus proches de leur limite de validité et des modules de plus en plus complexes sont ajoutés régulièrement dans la modélisation du procédé de photolithographie optique. En particulier, les effets tri-dimensionnels font l'objet de travaux importants depuis quelques années. On voit de plus en plus de travaux sur la modélisation des effets tri-dimensionnels du réticule avec le développement d'algorithmes et modélisation qui permettent une précision acceptable en limitant au maximum le temps de calcul. On voit, bien entendu, des travaux sur l'aspect tri-dimensionnel du substrat, similaires à ceux publiés dans le cadre de ce travail doctoral. Enfin, on voit également se développer des modèles en trois dimensions pour la résine photosensible. On peut de moins en moins négliger les variations du profil de la résine et il y a de nombreux travaux sur des modélisations très diverses en termes de niveau d'approximation. Finalement, on peut se demander comment on peut encore réussir à effectuer des simulations de ce procédé dans un temps satisfaisant. La prochaine section propose une rapide description de l'astucieuse formulation utilisée aujourd'hui en simulation numérique du procédé de photolithographie optique.

3.3.3 La stratégie des TCC

Nous avons présenté dans la section dédiée à la correction des effets de proximité optique par simulation, l'algorithme d'optimisation itérative des dimensions des motifs présents sur le réticule. Une question vient alors naturellement : comment, surtout compte tenu de la section précédente, peut-on effectuer une correction par la simulation en un temps satisfaisant ? Les calculs doivent-ils être effectués complètement à chaque itération, à partir du nouveau réticule virtuel ? La vitesse d'exécution des algorithmes construits pour la modélisation du procédé lithographique se base sur une formulation astucieuse du modèle. C'est ce que nous souhaitons illustrer dans cette section.

Les hypothèses de bases

Il y a deux outils de base dans la théorie utilisée pour le calcul de l'intensité lumineuse dans la résine lors du procédé de photolithographie optique qui sont la théorie scalaire de la lumière et la théorie de l'optique de Fourier.

L'optique géométrique est basée sur l'hypothèse d'une propagation rectiligne de la lumière et ne peut ainsi en aucun cas permettre l'étude des phénomènes de diffraction et d'interférences. Une description de la lumière comme champ électromagnétique devient nécessaire. Cependant, si les ondes ont des directions de propagation peu différentes les unes des autres, il est possible de montrer que l'étude de ces phénomènes optiques peut se résumer à l'étude d'une seule composante du champ électrique. On utilise donc une description scalaire du champ électromagnétique.

Il va ainsi être important de s'assurer que l'on peut négliger l'aspect vectoriel du champ. Cela explique les approximations que l'on trouve dans la littérature et citées précédemment. En effet, la longueur d'onde de la source doit rester petite devant les motifs du réticule car les angles de diffraction en dépendent directement. Plus la longueur d'onde est grande par rapport à l'ouverture par laquelle la lumière va être diffractée,

et plus les angles de diffraction seront importants. Ensuite, l'épaisseur du réticule doit être faible devant la longueur d'onde pour pouvoir supposer que sa transmission est indépendante de la polarisation et de l'angle d'incidence de l'onde considérée.

Enfin, il faut résoudre le problème de diffraction au niveau du réticule. Deux moyens permettent ici d'arriver au même résultat. Il s'agit d'établir mathématiquement le principe d'Huygens-Fresnel pour la diffraction lumineuse (rappelons qu'un principe de se démontre pas, on arrive à un formalisme mathématique qui est équivalent au principe). La première solution consiste à partir de l'expression de la réciprocity de l'établissement des champs électromagnétiques, en extraire une équation scalaire grâce aux équations de Maxwell, et la résoudre avec une base d'ondes sphériques pour arriver au théorème de Helmholtz-Kirchhoff [59, p.33]. Ce sur quoi nous souhaitons attirer le lecteur c'est que l'application de ce théorème au problème de la diffraction d'onde nécessite l'emploi des approximations de Kirchhoff que nous avons citées précédemment dans le paragraphe sur la modélisation du réticule, c'est à dire que le champ scalaire et sa dérivée normale ne sont pas perturbés dans les ouvertures du réticule et valent 0 dans les régions opaques d'un réticule binaire. Cependant, il est possible de résoudre le problème de diffraction depuis la formule de la diffraction de Rayleigh-Sommerfeld, sans avoir à prendre en compte les approximations de Kirschhoff [59, p.39]. Les résultats sont légèrement différents MAIS...! Dans le cas de la photolithographie optique par projection (j'insiste, le cas d'une photolithographie de proximité serait à traiter différemment), l'utilisation du condenseur avant le réticule et de la longue colonne optique en sortie nous permettent de nous placer dans le cadre de la diffraction de Fraunhofer, c'est à dire simplifier les deux expressions précédentes en supposant que les distances Source-Réticule et Réticule-Plaquette de silicium sont très grandes devant la taille des motifs du réticule [59, p.41]. Et nous arrivons dans ce cas à la même expression qui rend ainsi inutile l'utilisation des conditions de frontière de Kirchhoff. De plus, la formule de la diffraction dans le cadre de l'approximation de Fraunhofer montre que le champ électrique diffracté est la transformée de Fourier de la fonction de transmission de l'élément diffractant [21, p.540].

Nous avons ici tout en main pour étudier les deux approches de modélisation du procédé de photolithographie, à savoir la formulation d'Abbe et celle d'Hopkins systématiquement citées dans la littérature alors que seule celle d'Hopkins est utilisée. Cela reste cependant intéressant de voir la formulation d'Abbe comme une étape intermédiaire à celle d'Hopkins.

La formulation d'Abbe

Le premier à se pencher sur un moyen de décrire l'imagerie d'un microscope est Ernst Abbe en 1873 [50, p.7]. La principale difficulté dans la description mathématique en imagerie comme en photolithographie vient de l'utilisation d'une source étendue. Comme nous l'avons évoqué précédemment, cette source peut-être considérée comme une infinité de points sources spatialement incohérents entre eux. L'approche de Abbe en photolithographie est donc de calculer l'image obtenue dans la résine par la diffraction du réticule pour chaque point source et de sommer toutes les images entre elles. Voyons mathématiquement où cela nous mène. Nous nous replaçons dans le cadre de l'illumina-

tion de Köhler. L'utilisation d'un système source et condenseur nous place dans le cadre de la diffraction de Fraunhofer et donc le champ électrique diffracté est la transformée de Fourier de la fonction de transmission du réticule :

$$Ed(f_x, f_y) = TF\{t(x, y)\} \quad (3.3)$$

où $Ed(f_x, f_y)$ est la transformée de Fourier du champ diffracté, f_x et f_y les variables des fréquences spatiales suivant les deux dimensions du plan du réticule, $t(x, y)$ la fonction de transmission du réticule, (x, y) les coordonnées de l'espace cartésien du réticule et où $TF\{\}$ désigne l'opérateur transformée de Fourier bi-dimensionnelle.

La figure de diffraction va maintenant être filtrée par la pupille. Dans le domaine de Fourier, la pupille peut donc être mathématiquement modélisée par l'expression suivante :

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

où $P(f_x, f_y)$ est la transformée de Fourier de la pupille, f_x et f_y les variables des fréquences spatiales suivant les deux dimensions du plan de la pupille, ON l'ouverture numérique et λ la longueur d'onde de la source lumineuse.

On peut exprimer l'impact de la pupille par l'expression :

$$Ep(f_x, f_y) = Ed(f_x, f_y).P(f_x, f_y) \quad (3.4)$$

où $Ep(f_x, f_y)$ est la transformée de Fourier du champ filtrée par la pupille.

Nous avons indiqué précédemment que l'optique de projection n'était modélisée que par son grandissement, ce qui se traduit d'après les propriétés des transformées de Fourier par une augmentation de la fréquence de la figure de la diffraction [37, p.43]. Nous pouvons par exemple inclure cet effet sans plus de description mathématique dans une fonction d'optique de projection $O(f_x, f_y)$;

Le champ dans le domaine de Fourier dans le plan image s'exprime donc par

$$Er(f_x, f_y) = Ed(f_x, f_y).P(f_x, f_y).O(f_x, f_y) \quad (3.5)$$

et donc le champ électrique dans la résine par

$$er(x, y) = TF^{-1}\{Er(f_x, f_y)\} \quad (3.6)$$

Et on obtient enfin, l'intensité dans la résine par

$$I(x, y) = |er(x, y)|^2 \quad (3.7)$$

Nous venons de calculer l'intensité lumineuse dans la résine. Cependant, notre calcul n'est valable que pour un point source centré sur l'axe optique. Comme nous l'avons évoqué précédemment, la difficulté réside dans l'utilisation d'une source partiellement cohérente. Les autres points constitutifs de la source vont émettre des ondes qui seront, à la sortie du condenseur, des ondes planes de directions de propagation différentes. Comment prendre en compte les autres points sources dans le calcul de l'image ? Nous avons effectué un peu plus haut l'approximation selon laquelle la transmission du réticule est indépendante de la direction de propagation de l'onde incidente. Ainsi, le

décalage d'un point source en dehors de l'axe optique va générer un décalage de la figure de diffraction [37, p.57]. Le champ dans la résine va pouvoir s'exprimer comme étant :

$$er(x, y, f'_x, f'_y) = TF^{-1}\{Ed(f_x - f'_x, f_y - f'_y) \cdot P(f_x, f_y) \cdot O(f_x, f_y)\} \quad (3.8)$$

Ainsi, la formulation d'Abbe étant basée sur la sommation des images obtenus par un ensemble de points sources incohérents entre eux, il faut maintenant intégrer cette expression sur la source optique :

$$I_{totale}(x, y) = \int_{f_x} \int_{f_y} |er(x, y, f_x, f_y)|^2 df_x df_y \quad (3.9)$$

Le problème avec cette formulation, c'est qu'il faut effectuer autant de fois le calcul de diffraction qu'il y a de points sources considérés. Et c'est là qu'intervient la formulation d'Hopkins qui va nous permettre sans approximation supplémentaire d'effectuer les calculs avec une plus grande efficacité.

La formulation d'Hopkins

Si on résume les difficultés rencontrées, nous travaillons avec une source partiellement cohérente. Nous sommes ainsi contraint d'effectuer le calcul de diffraction pour chaque point source et surtout pour chaque réticule même si le reste du système est inchangé ! Et c'est ici que va intervenir la formulation astucieuse d'Hopkins. Tous les calculs effectués jusque là dépendent des approximations que l'on a établies au départ. L'une d'entre elles, déjà utilisée deux fois, est de considérer la transmission du réticule comme indépendante de l'angle d'incidence de l'onde considérée. Ceci, nous l'avons vu, nous permet de simplement modéliser le décalage d'un point source hors axe par un décalage de la figure de diffraction du réticule. Cette nouvelle figure de diffraction est filtrée par la pupille. De ce fait, ne pouvons-nous pas prétendre que décaler la figure de diffraction au-dessus de la pupille fixe revient à fixer la figure de diffraction pour déplacer la pupille dans le sens opposé ? Ainsi, le champ électrique dans la résine pour un point source donné s'exprime :

$$er(x, y, f'_x, f'_y) = TF^{-1}\{Ed(f_x, f_y) \cdot P(f_x + f'_x, f_y + f'_y) \cdot O(f_x, f_y)\} \quad (3.10)$$

De ce fait, la fonction du réticule, élément clé de la modélisation de la photolithographie optique, est indépendante du point source considéré, ce qui va nous permettre de l'extraire de l'intégration de la source !

Nous allons ainsi pouvoir calculer ce qu'on appelle les TCC pour "*transmission cross coefficient*", variables dépendant uniquement de la source et la pupille de projection. Nous pourrions garder en mémoire ces tables pour les réutiliser à chaque simulation numérique d'un réticule soumis aux mêmes conditions. Ceci est le moyen le plus utilisé aujourd'hui pour limiter le temps de simulation numérique du procédé de photolithographie optique.

Jusqu'à aujourd'hui, la modélisation ne comprenait pas de description précise des couches minces inférieures à la résine photosensible. C'est le travail de cette thèse que

de caractériser et modéliser ces effets d'empilement qui sont présentés dans la section suivante.

3.4 Conclusion : cette thèse

Ainsi, les techniques de correction des effets de proximité optique, qui portent bien mal leur nom, permettent aujourd'hui de dépasser les limites imposées par les lois de la diffraction. En effet, ces techniques ont évolué avec les phénomènes limitant la résolution du procédé de photolithographie optique et adressent aujourd'hui les distortions au sens large, c'est à dire tout phénomène pouvant générer un écart des motifs obtenus sur plaque avec ceux initialement recherchés. Elles basent leur fonctionnement sur un raisonnement inverse qui consiste à répondre à la question : "Quelles doivent être les dimensions des motifs du réticule pour que les motifs dans la résine correspondent à ceux recherchés?" Les premiers modes de correction, toujours utilisés pour certaines technologies, consistaient à représenter les phénomènes de densité des motifs par des tables de données pour la correction des motifs des réticules. Puis ces techniques se sont dirigées vers l'emploi de modélisations de plus en plus complexes mais toujours en essayant de limiter le temps de simulation. Il faut trouver des compromis entre la qualité du modèle et la vitesse de simulation numérique. La théorie scalaire de la lumière a permis pendant longtemps une modélisation suffisamment précise du procédé de photolithographie optique mais les approximations utilisées commencent à s'éloigner de leur domaine de validité. La formulation d'Hopkins permet une bonne efficacité de calcul pour les industriels qui continuent à essayer de l'utiliser tout en complexifiant les modèles. Ce chapitre achève la première partie de ce manuscrit. Le premier chapitre a permis au lecteur d'avoir une bonne visibilité du milieu dans lequel s'inscrivent ces travaux. Pour moi il m'a permis de mieux me situer dans mon propre milieu professionnel. Le second chapitre a présenté le système de photolithographie, élément central de cette thèse puisqu'il s'agit pour nous d'améliorer ce procédé par l'introduction de simulations capables de gérer l'impact des variations d'empilement de matériaux présents sous la résine. Ce troisième chapitre nous a encore permis de descendre d'un niveau l'échelle d'observation du contexte de ces travaux doctoraux. Nous sommes passés de la microélectronique à la photolithographie, de la photolithographie aux techniques de correction des effets de proximité optique, de ces techniques à la modélisation. Nous avons enfin atteint notre destination, la modélisation d'un ensemble de phénomènes particuliers, les effets d'empilement. La visite commence au chapitre suivant...

Chapitre 4

L'étude expérimentale des effets d'empilement des couches minces

Introduction

Les chapitres précédents nous ont permis de présenter le sujet, de définir le contexte et les notions importantes de cette thèse. Ce quatrième chapitre nous emmène au cœur des phénomènes physiques étudiés lors de ces travaux. Entièrement dédié à la mesure expérimentale des effets d'empilement des couches minces sous la résine photosensible, ce chapitre commence par une définition et présentation des effets d'empilement avant de se développer autour de trois axes. Le premier revient à définir les objectifs de ces mesures en répondant aux questions "Que veut-on mesurer?" et "Dans quel but?". Nous allons donc définir précisément les objectifs de cette étude expérimentale. Une description de la problématique principale sera alors donnée, ce qui nous mènera à la conception des structures qui seront imprimées par photolithographie et observées par microscopie électronique. Le second axe, répondant à la question "Par quels moyens?", décrit les étapes nécessaires à la création de groupes de données cohérents et exploitables. La méthode d'imagerie par microscopie électronique à balayage sera alors introduite et le protocole de traitement des images, spécifique à notre étude, sera justifié. Enfin, le troisième axe correspond à l'interprétation de ces mesures. Ce chapitre se terminera alors par la présentation d'une production née de nos travaux, résultat important de cette thèse : les fichiers contenant les structures tests d'évaluation systématique des effets d'empilement.

4.1 Présentation des effets d'empilement

C'est à partir de cette section que nous entrons dans les résultats techniques des travaux de cette thèse. En effet, la définition, la présentation et la classification des effets d'empilement qui vont suivre sont des résultats qui nous sont propres. Nous allons donc définir les effets d'empilement et les classer par type que nous illustrerons par des images obtenues par microscopie électronique.

4.1.1 Définition des effets d'empilement

Dans le cadre de cette thèse, nous définissons les effets d'empilement comme toutes variations des dimensions d'un motif résine, dues à la réponse optique de chaque type d'empilement présent sur le substrat de silicium pendant l'exposition lumineuse du procédé de photolithographie.

Cette définition soulève plusieurs remarques. Tout d'abord, il est à noter que nous parlons d'effets et non pas de phénomènes d'empilement. Effectivement, nous ne mesurerons jamais une intensité lumineuse, pour caractériser une réflexion ou de la diffraction, mais toujours les dimensions des motifs dans la résine qui auront été dégradés par les phénomènes d'empilement. De plus, s'il existe des moyens tels que les couches anti-reflet pour limiter les phénomènes d'empilement et donc diminuer leurs effets, et même si nous l'aborderons dans ce manuscrit, l'objectif de ces travaux n'est pas de limiter les phénomènes physiques d'empilement mais bien d'anticiper leurs effets pour apporter la correction nécessaire sur les motifs présents sur le réticule. Ensuite, cette définition ne spécifie pas, comme nous le faisons souvent dans ce manuscrit, le fait que ces couches minces se trouvent sous la résine photosensible. La résine elle-même, ainsi que les couches anti-reflet présentes au-dessus de la résine, sont responsables des effets d'empilement et sont indissociables du reste de l'empilement. Cependant, même si nous présenterons quelques résultats, nous ne travaillerons pas sur plusieurs configurations des couches supérieures à la résine photosensible. Une troisième remarque, c'est que nous définissons ces effets comme issus de phénomènes optiques. Il est probable qu'il y ait d'autres types de phénomènes en jeu. Notamment, lorsque les effets d'empilement sont forts et que les motifs de résine deviennent très petits, on arrive dans un domaine de comportement non linéaire de la résine, on peut observer des glissements de la résine. Rien ne prouve que l'adhérence de la résine est identique en fonction des différents substrats. Enfin, dernière remarque, dans la littérature, y compris dans les articles que nous avons publiés dans le cadre de cette thèse, il est souvent fait référence à la notion de topographie. Mais cette notion se rapporte plutôt à des variations du plan supérieur d'une couche donnée. La topographie est une problématique qui existe effectivement et est présente dans notre sujet. Cependant, elle n'en constitue absolument pas le problème complet, et nous ne parlerons pas beaucoup de ce sujet.

4.1.2 Les principaux effets d'empilement

En bref, les effets d'empilement, qu'est ce que c'est ? A quoi sont-ils dus ? Les effets d'empilement, c'est lorsque pour un unique motif sur le réticule, on obtient des motifs différents dans la résine, dépendemment de ce qui se trouve en dessous. Cela est dû à la présence sur plaque de plusieurs substrats uniformes et à la transition entre leurs matériaux constitutifs. Nous allons donc distinguer trois catégories d'effets détaillés dans les paragraphes suivants.

Les effets de substrat

Le premier type d'effet d'empilement que l'on trouve sur plaque de silicium, c'est celui du substrat. C'est l'effet que l'on observe lorsqu'un motif de résine est exposé sur plusieurs régions uniformes différentes. Dans ce cas, l'empilement de couches minces est invariant (les transitions sont suffisamment éloignées pour être négligées) dans le plan de la résine, mais plusieurs matériaux différents sont empilés selon l'axe vertical comme le montre le schéma ci-dessous.

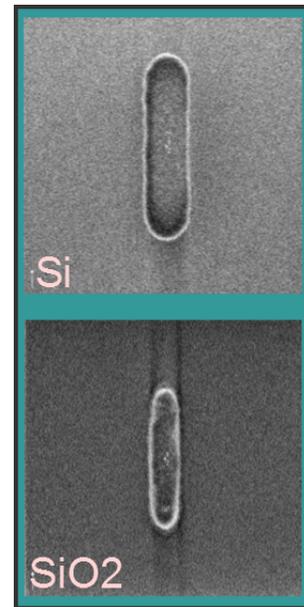
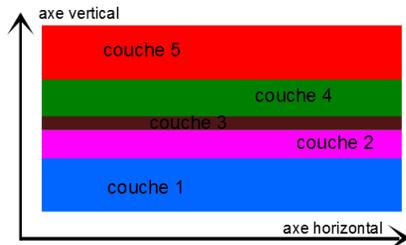
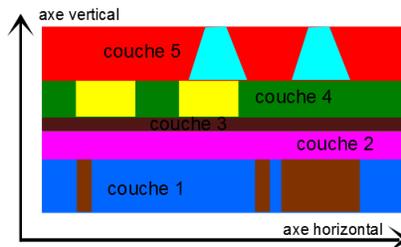
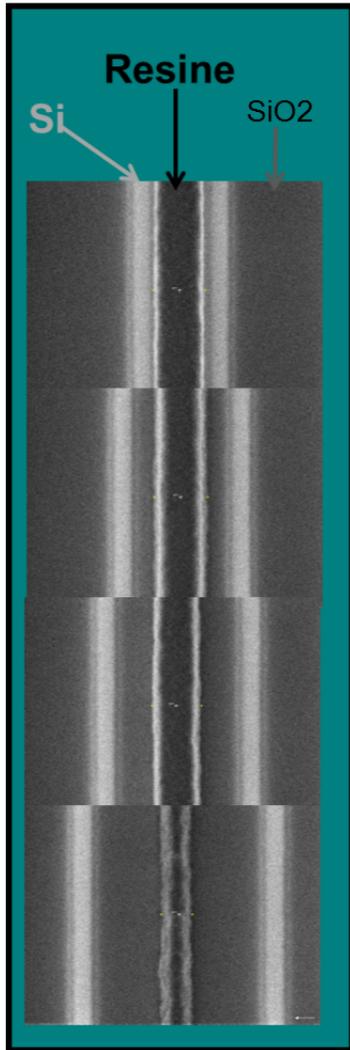


FIGURE 4.1 – Illustration de l'effet de substrat sur la résine photosensible

Les images issues du microscope électronique à balayage, figure 4.1, illustrent cet effet grâce à un plot de résine, identique sur le réticule mais totalement différent en fonction du substrat sur lequel il se trouve. Le plot de résine du haut a été imprimé dans une résine déposée sur un substrat de silicium, le plot du bas sur un substrat de silice (une couche de silice elle-même présente sur un substrat de silicium). Les réponses optiques des deux empilements sont différentes. Les différences de réflexions/transmissions aux interfaces entre les couches et les différences d'absorption de la lumière se traduisent par deux caractéristiques. L'effet de substrat est donc caractérisé par :

- une différence d'énergie d'exposition de la résine ;
- un décalage du paramètre de meilleur focus (voir chapitre 2), ce que nous montrerons plus en détail dans la partie résultats de caractérisation de ce chapitre.

Les effets de transition



Le second type d'effet d'empilement, sans doute le plus problématique du point de vue des motifs obtenus sur plaque, est l'effet de transition entre deux matériaux. Il s'agit d'un des effets que l'on observe lorsque la résine est déposée sur une pile de matériaux variant à la fois dans le plan vertical et le plan horizontal, comme le montre le schéma ci-dessous :

Comme l'illustre l'ensemble d'images électroniques ci-contre, c'est la transition entre les deux matériaux, ici le silicium et la silice, qui est responsable d'une réflexion lumineuse parasite sur la ligne de résine photosensible. Les caractéristiques de ce phénomène le rendent difficile à corriger. Les caractéristiques de l'effet de transition sont :

- une distance d'interaction supérieure à un micromètre ;
- une amplitude variable de manière non linéaire en fonction de la distance entre la transition et le flanc de la résine concernée ;

FIGURE 4.2 – Illustration de l'effet de transition sur la résine photosensible. La ligne de résine au centre de l'image sur substrat de silice est dégradée par la présence de deux lignes de silicium (brillantes sur l'image)

Les effets de masquage ou effets combinés

Enfin, la dernière catégorie d'effets d'empilement est en fait la combinaison des deux autres classes définies précédemment. Dans une région de la plaque de silicium peuvent se trouver différents substrats et différentes transitions qui vont générer un effet d'empilement global. Cependant, cet effet global ne sera en aucun cas une somme linéaire des effets individuels. Et cela signifie plusieurs choses :

- les effets d'empilement ne représentent qu'un danger limité parce que dans certaines situations les effets se compensent partiellement. Les quelques situations potentiellement dangereuses sont traitées spécifiquement et sous contrôle ;
- le raisonnement intuitif qui consiste à vouloir prendre en compte les effets les uns après les autres progressivement est caduque. Il faut prévoir dès le départ la prise en compte de termes croisés entre les différents effets.

De plus, une modification mineure de la position d'un des éléments de l'empilement ou d'une épaisseur de matériau peut totalement changer l'effet résultant. L'ensemble d'images électroniques ci-dessous en est un parfait exemple :

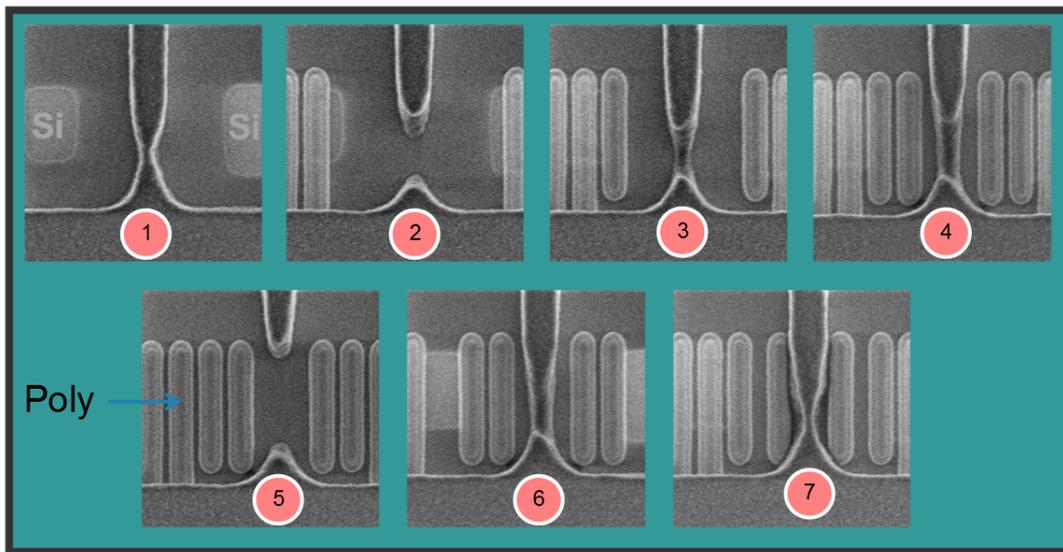


FIGURE 4.3 – Ligne de résine sur un ensemble de configurations construites à partir d'un motif réel non fonctionnel.

Cet ensemble de configurations a été réalisé à partir d'un défaut réel non fonctionnel qui correspond à la configuration n°4. Sur cette image, on distingue une ligne de résine au centre, fortement dégradée par quatre lignes de polysilicium de chaque côté, elles-même positionnées sur deux plots de silicium. Le tout est placé sur un substrat de silice. Nous nous sommes alors amusés à modifier cette configuration et à observer les changements. Prenez par exemple la suite de configuration 4-3-2-1. Sur l'image 4, la ligne de résine est dégradée. Le retrait de deux lignes de polysilicium mène à la configuration n°3, la ligne est moins dégradée. Le retrait de deux nouvelles lignes nous emmène à l'image n°2, la ligne disparaît. Retirons les quatre dernières lignes pour arriver en 1, la ligne réapparaît plus proprement. Cet exemple illustre le phénomène clé de la modélisation des effets d'empilement pour les industriels qui nous fournissent les outils de correction des réticules. Il leur faudra être capables de détecter toutes les configurations problématiques mais surtout ne pas prédire des effets d'empilement là où la résultante des effets individuels sera nulle. Nous verrons plus loin dans ce chapitre des illustrations plus simples des combinaisons d'effets d'empilement.

4.2 La conception des structures à mesurer

La première étape dans l'étude expérimentale des effets d'empilement est de concevoir un ensemble de structures qui vont mettre en évidence ces phénomènes. Ce que nous souhaitons obtenir, c'est une plaque de silicium sur laquelle se trouvent des motifs résine à observer par microscopie électronique. Ces motifs résine doivent se trouver sur des configurations d'empilements de couches minces variées et fixées, correspondant à l'étape de photolithographie du procédé considéré. La question est de savoir comment obtenir ces plaques.

4.2.1 La réalisation physique des structures

L'obtention de structures imprimées dans la résine, observables par microscopie électronique à balayage, n'est pas triviale. Elle est soumise à un protocole particulier et à des contraintes de ressources et de temps de cycle qui sont à prendre en compte dans la gestion de nos travaux.

S'insérer dans un nouveau projet silicium

La première étape est d'attendre le démarrage d'un nouveau projet, c'est à dire d'un nouveau circuit, ou ensemble de circuits qui va être réalisé sur plaque de silicium et associé à une technologie donnée. Par exemple, au cours de ces travaux, nous avons pu réaliser et mesurer des motifs sur les technologies standards 28 nm, FDSOI 28 nm et FDSOI 20 nm. Ces circuits, d'abord générés dans un format informatique, seront réalisés par combinaisons d'étapes de procédé dont des étapes de photolithographie optique. A chaque étape de photolithographie sera associé un réticule, conçu pour la réalisation du circuit. Ces réticules vont d'abord être réalisés informatiquement, c'est à dire que les polygones constitutifs du réticule seront représentés dans un fichier numérique. Ces groupes de motifs, correspondant aux différentes parties du projet, vont subir des modifications, des corrections, et seront assemblés pour la commande du réticule physique. C'est à ce moment que nous devons agir pour obtenir nos propres structures. Avant que l'étape d'assemblage des motifs d'un réticule ne soit effectuée, il faut livrer nos propres structures. Il s'agit alors de générer informatiquement les motifs qui seront embarqués physiquement sur un réticule d'un projet donné. Pour des raisons d'optimisation des coûts, nos structures de test ne peuvent pas occuper sur le réticule de l'espace qui pourrait être alloué à un circuit. Elles sont donc embarquées dans les chemins de découpe présents entre les puces fonctionnelles, d'où certaines contraintes sur les dimensions et l'aire totale occupée par l'ensemble de structures. Dans le cadre de nos travaux, ces structures test seront constituées de motifs à plusieurs niveaux, celui de la résine photosensible mais aussi ceux de l'empilement des couches des niveaux inférieurs. Les contraintes en termes de ressources et de temps de cycle sont très importantes.

Des contraintes lourdes, une organisation serrée

L'espace alloué sur plaque de silicium est généralement très limité et le cycle d'obtention de structures est très long. En effet, après avoir livré le fichier contenant les structures que l'on souhaite imprimer sur plaque, il faut attendre la commande puis la réception des réticules. Les plaques devront parcourir un certain nombre d'étapes de procédé avant d'arriver à celle qui nous intéresse. Enfin, il faut obtenir l'autorisation d'arrêter les plaques dans leur évolution en production pour effectuer les mesures. Autrement dit, plusieurs mois s'écoulent entre la conception des structures et les mesures physiques des motifs résines. Ce délai engendre des difficultés majeures dans la gestion de tels travaux. Les hypothèses avancées sur les mécanismes des effets étudiés ne pourront être validées/invalidées qu'après toutes ces étapes. Dans le cas de mesures incomplètes, le cycle d'obtention de nouvelles structures repoussent de plusieurs mois les conclusions de nos études. De plus, nos travaux expérimentaux sont totalement dépendants de la production, ce qui implique que si un projet n'est plus reconduit ou s'il n'y a pas de plaque disponible, aucune mesure complémentaire ne pourra être réalisée. En bref, les deux clés du succès de la caractérisation de nos effets sont l'anticipation et l'organisation. A chaque nouvelle opportunité, c'est à dire chaque nouveau projet, les groupes de structures de caractérisation ont été repensés de façon à livrer un maximum de structures utiles pour un espace sur plaque le plus restreint possible. Chaque groupe de structures doit se suffire à lui-même en apportant une information complète sur un phénomène. Et surtout, il est indispensable de toujours posséder sur plaque des motifs permettant une évaluation des effets d'empilement des couches inférieures sur la résine photosensible même si elle n'est pas prévue. Ainsi, nous avons effectué de nombreuses mesures de ces phénomènes. Mais dans quel but ?

4.2.2 Un objectif double : caractériser et modéliser

La particularité de la partie expérimentale de cette thèse est que les mesures des effets d'empilement doivent répondre à deux objectifs distincts. En effet, elle doit permettre à la fois une caractérisation complète des effets étudiés mais aussi la construction de modèles pour la prise en compte de ces effets dans les techniques de correction des effets de proximité optique. La gestion simultanée de ces deux objectifs séparés mènent effectivement à quelques différences dans la conception des structures.

Objectif caractérisation

Cette caractérisation a deux buts. Le premier est de saisir le fonctionnement des phénomènes pour mieux les traiter tels qu'ils se manifestent aujourd'hui. Le second, pour demain, est de démontrer tout leur potentiel pour mieux prévenir des prochaines difficultés. Certaines configurations aujourd'hui absentes des plaques de silicium, peuvent à l'avenir, générer des dégradations très importantes des motifs dans la résine. La problématique des ressources exprimée précédemment, en termes de place sur le silicium et de temps de mesure, doit être prise en compte dans nos réflexions. Il y a à cela deux raisons. Tout d'abord, les ressources dédiées à nos travaux ne sont pas illimitées.

Ensuite, il faut anticiper une éventuelle mise en place d'évaluations systématiques de certains effets en production en étant le moins contraignant possible.

La nécessité de comprendre les mécanismes des effets étudiés implique la création de structures simples, donc préférentiellement unidimensionnelles, mettant en évidence les phénomènes décorrélés les uns des autres. L'existence d'effets combinés ayant néanmoins été démontrée, il est nécessaire de concevoir quelques structures mettant en évidence ces phénomènes ensembles sur une même structure. Cependant, le nombre de configurations possibles rend impossible une étude complète des effets combinés. Des structures à deux dimensions doivent également être réalisées pour l'étude des phénomènes à fort caractère bi-dimensionnel. Les structures conçues doivent permettre une évaluation quantitative des phénomènes à travers la mesure des dimensions des motifs, mais aussi une évaluation qualitative grâce à l'observation de nos structures. Certaines d'entre elles pourront d'ailleurs être réalisées à partir d'un motif produit réel en jouant sur la position ou encore la présence/absence d'un élément à l'origine d'un effet d'empilement. Le besoin, quant à lui, d'anticiper les problèmes qui surviendront avec les prochains produits ou nœuds technologiques, nous pousse à imaginer tous les types de configurations possibles et à créer régulièrement de nouvelles structures.

Objectif modélisation

Si un groupe de structures doit être embarqué sur des réticules pour une évaluation des effets d'empilement, il est préférable compte tenu des contraintes ressources, de prévoir la possibilité de la construction d'un modèle pour la prise en compte des phénomènes observés. Aujourd'hui, certains fournisseurs d'outils de correction de motifs en photolithographie proposent des solutions pour prendre en compte les effets d'empilement. Les groupes de structures que nous allons générer doivent donc permettre la calibration et la vérification des modèles bâtis par ces fournisseurs et ceux bâtis par nos propres moyens. Si de nombreuses structures utilisées pour la caractérisation peuvent être employées pour la construction de modèles, la philosophie diffère tout de même en quelques points. Il faut que les structures dédiées à cette action soient représentatives du produit. L'objectif principal des modèles capables de prendre en compte les effets d'empilement, est de gérer les effets observés dans le produit. Les structures dédiées à la caractérisation ont vocation à mettre en évidence les pires phénomènes. Ce n'est pas forcément une nécessité que le modèle puisse reproduire le pire effet d'empilement mis en avant par une structure qu'on ne peut pas trouver dans un produit fonctionnel. Nous verrons que la structure clé utilisée pour évaluer l'effet prépondérant en matière d'empilement n'a aucune réalité plaque (c'est à dire qui ne pose pas de problème électrique), mais que la structure similaire la plus proche ayant elle une réalité plaque est trop complexe pour une interprétation simple. Il faudra prévoir un nombre non négligeable de structures bi-dimensionnelles, avec notamment des plots et des trous de résine. Les structures combinant plusieurs sources d'effet d'empilement sont les bienvenues et pour une raison simple, cela représente la plupart des situations réelles fonctionnelles. Et quand bien même nous ne serions pas capables visuellement de décorréler et comprendre les phénomènes simplement en observant l'image obtenue par microscopie électronique à balayage, un logiciel de création de modèles sera capable d'optimiser mathématiquement ses paramètres à partir d'une telle image et de l'information des motifs de départ. Par conséquent, des parties de circuits réels pourront

être utilisées. Comme indiqué au chapitre 3, les modèles possèdent généralement un module appelé modèle optique. Parmi nos structures, certaines seront donc mesurées à plusieurs conditions de focus pour la calibration des modèles optiques.

Une difficulté subsiste lorsque l'on cherche à produire des structures représentatives du produit en termes de motifs résine et d'empilements, c'est qu'elles doivent être adaptées à chaque niveau de photolithographie d'un produit. Ainsi, pour l'étude expérimentale des effets d'empilement sur des niveaux différents de ceux sur lesquels nous avons principalement travaillé, des modifications ont dû être apportées en accord avec la personne responsable du niveau concerné.

Certaines problématiques restent néanmoins communes aux deux objectifs. L'apparition d'une nouvelle problématique d'effet d'empilement ou des mesures incomplètes demandent des ressources importantes. La simulation peut aussi être un outil permettant l'anticipation des phénomènes à la conception des structures test. Maintenant que nous avons établi les règles générales de la conception des structures, nous pouvons passer à la situation pratique.

4.2.3 Position du problème principal

Historiquement, ces travaux de thèse ont été mis en place pour l'étude des effets d'empilement sur un niveau de photolithographie particulièrement vulnérable aux effets d'empilement. Au départ, cette étude s'est faite avec la technologie de transistor standard à substrat épais. Puis par la suite nous avons effectué des travaux avec la technologie silicium sur isolant FDSOI.

L'implantation des sources et drains

Nos travaux se sont principalement concentrés sur l'étape de photolithographie qui précède l'implantation des sources et drains des transistors. Cette photolithographie s'effectue sur un empilement ne contenant pas de couche anti-reflet pour des raisons techniques et économiques. Nous avons pu effectuer d'autres études à d'autres niveaux que nous détaillerons dans la partie résultat. La problématique à ce niveau de photolithographie est de gérer ce que nous avons présenté dans le premier chapitre, le dopage. La résine photosensible doit recouvrir des zones à protéger de l'implantation ionique qui va suivre ou parfaitement découvrir les parties qui doivent être implantées. Le danger en cas de défaut de placement ou de dimension des motifs de résine est d'implanter une zone active qui n'est pas censée l'être ou vice-versa, ce qui peut parfois générer des problèmes électriques.

28 nm technologie standard

Dans le cadre de cette thèse, nous avons donc commencé à étudier les effets sur la technologie standard 28 nm substrat épais.

Comme représenté sur l'illustration ci-contre, le procédé démarre avec une plaque de silicium vierge d'une épaisseur de plusieurs centaines de micromètres et d'un diamètre de 300 mm. Sur cette plaque, on va graver des tranchées profondes dans le silicium qui seront remplies par de la silice, isolant ainsi les différentes zones actives. Sur ce nouvel empilement seront ajoutés les éléments de polysilicium. Enfin, le procédé de photolithographie qui va suivre sera préparé par le dépôt de la résine photosensible et d'un dépôt d'une couche anti-reflet supérieure. L'épaisseur de la plaque, 10^{-4} m, est très grande devant les épaisseurs considérées des empilements de couches minces 10^{-7} m. Pour cette raison, nous considérerons toujours le silicium du substrat comme un matériau semi-infini. De même, nous supposerons (même si cela ne sera pas toujours vraiment le cas) que nos mesures ne se feront pas en bord de plaque et nous n'aborderons pas les problèmes d'effets de bord.

Le tableau suivant résume les différentes origines d'effets d'empilement à l'étape de photolithographie pour l'implantation des sources et drains en technologie substrat épais 28 nm :

Substrats	Transitions
Silicium	Silicium/Silice
Silice	Silicium/Polysilicium
	Silice/Polysilicium

TABLE 4.1 – Origines des effets d'empilement à l'étape d'implantation ionique des sources et drains en technologie standard.

Dans cette situation, nous nous retrouvons donc avec deux différents types d'empilement uniforme ou substrat, le silicium et la silice. Nous devons également étudier l'impact de trois types de transition. Il existe potentiellement des situations avec un substrat de polysilicium mais ce n'est pas fréquent dans les circuits. Quelques mesures ont cependant été effectuées pour vérifier la réponse de ce type de substrat.

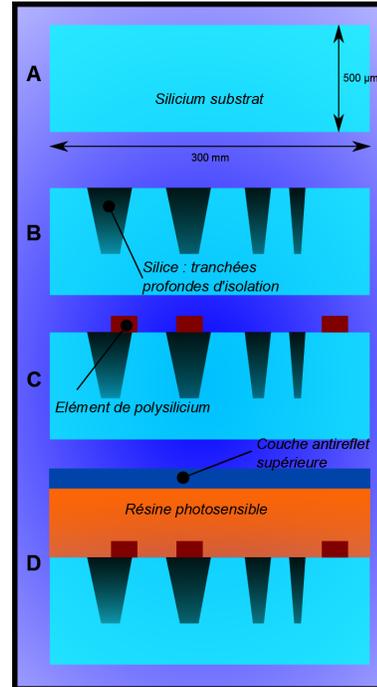


FIGURE 4.4 – Quelques étapes intermédiaires menant à l'étape de photolithographie de l'implantation ionique des sources et drains des transistors en technologie standard.

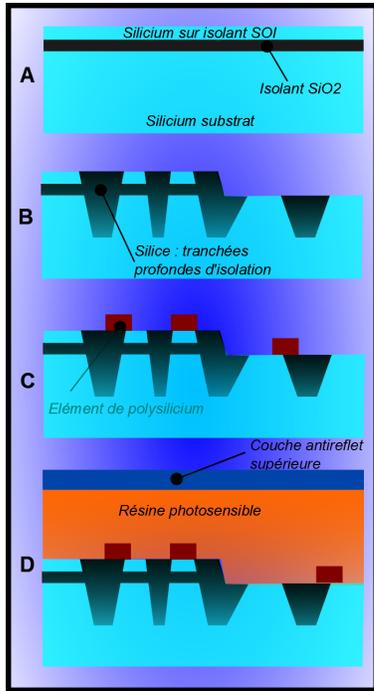


FIGURE 4.5 – Quelques étapes intermédiaires menant à l'étape de photolithographie de l'implantation ionique source et drain en technologie FDSOI.

28 nm technologie FDSOI

Au cours de nos travaux nous avons également été amenés à travailler avec la technologie FDSOI 28 nm. Les différents états de l'empilement restent similaires à ceux décrits dans l'illustration précédente mais il y a une différence importante. Nous souhaitons conserver la possibilité de réaliser des composants sur un substrat standard. Ainsi, une gravure supplémentaire permet de définir des zones où les films minces sont retirés sur la plaque. Dans ce cas, nous parlerons de région ou zone SOI pour "Silicon on Insulator" ou le film mince de silice est conservé, et de région ou zone NOSOI pour "No Silicon on Insulator" là où la gravure aura retiré le film mince de silice. Dans ce cas, une différence de marche et d'épaisseur de matériaux apparaissent entre les deux régions, ce qui génère des différences de réponse optique à l'exposition des différents empilements. Dans le cas de la silice, la différence de marche induit une différence d'épaisseur modifiant ainsi les ondes stationnaires qui apparaissent dans cette couche mince, mais elle modifie également la position de la résine par rapport à la focale du système d'exposition, modifiant ainsi le paramètre de meilleur focus. Cette différence augmente considérablement les sources d'effets d'empilement comme le montre le tableau suivant :

modifiant ainsi le paramètre de meilleur focus. Cette différence augmente considérablement les sources d'effets d'empilement comme le montre le tableau suivant :

Substrats	Transitions
Silicium SOI	Silicium/Silice SOI
Silice SOI	Silicium/Polysilicium SOI
	Silice/Polysilicium SOI
Silicium NOSOI	Silicium/Silice NOSOI
Silice NOSOI	Silicium/Polysilicium NOSOI
	Silice/Polysilicium NOSOI
	Silice SOI/Silice NOSOI

TABLE 4.2 – Origines des effets d'empilement à l'étape d'implantation des sources et drains en technologie FDSOI

En effet, avec deux régions au lieu d'une seule, nous nous retrouvons avec quatre substrats et sept transitions en comptant celle du passage entre les régions SOI et NOSOI. Le nombre de substrat est très important pour la réalisation d'un modèle avec les outils de simulation proposés par les fournisseurs car il devient potentiellement nécessaire de réaliser un modèle par substrat si on ne réussit pas à prouver que le système est

simplifiable. Quant à la gestion des interfaces, il faut non seulement les traiter du point de vue des effets d'empilement, c'est à dire comme une source d'exposition secondaire, mais il faut également les traiter au sens où elles représentent des discontinuités entre les substrats. Ces discontinuités de substrat engendrent les mêmes discontinuités de modèle qui doivent être gérées numériquement par les outils de simulation.

4.2.4 Les structures à mesurer

Maintenant que nous connaissons le principe et les contraintes d'obtention des structures test, que nous avons fixé les objectifs de ces mesures et que nous connaissons la position du problème principal, nous pouvons établir la liste des structures à mesurer. Il est important de noter que les structures dans le cas de travaux sur la technologie standard à substrat épais ou sur la technologie FDSOI dans la région SOI ou dans la région NOSOI n'ont pas de raison d'être différentes, ce qui va grandement simplifier la réalisation des structures test. En effet, les régions SOI et NOSOI dans la technologie silicium sur isolant ne se distinguent que par le retrait du film mince de silice et la technologie standard n'est différente de cette dernière que par l'épaisseur de silice. Ainsi, il est évident que ces types d'empilement auront des réponses optiques différentes, mais la configuration (Polysilicium, Silicium, Silice) sera géométriquement identique d'un type de technologie à l'autre pour l'étape d'implantation des sources et drains. Pour pouvoir étudier les données sur le plan des effets d'empilement, il est nécessaire de posséder des structures sur le réticule parfaitement identiques, c'est à dire formes et dimensions, sur des empilements variables.

Les structures pour l'étude des effets de substrat doivent être composées de motifs résine à une dimension de type lignes isolées, espaces isolés, et réseaux denses, de motifs à deux dimensions de type plots et trous de résine, bouts de ligne et motifs en H. Ces motifs résine doivent être disposés sur tous les types de substrats uniformes pour en connaître les effets relatifs, ici sur silicium et silice. Les structures pourront être mesurées en fonction du focus pour la capture de l'effet du décalage du meilleur focus. Nous travaillons avec un réticule à champ sombre, les motifs sur le réticule sont des ouvertures pour la résine. Les images suivantes sont des exemples de structures test :

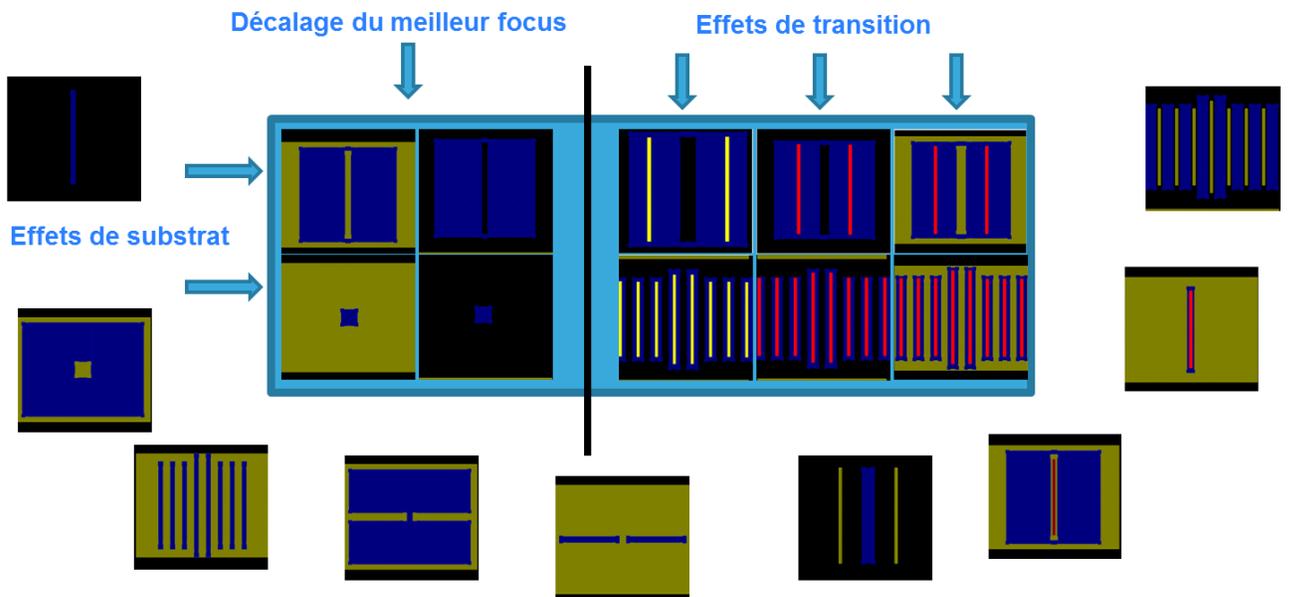


FIGURE 4.6 – Exemples de structures test. Silicium en jaune, Polysilicium en rouge, zone à implanter en bleu (complémentaire de la résine), silice en noir.

Les motifs isolés sont les plus sensibles au focus, les structures bi-dimensionnelles

les plus sensibles aux effets substrats. Les dimensions des motifs résine varient entre environ 150 nm et 400 nm pour correspondre aux motifs d'un produit, au niveau de la photolithographie de l'implantation des sources et drains des transistors. Ces mêmes motifs résine peuvent être imprimés sur des empilements en réseau de silicium/silice, silicium/polysilicium ou silice/polysilicium. La structure la plus intéressante pour mettre en évidence le phénomène de transition est celle de la ligne isolée avec les deux lignes perturbatrices silicium ou polysilicium qui s'éloignent de chaque côté. Cependant, compte-tenu de la problématique qui consiste à découvrir ou couvrir des éléments de silicium, on comprend que ces structures ne correspondent pas à des structures pouvant poser des problématiques électriques. Les deux structures suivantes permettent d'illustrer l'effet de transition sur des structures plus proches de la problématique électrique de cette étape de photolithographie :

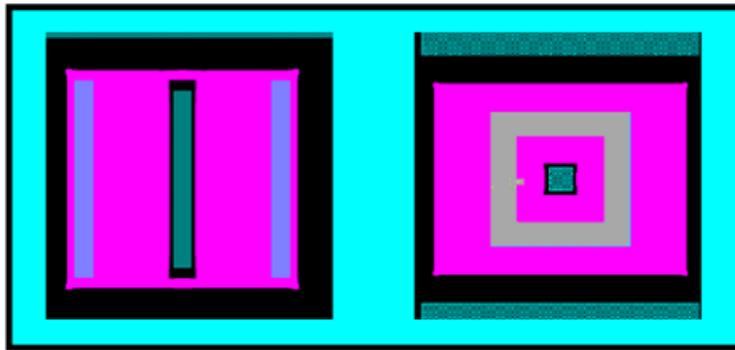


FIGURE 4.7 – Exemples de structures test. Complémentaire de la résine en rose, silicium en jaune, silice en noir.

On retrouve sur cette image une structure à une dimension d'une ligne de résine qui protège de l'implantation ionique une ligne de silicium centrée en dessous. A gauche, la ligne de résine risque d'être perturbée par la présence des deux autres lignes de silicium ou plus précisément de la transition entre le silicium et la silice. La seconde structure est son équivalent bi-dimensionnel. Les effets combinés ont été étudiés à partir de la structure clé de la ligne de résine perturbée par deux éléments de silicium ou polysilicium à la position révélant les effets les plus forts, en ajoutant de nouveaux éléments à des positions variables comme sur l'image ci-dessous.

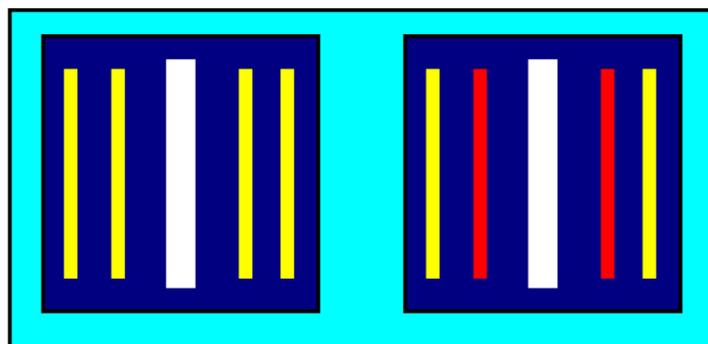


FIGURE 4.8 – Exemples de structures effets combinés. Zone implantée en bleu, complémentaire de la résine. Silicium en jaune, polysilicium en rouge.

La réalisation d'un modèle standard ou avec la prise en compte des effets d'empilement est basée sur la construction d'un ou plusieurs modèles optiques calibrés à partir de structures sur substrats uniformes mesurées à travers plusieurs conditions de focus et de dose. Un équilibre entre les structures à une et deux dimensions est nécessaire pour l'apprentissage du modèle.

Beaucoup d'autres types de mesures viennent s'associer à celles-ci pour la caractérisation et la modélisation des effets d'empilement, à savoir des structures test non symétriques pour une étude plus qualitative des effets ou pour les logiciels de modélisation, des structures construites par modification d'une structure produit, ou encore les mesures effectuées dans le cadre du protocole STMicroelectronics de contrôle et de recherche des défauts de la photolithographie.

Nous voici désormais armés pour une étude expérimentale des données, il s'agit maintenant de réaliser des images par microscopie électronique à balayage, d'en extraire une mesure et de construire des groupes de données fiables et exploitables.

4.3 De la mesure expérimentale aux données

Dans la section précédente, nous avons vu comment obtenir des structures pour l'étude des effets d'empilement, de la conception en fonction du besoin de caractérisation et de modélisation, à l'obtention sur plaque de silicium des motifs imprimés dans la résine. Cependant, nous sommes encore loin d'avoir en main un ensemble de mesures fiables et exploitables. Nous allons devoir effectuer des mesures de la dimension des motifs par microscopie électronique à balayage, puis nous devons générer des ensembles de données. Mais outre la problématique de l'incertitude de mesure commune à tout sujet de mesures expérimentales, il y a une problématique supplémentaire et de taille qui s'impose. Nous nous apprêtons à mesurer des structures qui n'ont pas fait l'objet de réflexion particulière jusque là. Mais dans quelle mesure les phénomènes d'empilement ont-ils un impact sur la méthode d'imagerie utilisée ? Sur l'algorithme d'extraction des dimensions sur ces images ? Est-il raisonnable de considérer comme acquises les lois usuelles de linéarité des dimensions en fonction de l'énergie d'exposition ? Partant du principe qu'il ne nous était pas permis de directement utiliser le protocole de mesure existant et que les lois connues pouvaient être modifiées par les effets d'empilement, nous avons beaucoup étudié les deux étapes clés du passage de l'image électronique à balayage aux données. Ces deux étapes sont les suivantes : traiter l'image pour extraire les dimensions des motifs et s'assurer que les mesures obtenues soient fiables.

La technique d'imagerie utilisée dans le cadre de cette thèse est l'imagerie électronique à balayage. Elle est choisie notamment pour sa vitesse de mesure car elle nous permet d'effectuer plusieurs milliers de mesures en quelques heures. Pour chaque mesure, le microscope vient s'aligner sur un premier motif, effectue la mise au point du système sur un autre motif avant de prendre l'image qui nous intéresse. Cette technique d'imagerie présente cependant plusieurs défauts. Tout d'abord, le microscope électronique à balayage permet une mesure de type destructif. En effet, le faisceau d'électrons dégrade la résine sur la plaque rendant ainsi inconsistantes plusieurs mesures consécutives. Ensuite, elle ne permet pas d'obtenir d'informations sur l'épaisseur de la résine mesurée, il s'agit d'une information de surface (le faisceau est utilisé pour une vue de dessus). Il nous est donc difficile d'avoir des informations sur le flanc de la résine avec

notre équipement. Enfin, le contraste des images obtenues, et même plus globalement le signal récupéré par le faisceau d'électrons, dépendent des matériaux présents sur la plaque de silicium.

4.3.1 Le protocole de mesure

Le protocole de mesure, c'est à dire l'ensemble des réglages des paramètres de l'équipement et de traitement des images, est à établir. En effet, il existe des protocoles ou des recommandations de l'équipementier sur ces réglages mais ils sont parfois inappropriés aux vues de nos problématiques. Nous avons donc mené diverses études sur l'influence de ces paramètres, en essayant à la fois d'adapter le protocole à notre problématique et en même temps de ne pas trop nous éloigner des protocoles existants pour ne pas être totalement incohérents avec les données existantes.

Le mode de fonctionnement

L'équipement de microscopie électronique à balayage permet d'obtenir des images en niveau de gris des structures résines présentes sur la plaque de silicium. Ces images auront déjà été préalablement traitées par l'ordinateur de l'équipement pour fournir à l'utilisateur des images de qualité. Par la suite, certaines de ces images seront traitées à nouveau par un logiciel dédié afin d'extraire les dimensions numériques des motifs imprimés dans la résine. Ainsi, lorsque l'on souhaite utiliser cet équipement, il est nécessaire de réaliser ce qu'on appelle une recette de mesures, qui va contenir un certain nombre de paramètres ou d'informations que l'on peut classer en deux parties. Il y a d'abord les paramètres de l'équipement à sélectionner pour l'imagerie des structures, c'est à dire la tension du faisceau, le sens du balayage, le grossissement, les coordonnées des structures à mesurer, etc. Ensuite il y a les paramètres d'extraction des dimensions qui ne sont utilisés qu'après l'obtention de l'image comme le type de mesure ligne/espace, le type de signal à utiliser, le seuil du signal pour l'extraction de la dimension, le nombre et la position des points de mesure, etc. Les premiers paramètres décrits doivent être fixés avant l'utilisation de l'équipement. Les seconds pourront être modifiés puisqu'ils ne modifient pas l'image finale. Même si techniquement cela reste assez compliqué, c'est ce que nous avons fait pour comparer différents paramètres d'extraction des dimensions.

Les paramètres d'imageries

Les premiers paramètres à fixer sont donc ceux de l'imagerie. Ici les effets d'empilement ne nécessitent pas de protocole spécifique, nous suivons les recommandations. La tension du faisceau d'électrons est réglée par rapport au type de résine utilisée. Plus elle est grande et meilleure est la résolution, mais une tension trop importante peut dégrader la résine au moment de la mesure. La direction du balayage du faisceau s'effectue perpendiculairement au contour de résine que l'on cherche à mesurer pour une meilleure résolution. Le grossissement est généralement de 120000.

Les paramètres de traitement d'images

C'est une fois les images en main que notre protocole diffère de celui existant. A partir d'une image fournie par le microscope électronique à balayage, nous souhaitons obtenir la dimension du motif considéré. Il s'agit donc dans ce cas de fixer les paramètres d'obtention de cette dimension à savoir, le sens de recherche des transitions entre la présence et l'absence de la résine, le signal à utiliser pour l'extraction, l'intensité lumineuse ou sa dérivée, et le niveau du seuil d'extraction de la dimension sur ce signal. D'autres paramètres réglables ont été laissés par défaut comme par exemple le nombre de points de mesure pour un motif, l'espacement entre ces points, etc. Par exemple, la largeur d'une ligne sera déterminée par la moyenne d'une dizaine de mesures le long de cette ligne :

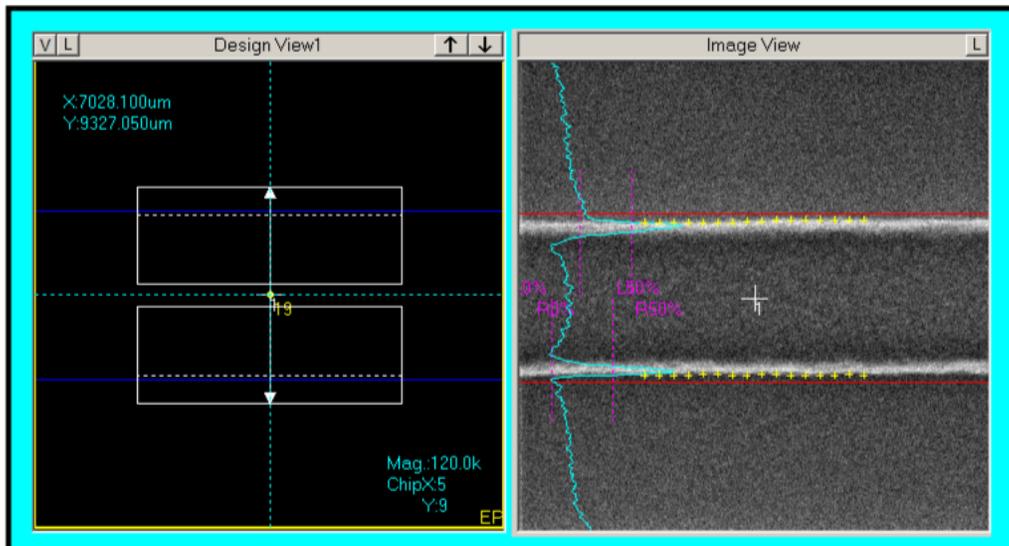


FIGURE 4.9 – Mesures de la dimension d'une ligne de résine

Le premier paramètre cité est donc le sens de recherche de la transition. En effet, par défaut le logiciel propose de partir de l'extérieur de la résine photosensible pour aller vers l'intérieur. Ainsi si on considère deux motifs, une ligne et un espace résine, centrés sur l'image comme sur la figure précédente, la détection de la transition se fera en partant des bords de l'image vers le centre pour une ligne de résine, du centre vers les bords pour un espace. Or, si les mesures de structures test se font sur des substrats uniformes pour les modèles et si beaucoup de niveaux de photolithographie se font sur un empilement comportant une couche anti-reflet sous la résine, dans le cadre de cette thèse sur les effets d'empilement nous travaillons avec des substrats non-uniformes sans couche anti-reflet. Ainsi, les motifs présents sous la résine photosensible peuvent perturber la détection des arrêtes du motif résine. Ce phénomène n'a pas d'impact sur la valeur de la dimension obtenue après traitement de l'image mais a deux impacts négatifs. Le premier, il remet en question l'automatisation du système de traitement des images, ce qui est problématique quand on gère plusieurs dizaines de milliers de mesures. Le second est qu'il peut rendre impossible la détection d'une arrête. Par conséquent, nous avons choisi de rechercher les transitions de l'intérieur de la résine vers l'extérieur,

comme sur l'image de gauche de la figure précédente. Concernant le type de signal à utiliser, c'est à dire le signal d'intensité lui-même ou sa dérivée, nos études ont montré que l'utilisation du signal dérivée donnait des résultats très instables sur l'ensemble des structures test, nous avons donc opté pour le traitement à partir du signal d'intensité des niveaux de gris de l'image. Nous nous proposons d'illustrer un dernier exemple avec la valeur du seuil d'extraction des dimensions. Lorsque nous disposons d'une image électronique, pour chaque point de mesure sélectionné, l'intensité est tracée le long d'une ligne traversant perpendiculairement ce point. Les valeurs maximale et minimale de cette intensité en niveau de gris sont détectées. On parcourt alors l'intensité, dans le sens d'extraction sélectionné, jusqu'à atteindre un niveau d'intensité fixé par la valeur du seuil (par exemple 50%). A cet endroit, on estime avoir trouvé le flanc de la résine. L'image ci-dessous donne trois exemples :

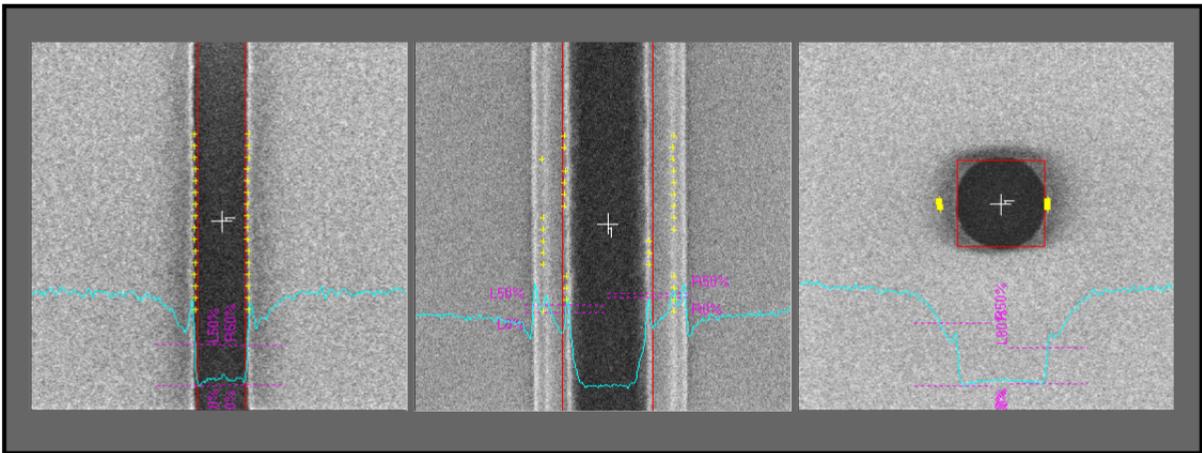


FIGURE 4.10 – Extraction des dimensions en fonction du seuil

Cette image donne trois exemples de tracé de profil d'intensité. L'image de gauche donne l'extraction d'une ligne de résine sans aucune difficulté avec un seuil à 50%. L'image du milieu montre que les éléments situés sous la résine, ici du polysilicium, font varier le profil d'intensité et qu'une partie des points de mesure ont capturé l'élément de polysilicium sous la résine. L'image de droite montre une situation que j'ai rencontré assez souvent. On distingue clairement une sorte d'ombre sur l'image qui va perturber le signal. Nous avons volontairement fixé un seuil différent à gauche et à droite du trou de résine. Avec un seuil à 50% à droite nous capturons bien le flanc de la résine mais pas avec le seuil à 80% à gauche. Nous avons étudié l'impact de l'inversion du contraste mais les résultats sont très similaires.

Notre philosophie

Résumons simplement les idées que nous avons développées dans cette partie. Un protocole de mesure pour l'imagerie électronique à balayage est composé de deux types de paramètres, ceux du microscope facile à régler et ceux du traitement d'image qui nécessitent réflexions. Ce que nous souhaitons faire dans ces travaux expérimentaux, c'est travailler avec les effets d'empilement. Or, nous l'avons évoqué précédemment,

ces effets sont mis en évidence grâce à des comparaisons de structures avec un motif résine identique sur des empilements différents. Attention, nous ne sommes pas en train d'affirmer que nous pouvons nous affranchir du mode de mesure par soustraction de structures test (j'ai pu vérifier que c'est malheureusement faux et c'est ce qui nous a permis d'éliminer certains modes de mesure). Notre philosophie a donc été la suivante : nous avons utilisé notre première campagne de mesure pour étudier ces protocoles, puis nous avons sélectionné quelques protocoles évalués sur environ 400 à 500 structures. Un protocole peut ne rien renvoyer d'une image, ou pire, renvoyer une valeur erronée comme dans les exemples illustrés figure 4.10 sans que nous le détections. Nous avons donc sélectionné le protocole ayant le meilleur comportement sur ces critères.

Ainsi, nous travaillons avec le signal d'intensité direct car c'est le mode le plus stable et le plus physique, sans inversion de profil qui limite l'obtention de résultats numériques (pas de valeurs renvoyées dans certains cas). Nous recherchons les flancs de la résine depuis l'intérieur vers l'extérieur de la résine. Nous avons fixé le seuil d'extraction à 50% car il permet d'éliminer les bruits de type ombres et niveaux inférieurs qui sont capturés avec des seuils à 80% ou 20%. De plus, ce 50% suit une logique physique. Les effets d'empilement ont tendance à dégrader les flancs de la résine comme nous le verrons dans le prochain paragraphe et il ne suffit pas de détecter de la résine pour que la problématique de protection/déprotection d'éléments sous la résine soit respectée. En effet, si l'épaisseur de résine est trop fine, elle ne pourra pas complètement bloquer l'implantation ionique. Ce 50% c'est donc aussi l'assurance de ne pas extraire les dimensions des motifs trop près de ses extrémités.

Une dernière réflexion s'impose. Pourquoi vouloir absolument déterminer un protocole unique ? En effet, il nous est malheureusement arrivé de devoir abandonner le protocole que nous avons nous même établi dans des études complémentaires ou le contraste était tel qu'il n'y avait pas moyen d'extraire des dimensions quelconques. Et bien cette cohérence nous devons la maintenir pour plusieurs raisons. La première, bien entendu, pour notre interprétation des mécanismes physiques des effets d'empilement. La seconde pour notre rapport aux incertitudes de mesures. Il ne faut pas oublier que la mesure absolue n'existe pas. L'étape de photolithographie qui a eu lieu, les étapes précédentes du procédé, les méthodes de mesures des épaisseurs des empilements, toutes sont remplies d'incertitudes jusqu'à l'obtention même des images électroniques. Nous verrons dans le prochain chapitre que nous soupçonnons fortement l'existence de variabilité de certaines épaisseurs plaque à plaque voir sur une même plaque. Comment travailler avec ces difficultés si de plus nos données n'ont pas été construites sur une base commune ? Et enfin la dernière, c'est notre relation aux fournisseurs qui vont utiliser ces données pour bâtir des modèles de prise en compte des effets d'empilement. Ils ne recevront de notre part qu'un fichier contenant les motifs dessinés sur le réticule et un fichier de données avec les dimensions mesurées des motifs correspondants. Ils n'ont pas conscience de ces difficultés et auront comme premier réflexe de vérifier la consistance des données par des simulations et potentiellement par comparaison avec les précédentes. Si le mode de mesure change, il leur sera naturel de remettre en question mes groupes de données, ce qui peut engendrer une perte de temps et de confiance considérable. Nous venons d'aborder notre relation aux incertitudes de mesures, nous allons développer quelque peu nos réflexions sur ce sujet dans le prochain paragraphe.

4.3.2 Incertitudes et bruit de mesures

Nous attaquons ici un paragraphe indispensable à tout chapitre d'études expérimentales. En plus des incertitudes de mesures que nous avons déjà fait remonter dans le paragraphe précédent, nous allons aborder d'autres sources potentielles d'incertitudes. La figure ci-dessous comporte un ensemble d'images obtenues par microscopie électronique à balayage qui vont servir à notre réflexion :

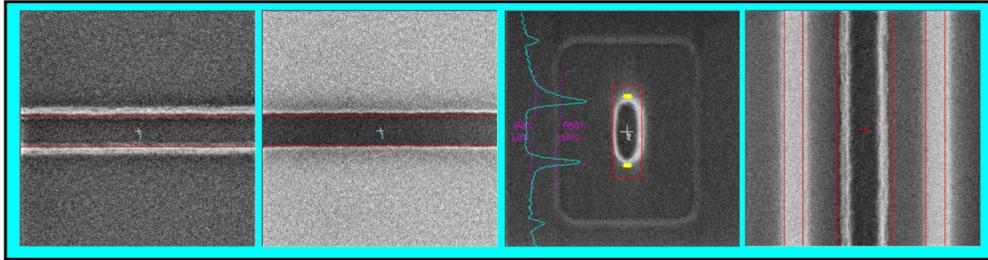


FIGURE 4.11 – Exemple de structures mesurées par microscopie électronique à balayage

Observons tout d'abord les deux premières images ensemble. Elles correspondent toutes les deux à une même tranchée de résine mais sur deux substrats uniformes différents. C'est donc l'illustration, par différence, de l'effet substrat. On peut commencer par constater que les flancs de la résine ne sont pas aussi nets sur la première image que sur la seconde. L'effet de substrat dégrade le flanc de la résine. On retrouve cette dégradation sur les flancs de la ligne de résine de la quatrième image. Ce phénomène génère déjà une incertitude sur l'endroit où nous devons seuiller le profil d'intensité. Revenons sur les deux premières images. Le contraste est totalement différent. Dans quelle mesure cela a-t-il un impact sur le traitement de l'image et l'extraction de la dimension ? Sur la troisième image, nous avons un plot de résine apparemment sur de la silice. Mais un plot de silicium est caché sous la résine et brille au microscope. Cela perturbe grandement l'extraction de dimensions. Ces phénomènes, au-delà de la réflexion sur le traitement de l'image, lèvent des questions sur l'impact des effets d'empilement sur le faisceau d'électrons du microscope électronique à balayage. En effet, les deux types de substrat les plus utilisés dans notre problème sont la silice très bon isolant électronique et le silicium dopé, très bon conducteur électrique. Les éléments parfois en forte surbrillance sont des éléments de silicium conducteur, alors que la résine et la silice apparaissent généralement sombres.

Dans le cadre de la construction d'un modèle classique pour le procédé de photolithographie, c'est à dire sans prise en compte des effets d'empilement, les mesures de calibration proviennent d'un seul substrat. On fait le choix, de calibrer le modèle soit sur silice, soit sur silicium. De ce fait, si on suppose que le contraste induit une source d'erreur systématique, on peut supposer qu'elle est automatiquement prise en compte par le modèle.

En incertitudes de mesure, on classe souvent leurs origines selon le diagramme des cinq M, avec le moyen, la méthode, la matière, le milieu et la main d'œuvre. Les circuits intégrés sont réalisés dans des salles ultra-propres dont les paramètres de température et de pression sont contrôlés, et une bonne partie du procédé est automatisée, ce qui nous permet de supposer que les incertitudes liées à la main d'œuvre et au milieu sont faibles. La méthode correspond à ce que nous avons évoqué pendant le paragraphe précédent

avec le protocole. Ici nous remettons en question le moyen et la matière. L'imagerie par microscopie électronique à balayage a déjà sa propre incertitude, et la matière ajoute de l'incertitude de par la conductivité électrique des matériaux et le phénomène de charge des matériaux (faisceau d'électrons dans un matériau isolant). Ici se trouve une perspective importante à nos travaux de thèse, dans l'étude des effets d'empilement sur la mesure par microscopie électronique à balayage. Il pourrait être intéressant de corrélérer ces mesures avec un autre type de mesure par exemple microscopie électronique à transmission ou microscopie à force atomique et de voir si on peut apporter un facteur de correction au mode de mesure actuel. Ces modes de mesure pourraient également apporter des informations sur le profil tri-dimensionnel de la résine. Il n'est cependant pas envisageable de remplacer le mode de mesure actuel compte tenu des ressources matérielles et temporelles que cela demanderait.

4.3.3 Le traitement des données

Le traitement des données a fait l'objet d'une attention toute particulière pendant la première année de cette thèse avant un début de simplification, notamment pour la construction des groupes de données mesurées cohérents et exploitables. En effet, il m'a paru dangereux de ne pas m'assurer que les lois de linéarité de la dose ou des lois de variations des motifs en fonction du focus que nous supposions étaient toujours valables. De plus, compte-tenu de la complexité des effets observés, comment aurait-on pu s'assurer qu'un point de mesure soit une erreur ou au contraire un point de mesure fiable? De ce fait, j'ai choisi de construire mes premiers groupes de données à partir d'un nombre de mesures plus conséquent. Pour donner un ordre d'idée, la deuxième campagne de mesure des effets d'empilement, qui a fait suite aux premières observations et qui devait servir de point de départ pour les projets de modélisation avec les fournisseurs, s'élève à plus de 30000 mesures. Les prévisions que j'avais établies concernant ces mesures annonçaient déjà 20000 mesures, le dernier tiers donnant suite à des problèmes de mesure au microscope électronique à balayage ou à des demandes de mesures complémentaires. De ce fait, je n'ai jamais envisager de vérifier chacune des données une à une.

Alignement et première vérification

La première étape de traitement des images est l'alignement, manuel et image par image, des motifs avec le dessin du circuit. Le microscope a pu légèrement se décaler, il faut donc recentrer l'image pour préparer la mesure. Cette première étape permet d'éliminer toutes les images inexploitables, soit parce que l'équipement n'a pas réussi à s'aligner ou focaliser sur le motif, soit parce que la résine a disparu ou est tombée suite à un effet de dose, de focus, ou d'empilement. Mais à cette étape rien n'assure que l'extraction d'une valeur numérique de mesure va bien se passer.

Interpolation des données et seconde vérification

C'est dans ce paragraphe que nous allons développer ce que nous avons nommé "la construction de groupes de données fiables et exploitables". Nous avons maintenant aligné toutes les images et éliminé les images défectueuses. Nous avons lancé les mesures mais nous ne savons pas lesquelles ont bien réussi ou non. A partir de là, nous avons utilisé deux modes de fonctionnement, tout simplement en fonction des plaques disponibles. La première campagne de mesure s'est effectuée à partir d'une plaque de silicium exposée pour l'étape de photolithographie de l'implantation des sources et drains, technologie standard substrat épais, à condition nominale. C'est à dire que sur cette plaque se trouvent des puces identiques et toutes exposées à la même condition de dose et de focus. Nous avons choisi d'effectuer cinq mesures à travers la plaque pour chaque structure, de calculer la moyenne et l'écart type sur ces cinq structures et d'aller inspecter uniquement celles qui se détachaient de la tendance générale. Ainsi, nous avons terminé ce travail par la création d'un groupe de donnée de 542 structures qui ne sont pas de vraies structures mesurées mais la moyenne arithmétique de cinq valeurs expérimentales. Le tableau ci-dessous résume les résultats statistiques obtenus :

Type de structures	nombre	moyenne des écart-types	Ecart-type maximal
Silicium 1D	64	1,1 nm	2,1 nm
Silicium 2D	32	2,0 nm	5,0 nm
Silice 1D	64	3,9 nm	6,9 nm
Silice 2D	32	6,8 nm	13,5 nm

TABLE 4.3 – Statistiques de dispersion des valeurs de dimensions expérimentales

Pour simplifier la réflexion, ce tableau contient les résultats des structures sur substrat uniforme. J'ai volontairement classé les types de structures du moins sensible au plus sensible à l'empilement. Le substrat de silicium est toujours le moins sensible. Le matériau est considéré comme semi-infini et seule une réflexion existe à l'interface résine/silicium avec apparition d'ondes stationnaires dans la résine. Ensuite viennent les structures bi-dimensionnelles du même substrat puisqu'affectées dans les deux dimensions. Le substrat de silice étant lui même déposé sur un substrat de silicium, cela génère une interface de réflexion supplémentaire et les ondes stationnaires qui se forment dans le film mince de silice sont importantes. Ainsi viennent en 3ème et 4ème position les structures sur silice à une et deux dimensions. Notez-que la moyenne des écart-types comme le maximum des écart-types sont de ce fait eux aussi classés dans l'ordre croissant. C'est l'effet d'empilement qui génère une variabilité dans les structures mesurées. Ceci consitue la deuxième validation du groupe de données.

La deuxième campagne, effectuée sur la technologie FDSOI fut constituée de plus de 20000 mesures (ou plutôt "prise de vue", notez que cela comprend des structures qui ne sont faites que pour l'évaluation qualitative des effets d'empilement, le terme mesurer c'est mettre une valeur numérique sur une grandeur physique, ici la longueur). Nous avons fait un choix différent pour cette campagne en travaillant sur une plaque exposée

à plusieurs conditions de dose et de focus. Les conditions de focus ont été réalisées dans l'objectif d'obtenir des informations sur les décalages du paramètre de meilleur focus et surtout de calibrer des modèles optiques. Mais les conditions de dose ont eu pour objectif de nous donner plus d'informations sur le comportement des structures avec les effets d'empilement. En fait, nous avons remplacé la moyenne arithmétique de la première campagne par une interpolation linéaire à travers la dose. Chaque structure a été mesurée sous sept conditions de dose et une interpolation linéaire a été effectuée. A l'aide du coefficient de corrélation de cette droite par rapport aux mesures, nous avons éliminé les mesures jusqu'à l'obtention d'un coefficient de corrélation supérieur à 90%. Nous avons conservé au minimum cinq points pour chaque interpolation et dans le cas où trop de mesures étaient douteuses, nous sommes allés les vérifier et les corriger dans la plupart des cas. Enfin, la valeur numérique de la dimension du motif est extraite à partir de la valeur de la dose en production. Le tableau ci-dessous donne les résultats pour un groupe de structures dans la région SOI :

Type de structures	coefficient de corrélation minimal
Silicium 1D	0,93
Silicium 2D	0,90
Silice 1D	0,96
Silice 2D	0,90

TABLE 4.4 – Coefficients de corrélation minimal des types de structures en fonction de la dose pour une interpolation linéaire

Grâce au traitement des données appliqué ici, on a construit des groupes de données fiables. Bon nombre de mesures ont été remises en question mais la robustesse de cette construction nous a permis dans la plupart des cas de confirmer rapidement la validité de la structure. Nous avons même essayé de travailler avec une interpolation des courbes de Bossung pour la calibration des modèles optiques mais ce fut une erreur car le mode d'interpolation n'étant pas identique cela a mené à quelques inconsistances dans les données. Finalement, pour faire un retour sur le paragraphe des incertitudes de mesure, ce protocole nous permet de gérer les erreurs accidentelles.

Etude des phénomènes physiques et troisième vérification

Nous avons maintenant en main des groupes de données fiables et exploitables. L'étude des effets d'empilement qui a été effectuée par la suite peut aussi être considérée comme une nouvelle vérification des données.

Retour fournisseur, dernière vérification

Finalement nous arrivons ici à une étape de validation importante. Les fournisseurs vont tenter de modéliser les effets mis en évidence dans les groupes de données et remettre en question certaines données. Cette étape est non négligeable dans la validation des groupes de données. Si la robustesse de notre construction nous a permis d'éliminer dès le départ les données erronées, cette dernière étape de validation, couplée avec la construction des données, nous a permis de détecter d'autres erreurs difficiles à isoler autrement.

Simplification par l'expérience

Finalement, rassurons nous, il n'est pas question d'effectuer ces travaux à chaque campagne de mesure. Grâce à ces deux premières campagnes, nous avons acquis l'expérience suffisante sur les effets d'empilement pour nous affranchir de toutes ces étapes de construction des données. Nous avons pu confirmer que la présence d'effets d'empilement ne changeait pas fondamentalement le comportement des structures en fonction de la dose ou du focus d'exposition. Les groupes de données qui ont été formés à partir des campagnes suivantes, reposent bien sur des structures mesurées directement et non mathématiquement construites à partir d'autres structures mesurées. Généralement, dépendant du temps de mesure disponible, les mesures sont maintenant effectuées à deux ou trois doses pour avoir un moyen de contrôle de nos données en cas de doute.

4.4 La caractérisation des effets d'empilement

Dans cette section, nous allons étudier le comportement des effets d'empilement à travers les résultats de mesure que nous avons effectué. Dans un premier temps, nous allons discuter de la manière dont nous traitons ces effets puis nous aborderons les effets par thème, effets de substrat, de transition puis effets combinés. Les effets sont similaires pour la technologie standard ou la technologie silicium sur isolant, nous nous limiterons donc à un résultat à chaque fois.

4.4.1 L'erreur effet d'empilement

Historiquement, nous avons utilisé deux moyens pour l'étude des effets d'empilement. Le premier est l'utilisation du substrat silicium uniforme comme référence absolue et pour deux raisons. Tout d'abord on peut voir cet empilement comme celui de base. Comme nous l'avons évoqué précédemment, le silicium du substrat est considéré comme semi-infini et possède une constante d'absorption importante, on peut donc affirmer qu'aucun signal ayant pénétré le silicium ne peut être récupéré au niveau de la résine. Ensuite, les modèles réalisés sur l'étape d'implantation des sources et drains ont été calibrés sur ce substrat. En supposant que le modèle soit suffisamment précis, l'écart entre la simulation qui n'a pas conscience du changement d'empilement et les données mesurées sont représentatives des effets d'empilement. Le second, et le plus intéressant,

est de travailler par différence de structures qui ne sont distinctes que d'un effet d'empilement, même si nous verrons que ce n'est pas si simple de totalement décorrélérer les différents effets.

Voici un exemple d'illustration de l'importance du travail par différence de structures :

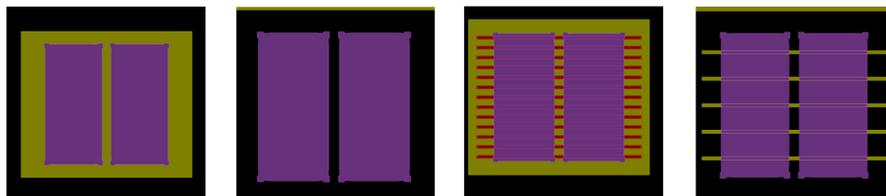


FIGURE 4.12 – Motif circuit pour une ligne de résine sur plusieurs substrats. Silicium en jaune, polysilicium en rouge, silice en noir, complémentaire de la résine en violet.

Nous vous proposons sur l'image ci-dessus, quatre empilements différents sur lesquels vient se placer une ligne de résine. Quand on observe les structures sur réseau, on pense naturellement que ce sont des effets de type transition. Et bien pas nécessairement. Observons maintenant les deux graphiques ci-dessous :

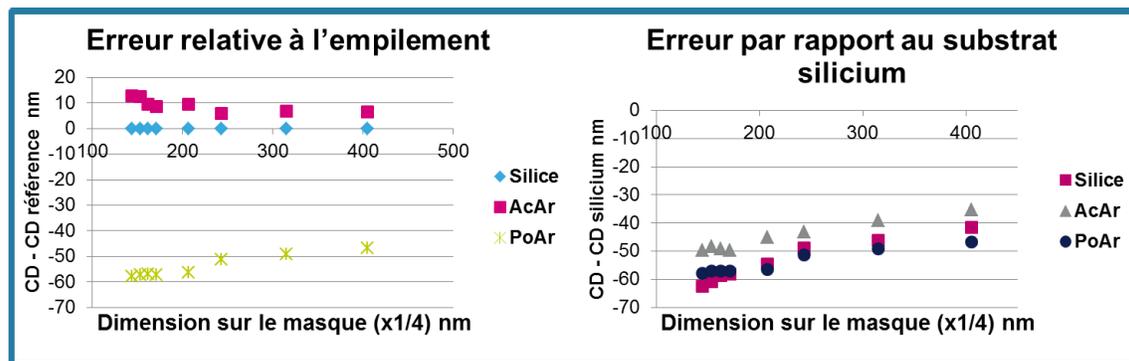


FIGURE 4.13 – Tracé de l'erreur absolue à droite et de l'erreur d'empilement à gauche.

Nous proposons ici deux types d'erreurs. La première, appelée erreur absolue, est définie par la différence des dimensions d'un motif résine sur l'empilement étudié et sur le substrat silicium qui sert de référence. La seconde, appelée erreur relative, est définie par la différence des dimensions d'un motif résine sur deux empilements qui ne diffèrent que d'un élément particulier. Par exemple, l'erreur absolue associée à l'empilement "réseau de silicium/silice" compare cet empilement au substrat silicium, tandis que l'erreur relative compare cet empilement au substrat de silice car il ne diffère de l'empilement étudié que par la présence du réseau de silicium.

Intéressons nous aux deux structures d'empilement contenant des réseaux. Si on regarde les deux courbes d'erreur correspondantes (AcAr pour Active array et PoAr pour Poly array) sur le graphique de l'erreur absolue à droite, on se rend compte que la ligne est très affectée par l'empilement. L'écart avec la ligne sur silicium est de l'ordre de 50 nm. Cependant, notez que sur ce même graphique, une troisième courbe semble suivre la même tendance, il s'agit de l'effet de substrat de silice. Maintenant observons ces mêmes éléments sur le graphique de gauche, c'est à dire celui de l'erreur relative à

l'empilement. Une des trois courbes est remontée près de l'axe horizontale, il s'agit de la structure sur réseau Silice/Silicium. Pour cette structure, le phénomène d'empilement prépondérant n'est pas la présence de transition Silicium/Silice, mais l'effet de substrat de silice. Cependant, la structure avec l'empilement en réseau de Polysilicium/Silicium conserve une erreur importante. C'est bien la présence du polysilicium qui génère cette dégradation importante. Cet exercice a pour objectif de montrer que le travail par différence de structures est le plus correct même si on utilise souvent le substrat silicium comme référence absolue.

4.4.2 L'effet de substrat

Illustrons maintenant l'effet de substrat de la silice. Nous allons travailler à l'étape de photolithographie à l'implantation des sources et drains avec la technologie FDSOI car l'effet y est plus important et cela va aussi nous permettre de faire remonter une erreur très importante dans la conception des structures test.

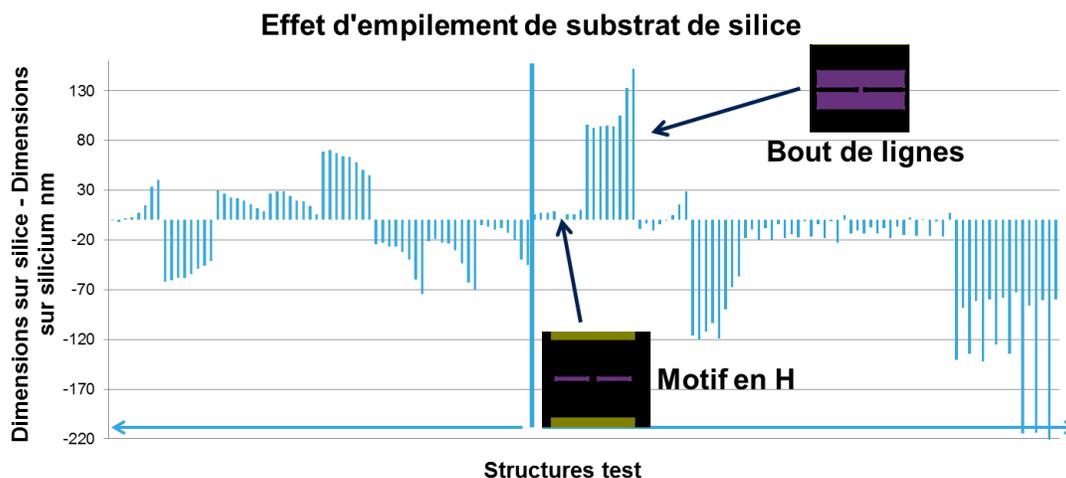


FIGURE 4.14 – Effet de substrat de silice à l'étape de photolithographie des sources et drains en technologie FDSOI. Zone implantée en violet, complémentaire de la résine.

Nous avons tracé sur ce graphique l'erreur relative entre les structures sur substrat silicium et sur substrat de silice pour un ensemble de structures. Interprétons ces résultats. Tout d'abord, notez que les erreurs semblent se regrouper en blocs d'alternance positive et négative. Un bloc correspond à un motif unique décliné en plusieurs dimensions sur le réticule. L'alternance du signe de l'erreur est due à la mesure de la résine ou de l'espace entre la résine. L'effet de substrat s'exprime comme une surexposition lumineuse de la résine, donc moins de résine à l'arrivée. Une erreur positive indique la mesure d'un espace, une erreur négative indique la mesure de la résine. Ainsi, ce graphique vous propose les motifs uni-dimensionnels suivants : huit tranchées de résine, puis huit lignes, trois blocs de réseaux d'espaces puis trois blocs de réseaux de lignes. Notez aussi l'alternance, très marquée sur les structures bi-dimensionnelles, d'erreurs très importantes et d'erreurs très faibles. Ici nous mettons en évidence une caractéristique fondamentale des effets d'empilement étudiés dans ces travaux doctoraux, l'effet d'empilement est la réflexion, réfraction, diffraction de l'exposition lumineuse directe. En effet, les structures à deux dimensions proposées sur ce graphique sont des motifs en

H, peu d'exposition directe, des bouts de lignes, grande exposition directe, trous dans la résine, plots de résine, trous rectangulaires, plots rectangulaires. N'oublions pas qu'au moment de l'exposition, la résine est présente sur toute la plaque. Les effets d'empilement sont importants sous les ouvertures du réticule et faibles là où la lumière est absorbée. Ceci est fondamental car de nombreux moyens de prise en compte des effets d'empilement sont basés sur ce principe, nous le verrons dans le prochain chapitre.

Voici les courbes de Bossung pour une structure ligne de résine sur les deux substrats :

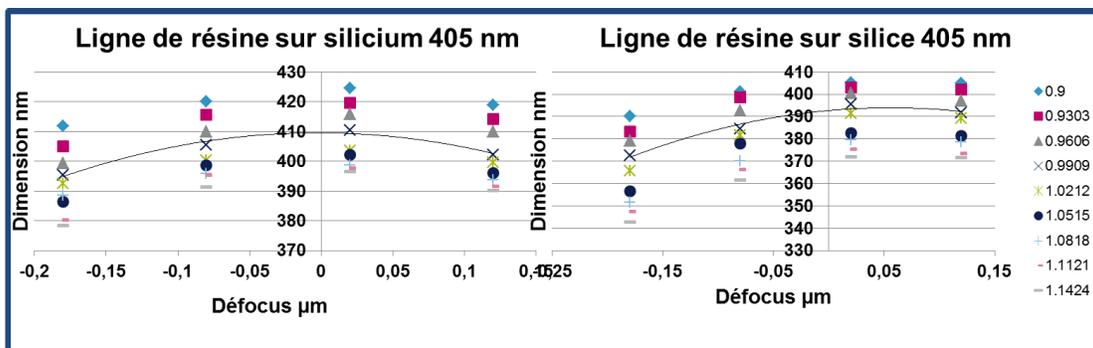


FIGURE 4.15 – Courbes de Bossung d'une ligne de résine sur les deux substrats uni-formes silicium et silice

On voit bien ici que le maximum de la courbe tracée en noir est décalé de plusieurs dizaines de nanomètres sur l'axe du focus. En fait, ce décalage est dépendant du motif étudié. Le décalage du paramètre de meilleur focus vient de la différence de réponse optique de l'empilement considéré. Les ondes stationnaires qui apparaissent dans le film de silice varient avec l'exposition lumineuse directe, donc le motif du réticule.

4.4.3 L'effet de transition entre deux matériaux

L'effet de transition est un effet de forte amplitude et très complexe de part sa dépendance non-linéaire à la distance qui sépare la transition du flanc de la résine (ou plus exactement de l'arrêt du motif présent sur le réticule car encore une fois, la résine est déposée pleine plaque au moment de l'exposition). La courbe figure 4.16 nous en donne une représentation pour une technologie standard à substrat épais.

Sur cette courbe, nous traçons la dimension d'une ligne de résine perturbée symétriquement par une transition silicium/silice de chaque côté. La courbe horizontale correspond à la structure de référence, c'est à dire sans les transitions. Dans un premier temps, observons l'allure générale de la courbe. Nous commençons avec des valeurs nettement au-delà de la structure de référence. Ensuite nous arrivons dans une deuxième partie de la courbe où la dimension de la ligne de résine diminue fortement jusqu'à disparaître dans le cercle rouge, puis la ligne réapparaît, sa dimension augmente mais notons qu'elle ne remonte pas à la valeur de référence.

La partie de la courbe au dessus de la référence est très intéressante. Il s'agit d'un effet combiné. Malheureusement, il est impossible de mettre en évidence le phénomène de transition sans utiliser deux matériaux et donc en s'affranchissant de l'effet substrat. Lorsque les deux lignes de silicium extérieures se rapprochent de la ligne de résine, elles

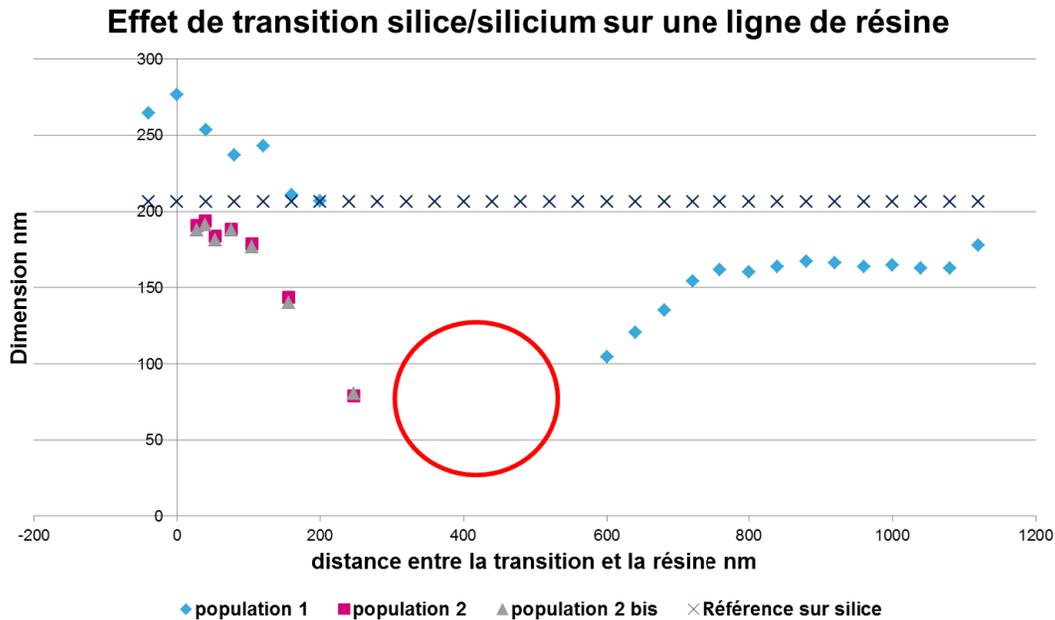


FIGURE 4.16 – Effet de substrat de silice à l'étape de photolithographie des sources et drains en technologie FDSOI

la protègent de l'effet du substrat de la silice. Ce phénomène est le premier effet combiné que nous avons détecté dans ces travaux de thèse et il est particulièrement gênant au sens où les premiers modèles qui ont été construits par les fournisseurs ont été mis à défaut sur des lignes de résine sur silice. Le modèle prédisait alors une surexposition de la ligne de résine tandis qu'une ligne de silicium passant à proximité annulait cet effet. Le modèle prédisait ainsi un effet d'empilement inexistant. A noter qu'une transition polysilicium/silicium ne met pas en évidence un masquage de l'effet substrat alors qu'une transition polysilicium/silice y est soumise.

La dernière partie de la courbe nous pose encore actuellement des problèmes. Nous n'arrivons pas à remonter jusqu'à la référence, alors que les modèles généralement y arrivent. Nous avons une explication plausible à cela. La réalisation des tranchées d'isolation de silice s'effectue par gravure des tranchées dans le silicium, remplissage par la silice, puis par polissage mécanico-chimique en surface. La profondeur de gravure des tranchées dépend de la largeur de ces tranchées et le polissage peut creuser les surfaces de silice trop importantes. Nous faisons remonter ici un problème de topographie. Nous pensons que l'épaisseur de silice varie de sorte que la ligne de résine sur le substrat uniforme de silice est sur une épaisseur de silice différente des structures avec transitions, même si elles sont lointaines. Aujourd'hui, nous n'avons pas encore trouvé de réponse à cette question mais j'ai déjà anticipé en réalisant de nouvelles structures qui poussent les transitions beaucoup plus loin pour une mesure par microscopie électronique à balayage et j'ai également réalisé des mire pour des mesures en scattérométrie. En bref, des réseaux de silice/silicium ont été réalisés avec différents espacements. La scattérométrie est une technique de mesure optique qui peut nous permettre de remonter aux informations d'épaisseurs des matériaux présents sur la plaque. Nous pourrions ainsi confirmer ou infirmer nos hypothèses. Des réticules avec ces structures sont actuellement disponibles, il nous faut maintenant obtenir une plaque et faire les mesures.

Enfin, sur ce graphique vous pouvez voir deux populations de données, la courbe bleue que nous étudions dans ce paragraphe et d'autres points. Il s'agit des premières mesures que nous avons faites. Nous étions loin de penser que ce phénomène pouvait avoir une longueur d'interaction aussi importante. Notons qu'il y a un écart conséquent entre ses deux populations et aujourd'hui nous n'avons pas d'autres explications que l'existence d'une variabilité plaque à plaque, probablement des épaisseurs de matériaux.

Revenons maintenant quelques instants sur l'effet substrat. Nous avons dit précédemment avoir commis une erreur de conception et nous venons de dire que nous ne pensions pas que l'effet de transition pouvait avoir une telle longueur d'interaction.... Lorsque nous concevons nos motifs, nous les disposons en lignes et colonnes que nous plaçons suffisamment loin les unes de autres. Pour être plus exact, les structures sont disposées sur deux lignes, une pour le motif lui-même et l'autre pour le motif d'adressage qui permet au microscope de trouver la bonne région de mesure. Or, les problématiques de topographie que nous supposons pour nos structures test, existent à l'échelle des dessins de circuits. Il nous est donc interdit de dessiner des structures sans respecter une densité de silicium présent sur plaque. Ainsi, lorsque nous étudions une structure sur silice, nous plaçons le motif d'adressage sur silicium, et ainsi une transition apparaît, comme sur la figure suivante 4.17

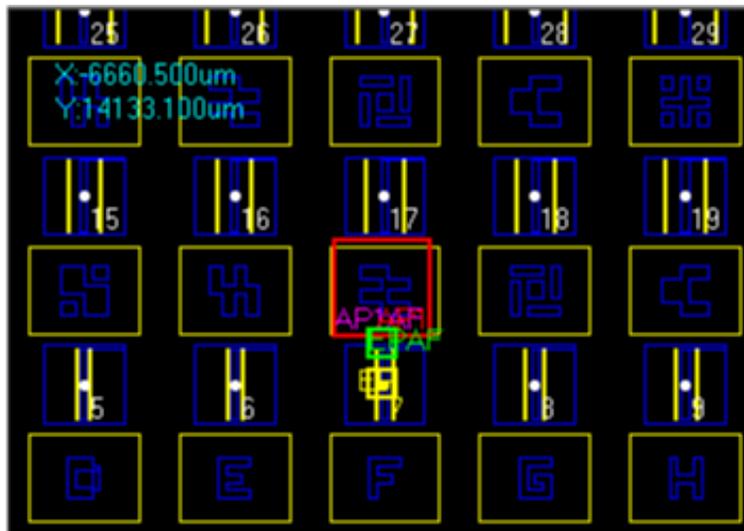


FIGURE 4.17 – Disposition des structures test sur le réticule

Dans la plupart des cas, nous mesurons nos structures dans le sens des lignes, ainsi cette transition qui est dans le sens des colonnes ne nous affecte pas. Reprenons la figure 4.14 des effets de substrat et observons les deux derniers blocs de structures. On s'aperçoit qu'une structure sur deux est plus affectée que l'autre. Et bien pour la première (et dernière) fois, nous avons effectué des mesures dans les deux directions. Nos fournisseurs ont construit des modèles qui géraient assez bien l'ensemble des structures test sauf celles-ci, c'est ce qui nous a permis de découvrir cette erreur.

Un mot tout de même concernant l'impact de la transition entre les régions SOI et NOSOI d'une plaque de technologie silicium sur isolant. Nous avons réalisé des mesures pour mettre en évidence des effets de transition mais nous n'avons absolument rien trouvé. Deux possibilités peuvent l'expliquer. La première, tout simplement, c'est qu'il

n'y a rien à voir. La marche entre les deux régions est d'une dimension nettement inférieure à la longueur d'onde de la source, ce qui peut expliquer qu'il n'y ait pas de phénomène fort. Ensuite, on m'a demandé lors des premières mesures de rester très proche des structures du produit qui sont principalement constituées de trous. C'est à dire que des zones NOSOI sont gravés localement dans des régions SOI, et nous devons en étudier l'impact sur une ligne à proximité. J'ai déjà conçu des structures uni-dimensionnelles aujourd'hui disponibles sur réticule.

4.4.4 Effets combinés

Attaquons enfin le dernier phénomène important de ce chapitre d'étude expérimentale, la combinaison des effets individuels. Nous avons déjà évoqué ces effets avec l'effet de transition puisqu'il est difficile de décorréler tous les effets. Je vais juste vous proposer une illustration de ses effets grâce au graphique ci-dessous :

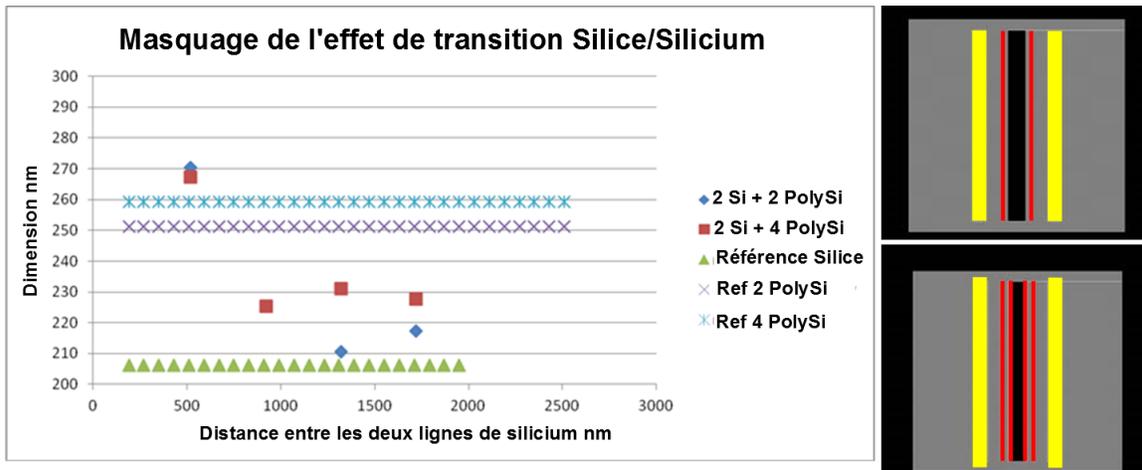


FIGURE 4.18 – Effets combinés entre silicium et polysilicium

On propose ici de faire varier la position de deux transitions silicium/silice symétriquement disposées de part et d'autre d'une ligne de résine, il s'agit de l'étude de base que nous avons décrite plus haut. Mais cette fois faisons l'étude une première fois avec deux éléments de polysilicium au milieu puis une seconde fois avec quatre éléments. Les trois références sont disponibles, ligne sur silice, avec deux éléments de polysilicium ou avec quatre.

Commençons par noter que les deux premiers points sont au-dessus de toutes les références, le silicium protège la ligne contre la totalité des effets. Ensuite, les points sont quasiment tous au-dessus de la référence sur silice alors que cette même situation présentée dans le paragraphe sur l'effet de transition montrait le contraire. Mais tous les points ne sont pas au-dessus de la référence sur silice et c'est ici que se trouve la meilleure manifestation des effets d'empilement. Faisons abstraction de la variation de la position des lignes de silicium et fixons nous au point à 920 nm de distance entre les deux lignes. Remarquons qu'il n'y a pas de point bleu. Nous avons effectué une vérification sur deux autres puces mais pour les trois puces testées, la ligne de résine est bien présente aux points précédent et suivant mais pas à 920 nm. Ainsi, la ligne existe sur silice, c'est la référence en vert. Si on place les lignes de silicium à cette distance, la

ligne de résine disparaît. Ajoutons alors deux éléments de polysilicium et nous obtenons le point bleu inexistant. Ajoutons à nouveau deux éléments de polysilicium et la ligne apparaît à nouveau. Pour l'anecdote, j'ai réalisé un ensemble de structures grâce à mon expertise sur les effets d'empilement pour faire disparaître et réapparaître la ligne de résine, ce groupe de mesures a été nommé "les structures magiques". Ces structures sont un très bon moyen de vérifier la prise en compte des effets combinés par les modèles fournisseurs.

4.5 Conclusion : l'évaluation systématique

Je vous propose ici une conclusion en trois parties, avec un traditionnel rappel des résultats, la présentation de l'évaluation systématique des effets d'empilement et des perspectives de poursuite de ces travaux très importantes.

L'étude expérimentale des effets d'empilement a commencé immédiatement au démarrage de cette thèse grâce aux mesures qui avaient été faites avant mon arrivée et j'ai commencé la première campagne rapidement en guise de formation. La dynamique entreprise m'a alors immédiatement posé des contraintes de ressources, de temps, d'organisation pour l'obtention des structures à mesurer. Puis de nombreuses questions sont apparues sur le protocole à mettre en place pour la réalisation de ces mesures. À l'aide des premières images obtenues par microscopie électronique à balayage, j'ai étudié l'impact des différents paramètres du traitement d'image pour l'extraction des dimensions des motifs. Ayant éliminé certains modes de fonctionnement ou fixé d'autres pour des raisons techniques comme la détection des flancs de la résine, j'ai comparé les résultats obtenus par plusieurs protocoles avant de fixer mon choix sur celui qui me permettait d'obtenir le plus de structures en sortie. Ces effets d'empilement alors peu connus m'ont naturellement poussé à effectuer un traitement statistique des données, une première fois à l'aide d'une moyenne arithmétique puis par une interpolation linéaire à la dose. Ces modes de construction m'ont permis de construire des groupes de données robustes et fiables, c'est à dire de gérer en un sens une partie des incertitudes de mesures, quelles soient accidentelles ou systématiques. Les effets d'empilement peuvent donc se classer en trois catégories, que sont les effets de substrat, traduits par une surexposition de la résine et un décalage du paramètre de meilleur focus, les effets de transition, exprimés par une dépendance non-linéaire à la distance séparant le motif et la transition, et enfin la combinaison de tous ces effets qui peuvent s'annihiler partiellement ou complètement.

Enfin, l'étude expérimentale n'est pas encore terminée aujourd'hui et j'ai même des structures qui attendent actuellement sur des réticules en production qu'une campagne de mesure soit mise en place. Mais j'ai pu acquérir pendant ces trois années, une forte expertise sur les effets d'empilement. Ces trois années de thèse ont trouvé une bonne conclusion, sur le plan de l'étude expérimentale des effets d'empilement, par la réalisation d'un groupe de structures en quantité limitée systématiquement embarqué sur les réticules des niveaux d'implantation ionique des sources et drains. L'objectif qui m'a été donné lors de cette demande est de pouvoir permettre une évaluation complète des effets d'empilement. La surface limite que l'on m'a donné pour répondre à cet objectif sur plaque de silicium étant légèrement supérieure à mon besoin réel, j'ai complété ces structures par celles qui permettent la calibration des modèles de prise en compte des effets d'empilement des fournisseurs. En conclusion, il existe aujourd'hui et pour

tous les prochains projets à venir, sur les réticules associés, une zone dédiée à l'évaluation indépendante et la calibration de modèle des effets d'empilement à l'étape de photolithographie pour l'implantation des sources et drains. Mais ce n'est pas la seule chose que je laisse derrière moi. Les codes de réalisation des structures, les recettes de mesure et le protocole établi sont d'autant d'éléments qui restent à disposition au sein de STMicroelectronics.

Cependant une ouverture s'impose. Nous avons effectué un grand nombre de mesures pour l'étude des effets d'empilement dont certaines ne sont pas rapportées ici, notamment les tests d'évaluation d'une couche anti-reflet développable sous la résine, l'évaluation des effets sur d'autres niveaux ou encore des mesures d'optimisation de l'épaisseur de la résine en vue de diminuer les effets d'empilement. Mais il reste beaucoup à faire. D'abord il faut effectuer les mesures sur un certain nombre de structures actuellement disponibles. Il y a les mesures par scattérométrie pour l'épaisseur des matériaux constitutifs du substrat et les dernières mesures d'effets de transition avec des transitions beaucoup plus éloignées. Il faut également mener une étude de variabilité plaque à plaque. J'ai également réalisé des structures pour l'évaluation des impacts des étapes d'implantations précédentes à la notre. En effet, l'implantation des sources et drains n'est pas la première implantation du procédé. Or, l'implantation ionique modifie les indices optiques des matériaux sur le substrat, donc sa réponse optique à l'exposition. J'ai réalisé des structures avec des empilements différents uniquement par la présence ou l'absence de l'implantation précédente. Il faudrait également étudier sur la technologie FDSOI l'impact d'un élément d'une région sur l'autre. Puisque l'effet de transition est un effet très longue distance, quel est l'impact d'une transition silicium/silice de la zone SOI sur la zone NOSOI ? Et vice versa ?

Enfin, il faudrait mener une véritable étude de l'impact des effets d'empilement sur la méthode d'imagerie par microscopie électronique à balayage. Il faut coupler ce mode de mesure avec d'autres types de mesures indépendantes de la nature des matériaux de l'empilement, peut-être effectuer des coupes transerves aux plaques, pour observer les empilements étudiés. Par exemple, le polysilicium est au-dessus du substrat. Quand on dépose la résine, est-elle planarisante ou suit-elle le profil de polysilicium ? Dans le premier cas cela induirait une variation de l'épaisseur de résine, dans le second une variation du niveau de la topographie de la plaque.

Il y a beaucoup d'inconnues encore dans l'étude expérimentale des effets d'empilement, mais la simulation numérique peut peut-être déjà nous aider à prédire une partie des effets observés.

Chapitre 5

La prise en compte et correction des effets d'empilement

Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons étudié le comportement de différents effets d'empilement. Nous avons vu qu'ils pouvaient se manifester sous plusieurs formes et amplitudes et dépendre de la distance à la résine. Cette complexité va jouer un rôle déterminant dans la manière dont les équipes de la microélectronique vont traiter ces phénomènes. Cette thèse a pu s'inscrire dans des projets de recherche et développement entre STMicroelectronics et ses fournisseurs Mentor Graphics et ASML Brion qui ont travaillé sur la réalisation d'outils permettant la simulation des effets d'empilement. Mon rôle dans ces projets a été de fournir des ensembles de données pour la construction de modèles, d'apporter une expertise des phénomènes mis en jeu ainsi qu'une évaluation de certains modèles proposés. Nous vous proposons donc dans ce chapitre d'aborder le traitement de ces effets. Dans une première partie, nous proposons un bref état de l'art des moyens employés comme l'optimisation de certains paramètres du procédé, l'utilisation de couches anti-reflet développables ou l'application d'une méthode de simulation numérique. Dans un second temps, nous aborderons la modélisation fournisseur des effets d'empilement. Dans un souci de confidentialité, je me limiterai au résumé de nos travaux publiés en conférences industrielles, ce qui nous permettra d'aborder le type de modélisation choisie, quelques résultats qualitatifs sur nos structures et les critères d'évaluation des modèles. Dans un troisième temps, nous aborderons l'étude de la construction de modèles rigoureux que j'ai pu mener pendant cette thèse avec une présentation des travaux réalisés avec le logiciel Panoramic, la réalisation de mon propre simulateur, et la mise en place d'un algorithme de création de modèle.

5.1 L'état de l'art de la correction des effets d'empilement

Le sujet de cette thèse est l'étude de la prise en compte des effets d'empilement par l'utilisation de la modélisation numérique. Mais ce n'est pas le seul moyen possible pour gérer ces difficultés. Nous proposons donc ici un rapide état de l'art sur l'étude des moyens de traitement de ces effets d'empilement ou de topographie des matériaux de l'empilement. Il est important de noter que ces effets se manifestent dans la littérature de manières souvent un peu différentes de celles présentées dans le chapitre précédent, ce qui explique le choix de traitement proposé dans cette même littérature.

5.1.1 Optimisation des paramètres du procédé lithographique

La première idée qui doit germer lorsqu'il s'agit de gérer un effet parasite négligé jusqu'alors, c'est d'optimiser les paramètres du procédé pour voir s'il n'est pas possible de trouver un meilleur point de fonctionnement, minimisant ce nouvel effet gênant. Or, dans le cas des effets d'empilement, ces possibilités existent, en voici deux exemples.

La source lumineuse

Une publication datant de 2002 de la conférence Optical Microlithography [16] fait état de problèmes d'effets d'empilement sur l'exemple du niveau de photolithographie d'implantation des sources et drains comme dans nos travaux. Même si le schéma figure 1 de la première page décrit très exactement les mêmes effets que pour nos travaux, l'auteur traite tous les effets sans distinctions. Pour lui plusieurs solutions sont possibles : l'utilisation de couches anti-reflet qui ajoute du coût et de la complexité au procédé, l'utilisation de résines colorées pour l'absorption des réflexions parasites qui nécessite l'ajout de nouveaux produits chimiques en production, ou encore sous-exposer le réticule ce qui a pour effet de diminuer la marge de focus et dose disponible pour l'impression correcte des motifs.

Finalement, la solution retenue par l'auteur est l'optimisation des paramètres de la source lumineuse. A travers une étude expérimentale et des mesures par microscopie électronique à balayage, l'auteur montre qu'une diminution de la cohérence partielle de la source mène à davantage d'interférences destructrices entre l'exposition incidente et les réflexions issues du substrat. L'augmentation du produit ouverture numérique par facteur de cohérence partielle permet d'augmenter la marge disponible face aux effets d'empilement mais au dépit de la marge dans la fenêtre de procédé focus-dose.

L'épaisseur de résine

Une autre possibilité d'optimisation en vue de limiter les effets d'empilement est d'étudier l'impact de l'épaisseur de la résine sur ces effets. Ici, je vous propose une illustration expérimentale. Les effets d'empilement ont aussi fait l'objet d'études à ST-Microelectronics en dehors de mes travaux de thèse, j'ai donc fait le choix de m'in-

vestir dans ces projets notamment dans l'idée d'enrichir ce manuscrit au moment de sa rédaction. Une étude expérimentale a donc été menée conjointement avec l'équipe photolithographie qui a exposé des plaques de silicium technologie standard à l'étape d'implantation des sources et drains avec des épaisseurs de résine différentes, et a effectué des mesures pour l'évaluation d'autres critères comme par exemple l'uniformité des dimensions des motifs imprimés. De mon côté, j'ai sélectionné les structures les plus représentatives des effets d'empilement et j'ai traité les données mesurées par l'équipe photolithographie. Parmi mes structures test, il y avait bien entendu les structures d'effet de la transition silicium/silice sur une ligne de résine représentées sur la figure suivante :

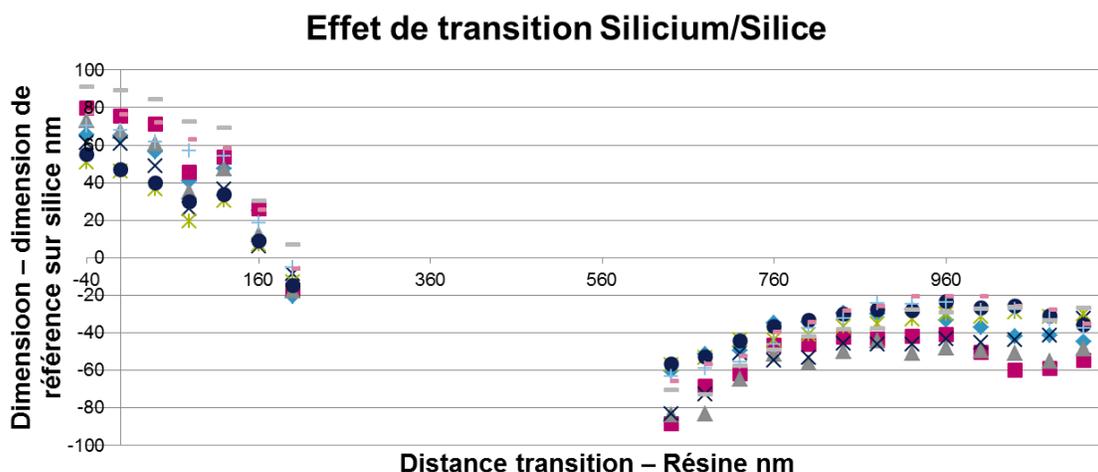


FIGURE 5.1 – Effet de transition silicium/silice pour plusieurs épaisseurs résine

La légende a volontairement été retirée ici pour ne pas révéler les épaisseurs de résine utilisées. Notez simplement qu'il y a ici neuf différentes courbes, chacune correspondant à une épaisseur résine, et qu'il n'y a pas de lien linéaire entre la position de la courbe et cette épaisseur. Ce que je veux dire c'est que si on trace la dimension d'une seule structure en fonction de l'épaisseur de résine, on obtient une courbe périodique au premier ordre. Observons deux courbes en particulier sur ce graphique, celles représentées par les carrés rouges et les ronds bleus. La première semble présenter une des amplitudes les plus fortes alors que la seconde une des amplitudes les plus faibles. Le tableau suivant reporte ces amplitudes classées par ordre d'effet croissant :

Cas	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Min nm	-57	-56	-60	-63	-66	-83	-83	-73	-89
Max nm	51	55	66	70	77	61	73	90	80
max-min	108	111	126	133	143	144	156	163	169

TABLE 5.1 – Amplitude de l'effet d'empilement de transition silicium/silice en fonction de l'épaisseur de résine

Ces données expérimentales montrent que cet effet de transition, représenté par la

différence entre la ligne de résine sur silice avec et sans la transition silicium/silice, peut varier d'une amplitude de 108 nm à 168 nm, ce qui représente une gamme de variation de 60 nm !

Les autres effets d'empilement ont également été mesurés à travers d'autres structures. Le graphique suivant illustre cette fois la variation de la dimension de chaque motif en fonction de l'épaisseur :

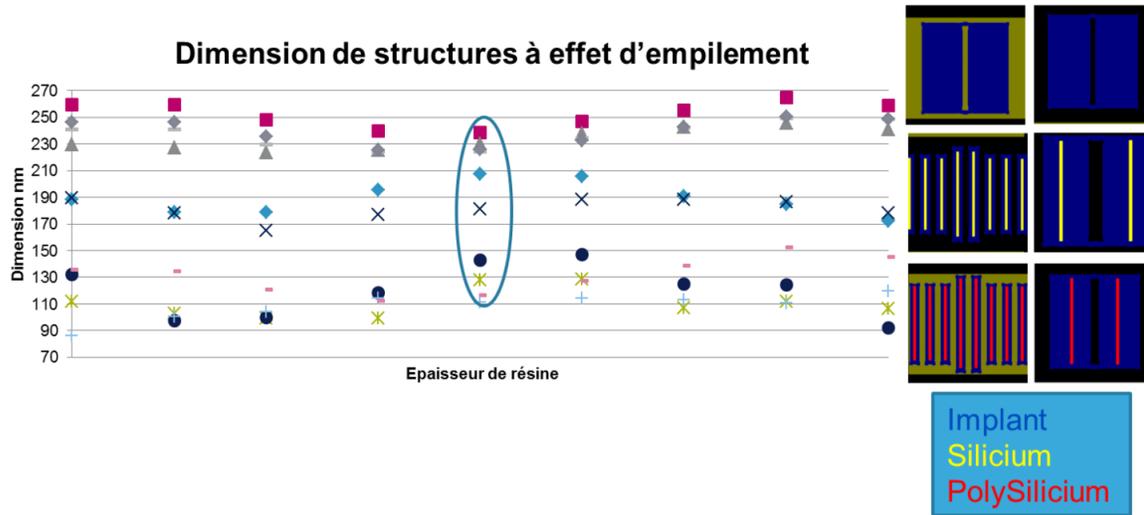


FIGURE 5.2 – Effet de transition pour plusieurs motifs en fonction de l'épaisseur de la résine

On voit bien sur ce graphique la variation périodique des dimensions des motifs et la présence d'un point de fonctionnement au centre qui minimise les effets d'empilement, il s'agit bien sur du même point de fonctionnement sur les deux graphiques proposés.

Quant à la conclusion industrielle de cette étude, elle n'est pas du ressort des travaux de cette thèse. Mon travail consiste à montrer que l'optimisation de l'épaisseur de la résine est une solution parmi d'autres qui peut nous permettre de minimiser les effets d'empilement et c'est chose faite. Le choix de l'épaisseur de résine à appliquer lors du procédé de photolithographie optique dépend de beaucoup d'autres critères d'évaluations et sort du cadre de mes travaux. Notez cependant que l'épaisseur de résine n'est pas la seule épaisseur influençant les effets d'empilement. L'épaisseur du film mince de silice placé entre la résine et le substrat de silicium a un effet prépondérant que nous montrerons indirectement dans la partie sur l'algorithme de construction de modèle. Le lecteur pourra néanmoins en avoir une illustration en [6].

5.1.2 Amélioration du procédé

Si optimiser les paramètres du procédé existant peut permettre de diminuer l'amplitude des effets d'empilement, certaines modifications ou ajouts au procédé peuvent jouer un rôle important. Ici encore je développerai deux exemples dont bien entendu celui de l'utilisation d'une couche anti-reflet développable appuyée par une étude expérimentale et je ferai une proposition d'étude en troisième paragraphe.

Bloquer la lumière sur le réticule

Un article de la conférence SPIE 2010 intitulé "A novel method to reduce topography effect for implant lithography process" [61] traite d'un moyen astucieux de lutte contre les effets d'empilement en bloquant la lumière directement au niveau du réticule à l'aide de motifs diffractants non résolus. Nous avons montré que les effets d'empilement sont très dépendants de l'illumination directe de la source optique. En plaçant ces motifs diffractants non résolus à l'aide de la simulation numérique, on obtient un moyen moins coûteux que l'utilisation d'une couche anti-reflet.

Utiliser une couche anti-reflet développable

La solution la plus plausible quand il s'agit de limiter les réflexions lumineuses issues des couches sous la résine photosensible, c'est d'utiliser une couche anti-reflet comme pour de nombreux autres niveaux. Cependant, les problématiques techniques contraignent ici au choix d'une couche anti-reflet développable [9] [23]. Ici aussi, des études ont été menées à STMicroelectronics et j'ai pu participer à évaluer l'amélioration apportée grâce aux structures test que j'avais placées sur les réticules. Les deux graphiques ci-dessous permettent de comparer l'effet de transition avec une couche anti-reflet développable appelée DBARC pour "developable bottom anti-reflective coating" et sans cette couche.

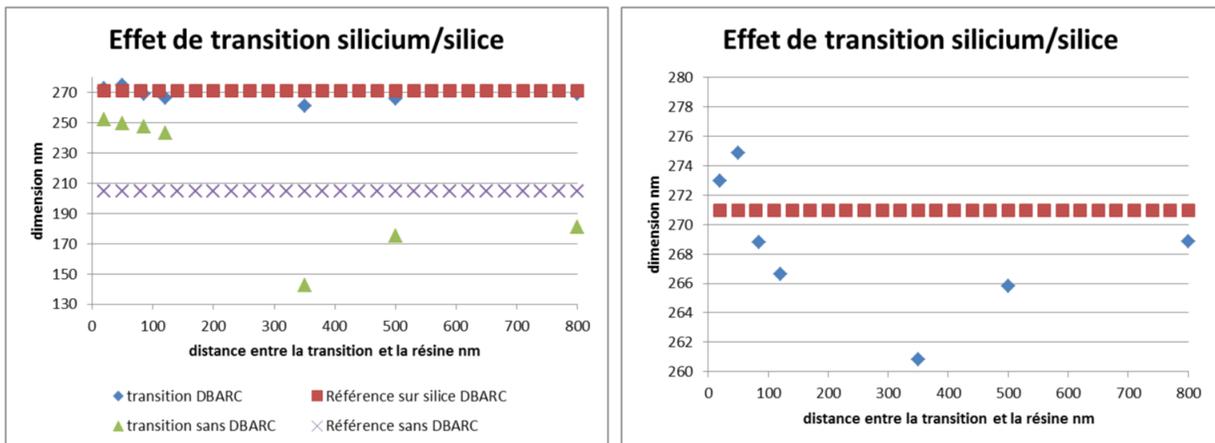


FIGURE 5.3 – Effet de transition avec et sans utilisation d'une couche anti-reflet

On observe premièrement une diminution très importante de l'effet de transition (du vert au bleu). La référence de la ligne de résine sur substrat de silice, qui illustre de ce fait l'effet de substrat, augmente de plus de 60 nm (du violet au rouge). Par contre, cette nouvelle référence est 20 nm au-dessus de la courbe de l'effet de transition en vert avec les transitions très rapprochées. Nous avons vu que lorsque les éléments de silicium se rapprochent de la ligne de résine, ils protègent la ligne de résine de l'effet substrat. Ainsi la dimension de la ligne de résine tend vers celle d'une ligne sur silicium. Or ici nous avons 20 nm supplémentaires et nous les retrouvons également entre les courbes verte et bleue de l'effet de transition au début des courbes. Une autre façon d'interpréter

l'impact de la couche anti-reflet est de prêter attention justement à ce phénomène de masquage. Dans le cas de l'empilement sans couche anti-reflet, on retrouve bien comme au chapitre précédent, une partie de la courbe avec effet de transition nettement au-dessus de sa référence (vert au dessus du violet), alors que dans la situation avec la couche anti-reflet, les premiers points des deux courbes sont quasiment confondus (bleu et rouge). L'effet de masquage de l'effet substrat a disparu parce que l'impact des couches inférieures a totalement été atténué. Ceci implique que la couche anti-reflet limite également la réflexion lumineuse à l'interface silicium-résine que nous n'avons jamais étudiée puisque cet empilement nous servait de référence. Ainsi, grâce à cette couche anti-reflet, la globalité des effets d'empilement est atténuée.

Une dernière observation s'impose. Avec l'utilisation d'une couche anti-reflet, la courbe d'effet de transition remonte au niveau de la référence, du bleu au rouge, contrairement à la courbe verte qui ne remonte pas à la référence en violet. Nous avons évoqué dans le chapitre 4 dans le paragraphe de l'effet de transition des questions de topographie de l'empilement. Ici ce problème a disparu ! Mais il reste cependant impossible de tirer des conclusions sans information supplémentaire. En effet, nous ne savons pas si la couche anti-reflet et la résine suivent le profil de la topographie, c'est à dire si elles ont une épaisseur constante, ou si elles rendent la surface plane comme sur la figure suivante. Difficile donc de raisonner sur ces courbes pour expliquer la remontée à la référence de la courbe.

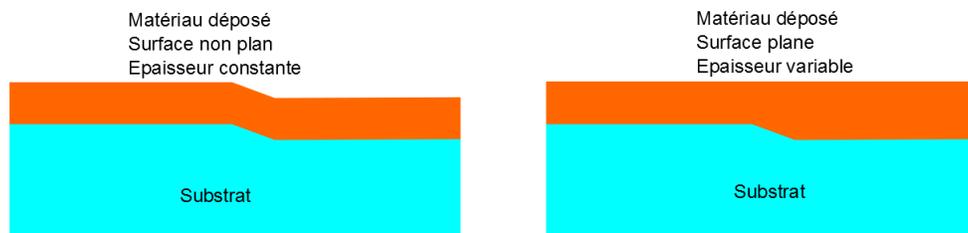


FIGURE 5.4 – Topographie possible de la surface d'une plaque de silicium

Nous proposons sur le graphique de droite de diminuer l'échelle du graphique autour de la nouvelle courbe d'effet de transition. Notons alors que même avec l'utilisation d'une couche anti-reflet, l'effet d'empilement n'a pas disparu. Il reste une fluctuation d'environ 15 nm de la ligne de résine. Cette dernière observation a deux conséquences fondamentales. La première c'est que les effets d'empilement ne concernent probablement pas uniquement les niveaux d'implantation des sources et drains, mais bien d'autres malgré l'éventuelle utilisation de couches anti-reflet (nous l'avons vérifié en effet sur d'autres niveaux). La seconde est que quand bien même l'optimisation ou l'amélioration du procédé pourraient limiter les effets d'empilement, nos travaux conservent un intérêt très important pour les technologies actuelles et futures. Une erreur de 15 nm sur un niveau implant peut sembler faible mais de nombreux autres niveaux n'ont pas une marge d'erreur globale aussi importante sur le placement et la dimension des motifs en photolithographie.

Niveaux de gris ?

Pour terminer cette partie j'aimerais faire une proposition. Lors de mes conférences je me suis particulièrement intéressé à des articles et présentations sur de la photolithographie en niveaux de gris. Plutôt que de réaliser le réticule de manière binaire, c'est à dire présence d'un motif ou absence de motif, certains réticules ont des motifs en niveaux de gris, donc avec des transmissions variables. Ce mode de fonctionnement est utilisé pour réaliser des motifs résine d'épaisseur variable pour permettre l'ajustement de la profondeur d'implantation ionique. Je pense qu'une perspective intéressante à mes travaux seraient d'essayer d'utiliser un réticule en niveau de gris pour limiter, voire mieux, contrôler les effets d'empilement [22].

5.1.3 Modélisation des effets d'empilement

Finalement, un des moyens les plus intéressants pour son faible coût de mise en place reste la modélisation numérique. Je vous propose ici une présentation rapide de quelques moyens intéressants que l'on trouve dans la littérature. La plus grande majorité des articles qui parlent des effets d'empilement ou de topographie le font à travers l'étape de photolithographie de l'implantation des sources et drains.

Modélisation de la variation de la topographie

Tout d'abord, de nombreuses publications abordent les problèmes d'effets d'empilement à travers la variation de la topographie de la couche de silice due à l'étape de polissage mécano-chimique. La solution proposée est d'utiliser des simulations du procédé de polissage et d'inclure les variations de la topographie sous la forme d'une carte d'erreur de focus [20] [32]. Compte tenu des effets avec lesquels nous travaillons, une telle méthode n'est pas suffisante.

Modélisation rigoureuse des effets d'empilement

Il y a un papier de la société Synopsis concernant l'utilisation de mesures virtuelles. L'idée de l'article est de limiter le besoin en ressources expérimentales en créant et simulant rigoureusement des structures test. L'exemple d'utilisation est appliqué aux effets d'empilement de l'étape de photolithographie des implants sources et drains [52]. Mais compte tenu de la variabilité de nos effets à certains paramètres du procédé ou épaisseurs de matériaux, il semble difficile de se passer de mesures expérimentales. De plus, l'utilisation de simulation rigoureuse est souvent trop gourmande en temps de calcul et mémoire informatique.

Baucoup d'autres publications correspondent à des études d'effets d'empilement par simulation rigoureuse sans forcément aborder la correction [49]. Il peut s'agir de trouver la bonne épaisseur d'une couche anti-reflet ou d'étudier la modélisation en elle-même de la photolithographie sur des plaques avec des substrats variables [46][15]. Je propose tout de même au lecteur un article récent sur la modélisation rigoureuse de la

photolithographie pour l'implantation ionique sur de la topographie pour la réalisation des transistors finFET en 14 nm [58].

Corrections basées sur des règles géométriques

Rappelez-vous dans le chapitre 3, nous avons abordé les premières corrections des effets de proximité qui se faisaient à partir de tables de données mesurées, appliquées grâce à des règles géométriques simples. Un article fait part d'une démarche possible de prise en compte des effets de transition silicium/silice de la même manière [48]. Au début de cette thèse, j'ai réalisé des tables de données de correction pour la prise en compte de l'effet substrat de silice, surtout pour l'aspect formation. Il ne paraît effectivement pas impossible compte tenu des courbes que nous avons établies dans le chapitre précédent d'utiliser des tables de données pour corriger une partie des effets. Cependant, nous avons démontré l'existence d'effets combinés difficiles à gérer qui nous obligeraient à démultiplier le nombre de règles et de structures test. C'est une approche impossible à mettre en oeuvre à notre étape où de nombreuses sources d'effets d'empilement sont présentes. Imaginez le résultat sur la technologie FDSOI avec quatre substrats, sept transitions et leurs combinaisons.

Expositions secondaires

Au début de ces travaux doctoraux, nous avons pu utiliser un outil proposé par Mentor Graphics, qui permettait d'ajouter les effets d'empilement à l'étape de photolithographie comme deux sources d'expositions secondaires, représentées par deux réticules virtuels [42]. Notez que dans cette publication se trouve un ensemble de graphiques étudiant les mêmes structures que celles que nous avons présentées dans nos travaux, avec les mêmes tendances remarquables. Mes résultats sur cet outil ont montré une amélioration de la modélisation des effets d'empilement sur mes structures test par rapport à un modèle classique. Cependant nous n'avons pas réussi à en tirer un profit suffisant pour en faire notre solution. Il y a plusieurs raisons à cela. La première, peut-être à cause de l'intensité des effets dans cette publication qui semblent légèrement inférieure aux nôtres. Mais surtout cet article se concentre sur une étape d'implantation qui précède la notre, seuls le silicium et la silice sont présents, alors que dans notre cas nous avons le polysilicium, sans compter que nous avons la technologie FDSOI qui encore une fois démultiplie les situations. Il nous faudrait beaucoup plus que deux expositions secondaires pour représenter tous les effets d'empilement, ce qui induirait très probablement un temps d'optimisation des réticules virtuels beaucoup trop important. Enfin, on peut peut-être aussi remettre en cause une méconnaissance des effets à l'époque où nous avons mené ces études. Ce que je veux dire ici, c'est qu'une perspective intéressante à mes travaux serait de reprendre ce moyen de traitement des effets d'empilement avec l'expertise que nous avons bâti durant ces trois années et de voir si une représentation astucieuse des réticules auxiliaires pourrait donner des résultats intéressants. Il est important de noter que si nous avons conclu que cette solution ne nous convenait pas, c'est à la fois à cause de l'intensité des effets et de la précision

que nous voulions obtenir. Nous savons maintenant que d'autres niveaux sont probablement soumis aux effets d'empilement et une telle solution pourrait s'avérer très utile. En effet, l'aspect très empirique de la solution a pour but de limiter l'impact sur le temps de simulation, mais pourrait donner la précision attendue sur un autre niveau.

Réticules fictifs

Une solution antérieure a été proposée par STMicroelectronics et est basée à peu près sur la même idée. La stratégie employée fut de considérer les effets d'empilement comme des variations locales de dose représentées par des polygones sur des réticules fictifs dont les transmissions ont été optimisées. L'avantage par rapport à l'outil précédent c'est qu'il n'y a pas de limite théorique au nombre de réticules fictifs ce qui permet à l'auteur de présenter une modélisation correcte de notre niveau de photolithographie, c'est à dire avec silicium, silice et polysilicium, grâce à un total de sept réticules fictifs. L'inconvénient en revanche reste le même, à savoir une explosion du temps de simulation [53] [26].

5.2 Simulation des effets d'empilement dans le cadre de cette thèse

Les effets que nous avons observés lors de notre chapitre 4 ont finalement donné du fil à retordre aux diverses techniques déjà présentes dans la littérature, poussant STMicroelectronics et ses fournisseurs à s'engager dans des projets de développement de nouveaux outils plus performants pour la prise en compte des effets d'empilement. Mon rôle dans ces projets a été de fournir des données réalisées avec le protocole décrit dans le chapitre précédent et de servir d'interface technique sur les effets d'empilement. J'ai pu apporter mes idées même si sans doute elles n'étaient pas toujours viables sur le plan industriel. J'ai surtout participé à la compréhension des écarts qui ont parfois été mis en évidence entre la simulation et les mesures permettant ainsi de souligner certains points forts ou faibles des modélisations. Mais rendons à César ce qui est à César, je n'ai cependant jamais calibré et utilisé moi-même les derniers outils de simulation développés par nos fournisseurs bien qu'il me soit arrivé d'effectuer moi-même l'évaluation de certains modèles.

Dans cette section, je vais me contenter de présenter les philosophies choisies par nos fournisseurs car ils ont choisi des chemins différents, ce qui a rendu ces projets d'autant plus intéressants, et de présenter un ou deux résultats purement qualitatifs sans comparaison (pour des raisons de confidentialité). Je présenterai également les différentes étapes d'évaluation des modèles.

5.2.1 Les différents mode de simulation

Les deux outils ou types de modèles développés par nos fournisseurs sont respectivement le "topographical model" de Mentor Graphics et le "W3D+" pour ASML Brion. Ces deux types de modèles dédiés à la prise en compte des effets d'empilement ont un

fonctionnement global similaire mais une stratégie de prise en compte des effets d'empilement totalement différente. Les publications communes STMicroelectronics/Mentor Graphics [41] [40] et STMicroelectronics/ASML Brion [27] donnent un bon résumé de nos travaux communs.

Un point commun : les modèles optiques

Les deux types de modèles démarrent par la calibration de deux modèles optiques différents, un pour chacun des deux substrats uniformes, silicium et silice, présents sur la plaque de silicium à l'étape de photolithographie de l'implantation des sources et drains des transistors. Dans les deux cas, des structures mesurées sur les deux substrats uniformes permettent de calibrer les paramètres de focus et de capturer l'écart du paramètre de meilleur focus entre les deux substrats uniformes.

Une stratégie différente : les effets d'empilement

Là où la différenciation entre les deux outils devient intéressante c'est sur la prise en compte des effets d'empilement une fois les deux modèles optiques calibrés.

Le modèle de Mentor Graphics considère chaque transition de matériaux silicium ou polysilicium comme une source élémentaire de signaux réfléchis. Les types de signaux utilisables sont ceux de réflexions des flancs, réflexions des coins, un terme dit de tranchée pour prendre en compte les différentes topographies du silicium sous la résine ainsi que deux termes pour le polysilicium, un terme de grille et un terme d'interconnexion pour les contacts respectifs avec le silicium et la silice. Ces termes sont optimisés à partir de structures test imprimées sur des empilements de matériaux avec des effets de transition. Il s'agit donc ici d'une stratégie empirique de prise en compte des effets d'empilement.

Le modèle ASML Brion utilise une librairie de structures représentatives des empilements simulées par résolution rigoureuse des équations de propagation du champ électromagnétique. Ces structures virtuelles contiennent les informations d'épaisseur des matériaux, indices optiques, profils tri-dimensionnels des empilements. Les paramètres de ces filtres rigoureux sont optimisés à partir des structures mesurées sur des empilements contenant des transitions de matériaux. Il s'agit donc ici d'une approche semi-rigoureuse de prise en compte des effets d'empilement.

Il est finalement intéressant de noter que mes travaux doctoraux sont l'étude de modèles rigoureux. Ainsi, les trois approches empirique - semi-rigoureuse - rigoureuse sont utilisées.

Résultats qualitatifs

Je vous propose dans ce paragraphe tout de même deux illustrations des capacités des outils réalisés par nos fournisseurs :

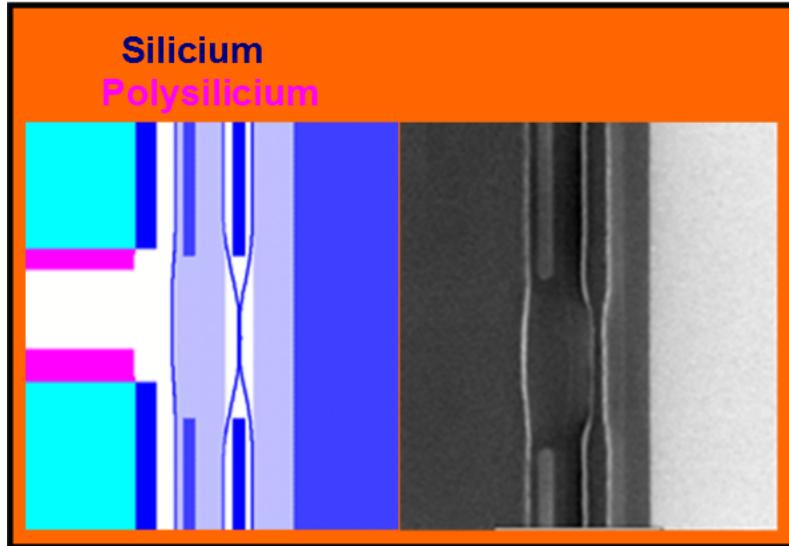


FIGURE 5.5 – Résultats de simulation du modèle W3D+ d'ASML Brion

Cette illustration représente le résultat de simulation du modèle d'ASML Brion sur une structure produit non fonctionnelle à côté de l'image obtenue par microscopie électronique à balayage correspondante. On constate que la simulation prédit bien le pincement de la résine et le renforcement à gauche dus à la présence du substrat de silice. La figure suivante donne un résultat similaire pour le modèle de Mentor Graphics :

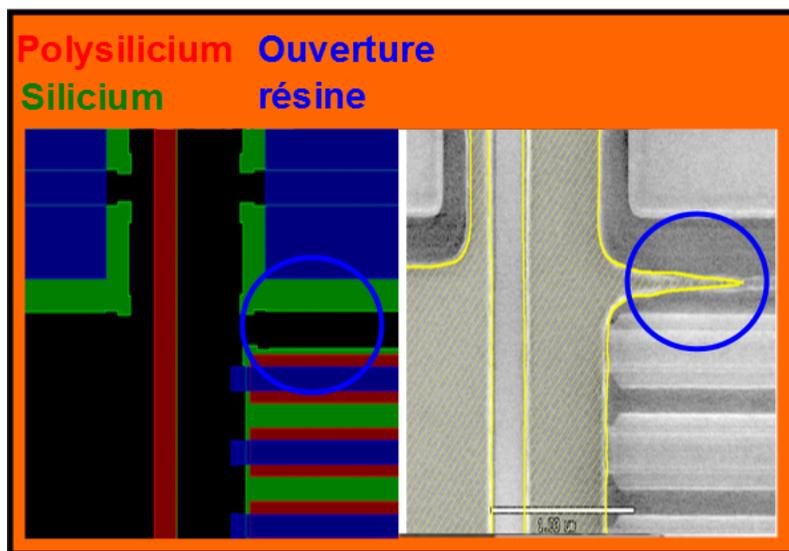


FIGURE 5.6 – Résultats de simulation du modèle topographie de Mentor Graphics

On constate que la dégradation de la ligne de résine due aux effets d'empilement est

prédite par le modèle. Dans les deux cas présentés ici, une simulation standard aurait prédit des lignes de résine de largeur constante.

5.2.2 L'évaluation des modèles fournisseurs

Dans cette section, nous nous proposons d'évoquer brièvement les étapes de validation des modélisations fournisseurs.

La première étape correspond à la vérification du modèle sur les structures test que j'ai réalisées. Une évaluation de l'erreur au sens des moindres carrés pour chaque famille de structures permet une mise en évidence des points forts et faibles du modèle. On commence par une évaluation des modèles optiques sur les deux substrats uniformes. Une réflexion sur les valeurs des paramètres optimisés permet également d'améliorer la construction de modèle. On achève cette évaluation avec les structures sur des effets d'empilement variables. Ici j'ai joué un rôle d'expertise sur le comportement des effets d'empilement à travers mes propres structures test. J'ai également effectué les vérifications des structures remises en question par les résultats de simulation.

La seconde étape est la validation du modèle précédemment obtenu sur des morceaux de circuit comme ceux que nous avons montrés précédemment. Par comparaison avec les images obtenues par microscopie électronique à balayage, on évalue la qualité du modèle. Au cours de nos études, il nous est arrivé d'avoir des modèles de qualité sur les structures test et de mauvaise qualité sur les morceaux de circuit et vice versa. J'ai eu ici un rôle intéressant. Grâce à l'expertise que j'ai gagné à travers le traitement des données j'ai tenté d'expliquer le comportement des effets d'empilement sur des morceaux de circuit.

La troisième étape, lorsque nous avons un modèle qui nous semble correct, est de valider sa capacité de prédiction. Nous allons sélectionner un projet donné et effectuer la simulation pour voir si le modèle retrouve les points critiques sur la plaque de silicium d'un point de vue des effets d'empilement. On répond à la question "Le modèle voit-il la totalité des effets d'empilement présents sur plaque?". Il est évident qu'un modèle qui ne prédit qu'une partie des effets existants ne nous permettra pas de les traiter convenablement sur le réticule.

La quatrième étape est la question complémentaire "Le modèle voit-il uniquement les effets d'empilement visibles sur plaque ou prédit-il des effets non réels". Il s'agit d'éliminer le bruit de prédiction. On ne peut pas travailler avec un modèle qui prédit des effets là où il n'y en a pas. Une correction du réticule pourrait dans ce cas générer un défaut problématique sur le plan électrique.

La cinquième et dernière étape : on évalue le gain en précision et la pénalité de temps de simulation par rapport à un modèle classique de production qui ne voit pas les effets d'empilement.

5.3 La modélisation rigoureuse

Nous nous attaquons enfin à la dernière partie de ce chapitre qui adresse les travaux que j'ai réalisés pour la prise en compte des effets par une modélisation rigoureuse. Comme nous l'avons déjà abordé dans le premier chapitre de cette thèse, il nous faut deux choses : un modèle rigoureux et une méthode de calcul. Le modèle rigoureux pour

nous sera un ensemble de paramètres qu'il faudra optimiser, fixer pour que le modèle soit représentatif des effets d'empilement observés sur plaque. La méthode de calcul, nous la verrons lors du prochain chapitre. Historiquement, nos travaux se sont déroulés en deux phases, la première est l'utilisation d'un outil de modélisation rigoureux professionnel qui nous a permis d'aborder les bases de notre création de modèle et la seconde est la réalisation de mon propre simulateur.

5.3.1 Le rôle du simulateur professionnel Panoramic

Ces travaux ont donc débuté par la prise en main d'un logiciel de simulations rigoureuses du procédé lithographique par utilisation de la méthode des éléments finis. Il s'agit du logiciel Panoramic de la société Panoramitech et plus précisément de son module de simulation lithographique nommé Hyperlith. Les difficultés sont apparues très rapidement et cela pour plusieurs raisons. La première est l'absence d'une documentation complète de l'outil de modélisation dont les paramètres portaient des noms parfois peu explicites. Ceci m'a obligé à effectuer beaucoup de simulations pour cerner le comportement du logiciel. La seconde est beaucoup plus intéressante.

Une utilisation singulière et inadaptée

Nous avons abordé dans le chapitre 3 le fait que la modélisation pouvait avoir plusieurs finalités et typiquement ce type d'outil de simulation rigoureuse est utilisé pour faire des tests d'optimisation de paramètres du procédé, forme de la source, épaisseurs de matériaux, etc, ou de l'apprentissage. Ainsi, cet outil de simulation est utilisé généralement de manière "locale". C'est à dire que l'utilisateur va décrire théoriquement le système lithographique utilisé sur une structure virtuelle (parfois correspondante à une structure mesurée certes), et va regarder comment évolue le résultat de sa simulation en fonction d'un changement donné. De ce fait, certains paramètres seront réglés "par défaut", éloignant tout de même le modèle utilisé de la réalité physique et limitant ainsi son domaine de validité. Or, ce n'est pas cette utilisation que nous en avons fait dans le cadre de cette thèse. Premièrement, nous avons souhaité lier nos simulations avec nos nombreuses mesures expérimentales. Deuxièmement, nous avons souhaité trouver un point de fonctionnement, donc un modèle, permettant de simuler la totalité des phénomènes observés sur plaque. Nous avons ainsi utilisé ce logiciel de manière "globale". De ce fait, nous allons voir que l'utilisation du logiciel par l'interface graphique utilisateur est inadaptée. La structure du logiciel peut être décrite basiquement comme suit :

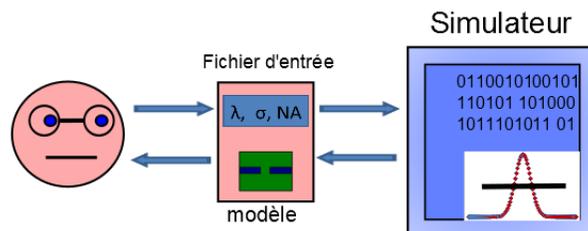


FIGURE 5.7 – Fonctionnement basique de la simulation Panoramic

Le fichier d'entrée du simulateur, le fichier hyperlith, contient la description du système lithographique. Cependant, il contient aussi la description du type de structures à simuler. Ainsi, s'il nous permet effectivement de gérer des structures de dimensions différentes, il ne nous permet pas de gérer en même temps des structures de types différents, par exemple lignes et espaces dans la résine. Or, nous avons des structures de types très différents, unidimensionnelles avec des lignes et espaces, bi-dimensionnelles avec des bouts de lignes, des plots ou des trous. Mais pas seulement ! Nous avons également des structures dont l'empilement sous la résine photosensible varie. Dans ce cas, l'outil de modélisation nous demande la définition de cet empilement et nous contraint à l'utilisation d'un modèle résine particulier. Pour la plupart des modélisations de structures simples, nous avons le choix concernant le modèle résine à appliquer voire nous pouvons nous contenter de l'image aérienne comme résultat si nous ne souhaitons pas prendre en compte la réponse optique de l'empilement de matériaux (mais ce n'est pas notre cas). On peut également utiliser un modèle qui ne représente aucun phénomène résine (le modèle neutre) ou encore étant donné que la plupart de ces modèles sont purement mathématiques, il suffit de régler leurs paramètres pour un effet nul. Cependant, dans le cadre d'une description d'un empilement à au moins deux dimensions, le modèle résine imposé est un modèle nommé "Full Physics" qui utilise une modélisation physico-chimique des phénomènes résines. Il faut alors renseigner, ou optimiser, plus d'une dizaine de paramètres dont les constantes cinétiques de réactions chimiques des constituants de la résine. Nous nous retrouvons alors dans la situation suivante :

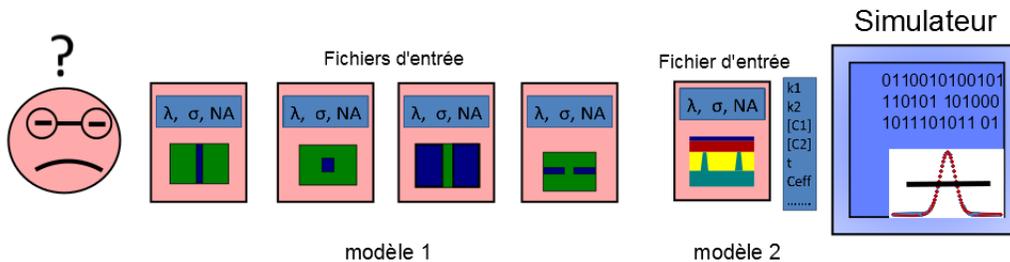


FIGURE 5.8 – Fonctionnement du logiciel Panoramic avec plusieurs modèles

Comment concilier les structures résine sur un empilement simple, c'est à dire sur un empilement de matériaux invariant dans le plan de la résine, avec des structures sur des empilements complexes, c'est à dire variants dans ce plan ? Comment construire un seul modèle à partir de structures simulées par des modèles différents ? La solution la plus "simple" est de tout simuler en trois dimensions avec un modèle "Full Physics" et d'optimiser tous les paramètres en même temps. De cette manière chaque simulation prendra plusieurs semaines pour nous donner un résultat qui contiendra une contribution plus ou moins importante d'un modèle résine non contrôlé. Nous lancerons chaque simulation manuellement, et comme nous souhaitons faire varier certains paramètres du modèle en fonction de sa prédiction sur nos structures test, nous relèverons manuellement toutes les valeurs avant de modifier chaque fichier d'entrée et de les relancer manuellement. J'ai une meilleure idée...

Automatisation : les prémices de la construction de modèle

Il m'est très vite venu à l'esprit, et c'est ce qui a déclenché les travaux d'automatisation que je vais vous présenter, que compte tenu du nombre de simulations qui risquaient d'être lancées, leurs durées et la nécessité pour moi d'intervenir pour modifier des paramètres en fonction des résultats, il fallait automatiser ces simulations pour un fonctionnement jour et nuit. Et ceci est possible grâce à un module de Panoramic appelé CAPI qui permet de relier un programme Matlab avec le moteur de simulation Hyperlith. Ce module a mis à ma disposition un ensemble de fonctions permettant de modifier les paramètres des fichiers Hyperlith, de lancer les simulations et d'extraire sous forme de fichiers textes ou tableaux de valeurs des résultats de simulation. Le problème de la gestion des structures de types différents est donc réglé, puisqu'il suffit de garder en mémoire un fichier Hyperlith pour chaque type de structures et de venir les adresser avec mon programme. Cependant, le problème de l'utilisation d'un modèle "Full Physics" pour les structures avec un empilement de matériaux complexes subsiste. Panoramic donne accès à l'extraction d'une dimension par application d'un paramètre de seuil sur l'image aérienne, c'est à dire dans le vide. Il donne aussi accès à l'extraction d'une dimension par application d'un paramètre de dose sur l'image après modélisation des effets résine. Et au milieu me direz-vous ? Il n'est pas possible d'extraire une dimension de l'image projetée dans la résine avant l'application du modèle résine, mais on peut récupérer cette image sous la forme d'un tableau de valeurs. La solution est donc quelle que soit la structure simulée, de toujours récupérer les images dans la résine sans modèle résine et d'écrire les fonctions de traitement de l'image et d'extraction des dimensions en code Matlab. On arrive donc à la solution suivante :

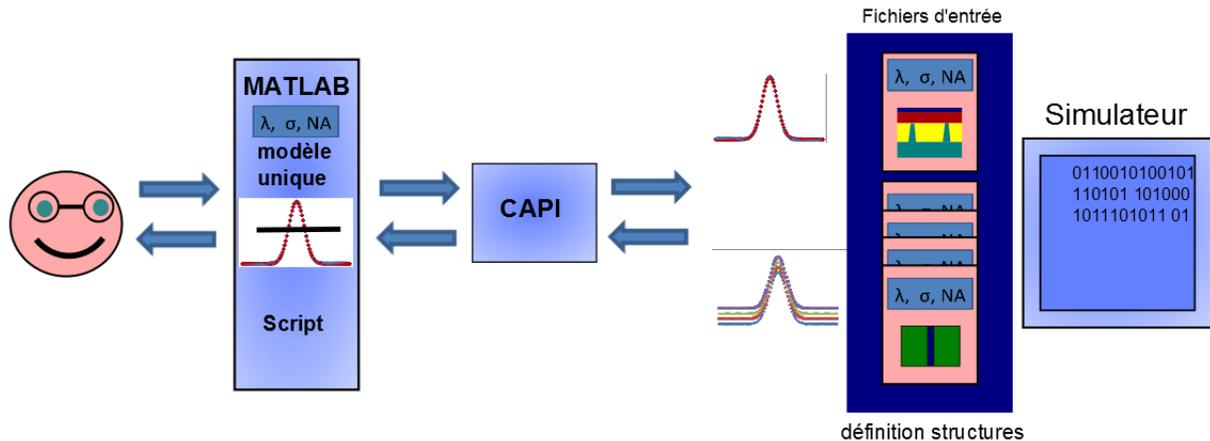


FIGURE 5.9 – Illustration du simulateur Matlab-Panoramic mis en place

Voici des exemples de fonctions de bases que j'ai développées dans ce cadre :

- Détermination du meilleur focus pour une structure donnée sur silicium ;
- Extraction de la dimension d'une structure pour un seuil fixé ;
- Détermination du seuil à appliquer à une structure pour obtenir une dimension donnée ;
- Calcul de l'écart simulations/mesures sur un groupe de structures donné ;
- Optimisation de la dose sur un groupe de structures...

Ce sont les fonctions de base, mais ces fonctions ont demandé beaucoup de développement. Par exemple, la détermination du paramètre de meilleur focus demande de repérer grossièrement à l'aide des lois de l'optique géométrique, la position approximative du meilleur focus, de créer au moins cinq simulations autour de ce point, d'extraire les images aériennes et de les transformer mathématiquement en des fonctions de contour résine, d'extraire des dimensions pour enfin faire une interpolation polynomiale d'ordre 2 sur les cinq dimensions obtenues et repérer l'extrémum locale de la courbe de bossung ainsi réalisée. En second exemple nous pouvons parler de la détermination du seuil à appliquer sur un profil d'intensité pour obtenir une dimension particulière. Tout d'abord la fonction doit vérifier que cela est possible, puis un algorithme basé sur le principe de dichotomie va converger autour du seuil recherché. J'ai dû gérer pas mal de problèmes de convergence de mes algorithmes. Enfin, j'aimerais développer la fonction d'optimisation de la dose sur un groupe de structures. L'idée est de trouver la dose qui permet à un groupe de structures simulées de se rapprocher des structures mesurées. Nous avons commencé par étudier le comportement à la dose d'un groupe de structures simulées. Nous nous sommes rendu compte que l'erreur avec les structures mesurées se comportait comme sur le schéma suivant :

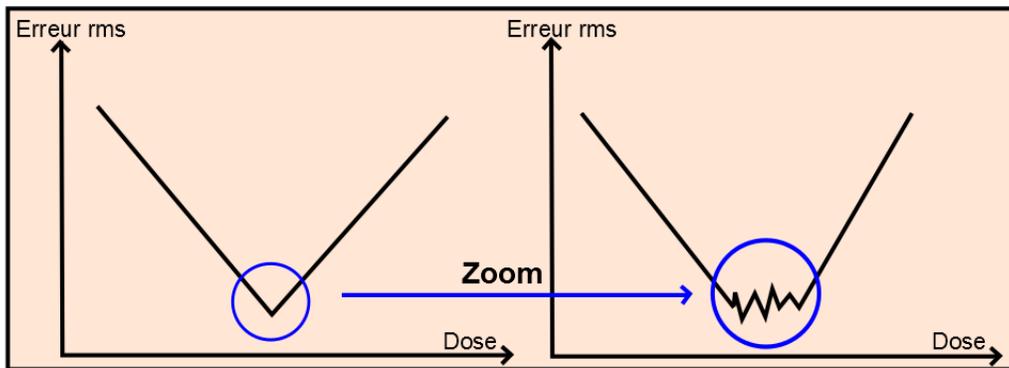


FIGURE 5.10 – Comportement de l'erreur d'un groupe de structures en fonction de la dose

L'erreur calculée sur un groupe de structures mesurées est très importante lorsque la dose simulée est très inférieure ou très supérieure à la dose d'exposition réelle. Lorsque l'on parcourt le paramètre de dose en simulation, on s'aperçoit que l'ensemble des structures simulées est d'abord en sous-exposition et présente un écart élevé avec les mesures. On va se rapprocher de la dose réelle et ainsi faire diminuer l'erreur avant de s'éloigner à nouveau de la dose d'exposition réelle et voir l'erreur réaugmenter. Quand on diminue l'échelle autour de la dose d'exposition réelle, on s'aperçoit qu'il existe une gamme de valeurs de doses simulées pour lesquelles l'erreur oscille autour d'un minimum.

Notre algorithme d'optimisation de la dose est composé de deux modules successifs :

- La première partie est la recherche grossière de la dose qui minimise l'écart entre les structures mesurées et les structures simulées. Trois doses, séparées par un intervalle fixe, sont sélectionnées en simulation et permettent après extraction des dimensions, l'obtention de trois erreurs mesures/simulations. En fonction de la position relative de ces trois erreurs les unes par rapport aux autres, je suis

capable de détecter si mes trois doses sont en sous-exposition, en sur-exposition, ou de part et d'autres de la zone de la dose optimale. Dans le cas de trois doses en sous ou sur exposition, je déplace mes trois doses en direction de la zone optimale. Dans le cas de doses placées de part et d'autre de la dose optimale, je réduis l'intervalle fixe entre les doses de simulation.

- Lorsque le premier module a convergé vers une dose qui semble optimale, je reprends un intervalle de dose autour de ce point, que je parcours linéairement à la recherche de ma dose optimale, avec un pas de recherche fixé.

Grâce à cette fonction, je peux optimiser un paramètre de dose en simulation sur un ensemble de structures mesurées de types différents, ce qui n'était pas possible avec l'interface utilisateur du logiciel. Ce mode de fonctionnement m'a ainsi permis de travailler avec un ensemble de paramètres unique, indépendant du type de structures à simuler. Nous sommes prêts à la réalisation d'un modèle "global". Ce système a aussi permis de rentabiliser le nombre de simulations de nuit et en week end. Ce système préalablement réalisé pour s'affranchir des contraintes du logiciel Panoramic et pour des questions de rendement a été le point de départ de la réalisation de mon algorithme de construction de modèles. L'optimisation des paramètres de mes modèles sur des structures mesurées va me donner l'avantage de me diriger vers une modélisation physique des phénomènes d'empilement.

5.3.2 L'algorithme de création de modèle

Armés d'une nouvelle interface de lancement de simulation grâce à des programmes matlab, nous pouvons maintenant lancer des simulations pour voir si on arrive à simuler à la fois des structures imprimées sur un substrat de silicium et aussi sur un substrat de silice. Les modèles fournisseurs qui existaient alors, n'étaient pas capables de différencier les deux. Les modèles étaient alors calibrés à partir de structures mesurées sur un seul des deux substrats, historiquement le silicium, et renvoyaient ainsi des dimensions simulées imprécises des structures imprimées sur silice. Nous, nous sommes capables de les différencier.

Des problèmes de mesures

Il est alors venu le temps des premières simulations et surtout des premiers échecs. Lors de la phase de prise en main du logiciel, nous avons remarqué que certains paramètres comme l'épaisseur de silice jouaient un rôle très important dans le résultat de simulation. Nos difficultés de simulation s'expliquent donc très simplement par une forte incertitude des valeurs de ces paramètres. Prenons l'exemple de l'épaisseur de silice. La valeur mesurée que nous entrons dans le simulateur contient deux sources d'incertitudes majeures que sont l'incertitude de l'appareil de mesure et du moyen utilisé pour faire la mesure. La mesure d'épaisseur de matériaux déposés se fait généralement par la méthode d'ellipsométrie qui consiste à récupérer les signaux réfléchis, par les interfaces supérieure et inférieure de la couche à mesurer, d'une onde lumineuse incidente. Premièrement, la mesure contient des incertitudes car aucune mesure n'est absolue.

L'épaisseur est obtenue moyennant l'application d'un modèle qui contient lui-même ses imperfections. Secondement, la situation dans laquelle la mesure est effectuée n'est pas représentative de ce que nous avons sur plaque. Pour effectuer des mesures à l'ellipsomètre, on dépose une couche de matériaux sur toute la surface de la plaque de silicium. Cela ne correspond pas ! Par conséquent, nous avons cherché à utiliser les mesures pour optimiser ces paramètres un à un dans le bon ordre. Il nous faut donc commencer par optimiser les paramètres de position de l'image aérienne et du focus du système d'exposition.

La stratégie du raisonnement inverse

Nous entrons ici dans la première phase de notre algorithme de construction de modèle et nous allons expliquer ici pourquoi cette solution a été si avantageuse au départ par rapport aux simulations effectuées par nos fournisseurs. Pour expliquer ce que j'ai appelé la stratégie du raisonnement inverse, il faut d'abord aborder la notion de couple image aérienne / position de l'image latente. L'illustration ci-dessous va nous permettre d'appuyer cette discussion :

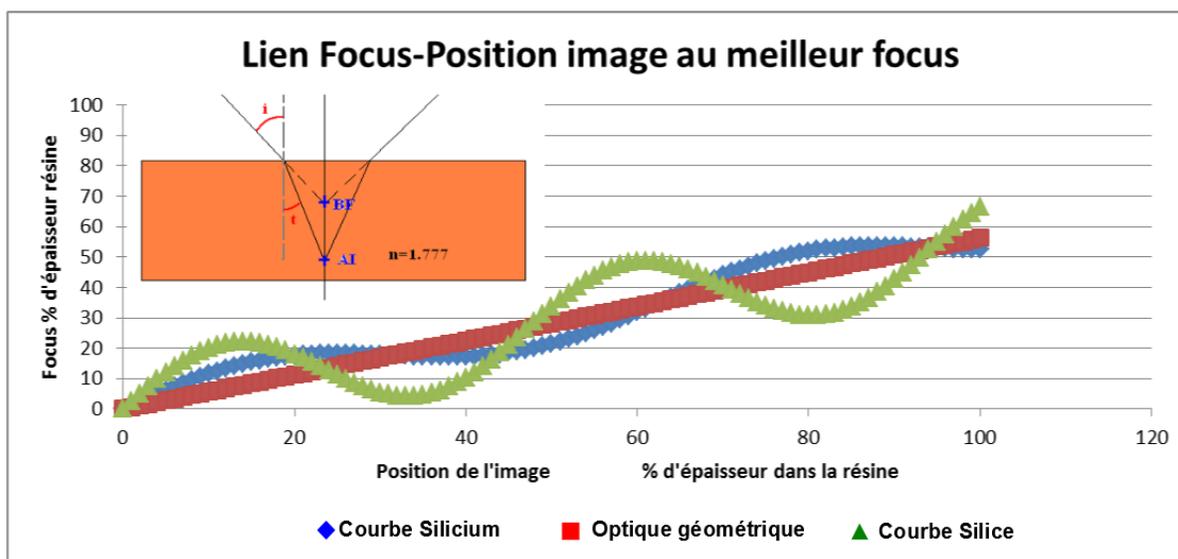


FIGURE 5.11 – Courbe représentant les points modèles au meilleur focus dans le plan focus-position de l'image

En photolithographie optique, l'image aérienne du réticule est reconstituée dans l'espace et projetée dans la résine photosensible. Ainsi, la notion de focus, comme nous l'avons vu dans le chapitre 2, peut se ramener au point focal du système optique ou à la position dans l'espace à laquelle l'image a le meilleur contraste. Ce que l'on appelle alors focus, c'est la localisation de l'image aérienne, donc dans le vide, qu'on estime de meilleure qualité. La position de l'image, c'est l'endroit où l'on vient regarder dans la résine pour extraire la dimension du motif. Le meilleur focus est un point particulier dans cette résine, qui correspond à l'extremum de la courbe de Bossung, c'est à dire l'endroit dans la résine où la dimension est la moins sensible aux variations de la position

de l'image. Ainsi, les deux paramètres, focus et position de l'image, peuvent prendre un ensemble continu de valeurs. Il faut donc regarder le graphique précédent avant tout comme un plan dont chaque point peut correspondre à un point de fonctionnement de notre photolithographie, correspondant à une valeur de focus donnée.

Ainsi, un modèle fournisseur va parcourir l'ensemble de ce plan pour l'optimisation des paramètres des modèles optiques, qui ne sont autres que les deux paramètres dont nous parlons, et sélectionner le point, donc le modèle, dont l'erreur est la plus faible sur l'ensemble des structures de calibration. Les points des courbes qui apparaissent dans ce plan correspondent aux modèles particuliers où le système est au meilleur focus. Si on ne considère que l'optique géométrique, les deux paramètres sont liés par les lois de Snell-Descartes et nous obtenons une droite. Cependant, nous savons que les lois de l'optique géométrique ne sont pas suffisantes pour la description du comportement optique de ce type de système. L'apparition des ondes stationnaires dans la résine va faire osciller cette droite. Ainsi, sur un substrat de silicium semi-infini, les oscillations vont correspondre aux ondes stationnaires présentes dans la résine photosensible. Dans le cas d'un substrat de silice déposé sur le silicium semi-infini, les ondes stationnaires seront beaucoup plus fortes. Ainsi, les points de fonctionnement à étudier dépendent de l'empilement considéré !

Et voici donc ce que j'ai appelé la stratégie du raisonnement inverse. Les outils fournisseurs sont historiquement construits pour la prise en compte d'un seul empilement. La calibration du modèle optique consiste à parcourir ce plan et sélectionner celui dont l'erreur est la plus faible. Mais considérant les incertitudes de mesures sur les structures test, sur les paramètres du procédé, ce point optimal en terme d'erreur est-il le plus représentatif de la physique du système ? La réponse est NON. Bien sur, ces modèles sont tous de même qualité sur les structures de calibration, mais leur domaine de validité ne sera pas le même. Une infinité de modèles dans ce plan auront des erreurs similaires compte tenu des questions d'incertitudes. La sélection prématurée d'un modèle dans les outils fournisseurs est un problème dans les travaux sur la prise en compte des effets d'empilement. Ce modèle ainsi choisi parce que son erreur était de quelques dixièmes de nanomètre inférieure aux autres sur l'empilement unique, n'est peut-être pas prédisposé à la modélisation d'un second type d'empilement. La stratégie du raisonnement inverse que j'ai mise en place dans le cadre de ces travaux n'est pas de sélectionner le meilleur modèle pour un type d'empilement, mais d'éliminer les modèles de mauvaises qualités pour conserver à chaque étape une infinité de modèles qui pourront me permettre de prendre en compte un nouvel effet d'empilement.

La première étape de mon algorithme de construction de modèle est donc l'échantillonnage de la résine, le calcul de la position du meilleur focus pour une seule structure, pour chaque point de la position de l'image dans la résine et l'optimisation du paramètre de dose sur un ensemble de structures sur silicium uniquement. Le graphique figure 5.12 représente le tracé de la courbe obtenue par simulation avec le code Matlab-Panoramic et le simulateur RCWA codé par nos soins.

On retrouve bien les oscillations que nous avons envisagées précédemment dues à la présence des ondes stationnaires. Notre simulateur prédit les oscillations au même endroit que le logiciel Panoramic ce qui est un excellent résultat. Cependant, les amplitudes de ces oscillations ne sont pas correctes, et vu leurs valeurs, c'est le simulateur RCWA qu'il faut remettre en cause. Ici nous soupçonnons un manque de modélisation

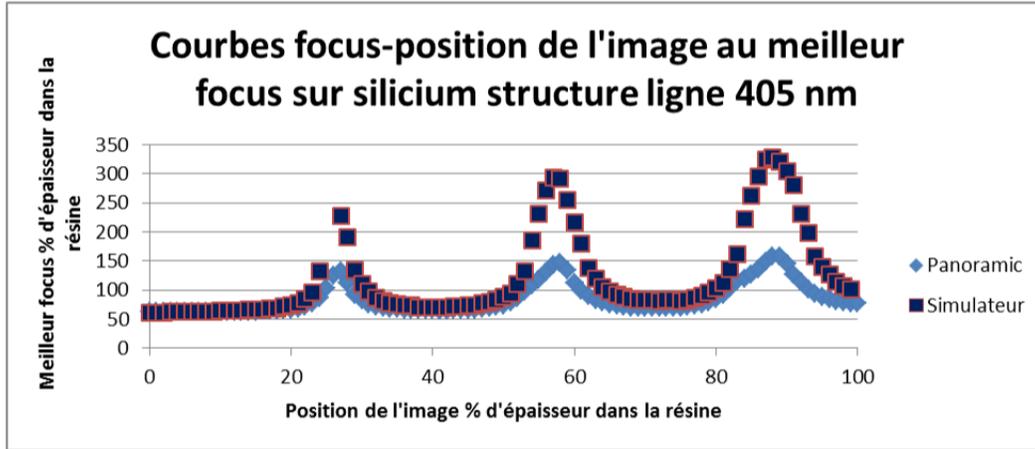


FIGURE 5.12 – Courbes focus-position de l'image avec Panoramic et le simulateur réalisé pendant cette thèse

du comportement de la résine pendant l'exposition lumineuse. Je travaille actuellement sur ce sujet. Lorsque l'on parcourt chacun de ces points pour extraire des dimensions simulées sur un groupe de structures, le simulateur renvoie une erreur minimale d'environ 8-9 nm (moyenne quadratique des écarts entre mesures et simulations) alors que le logiciel Panoramic renvoie une erreur minimale de 4-5 nm. Cette différence n'est pas expliquée aujourd'hui. Cela nous montre que notre simulation est proche du bon résultat mais qu'il reste encore quelques insuffisances à régler.

Notez deux points, à partir du graphique précédent, le 0 de la position de la résine se situe en bas de la résine, on monte dans la résine jusqu'aux 100% au sommet de la résine. On définit l'erreur quadratique comme suit :

$$Erreur = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (CDsim_i - CDm_i)^2} \quad (5.1)$$

où n est le nombre de données simulées, $CDsim$ et CDm les dimensions simulées et mesurées.

Le graphique ci-dessous reporte alors les résultats obtenus en termes d'erreur sur un groupe de 40 structures uni-dimensionnelles sur silicium, 8 lignes isolées, 8 espaces isolés, et 24 structures denses :

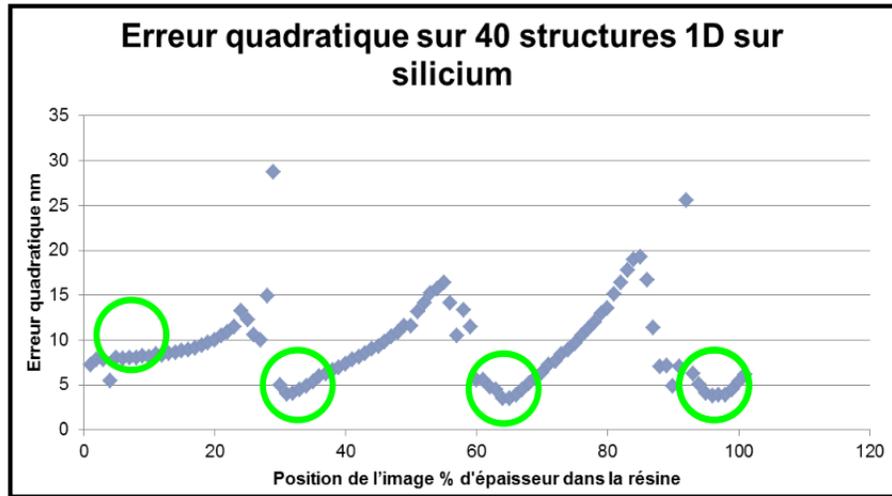


FIGURE 5.13 – Erreur quadratique pour chaque point de la courbe focus-position de l'image

On se rend compte ici qu'il y a quatre zones d'intérêt où la modélisation des 40 structures sur silicium est convenable. On va donc éliminer les autres parties, conservant ainsi quatre intervalles de modèles pour la suite de l'algorithme.

La bonne utilisation des mesures expérimentales

Passons maintenant à la seconde étape de notre algorithme de construction de modèle qui est certainement la plus astucieuse et un élément clé. C'est maintenant que nous allons travailler avec un second empilement, à savoir le substrat uniforme de silice. Faisons le point sur ce que nous savons. Premièrement, l'épaisseur de silice a un impact très important sur les dimensions des motifs simulés. Deuxièmement, l'épaisseur de silice que nous avons grâce à des mesures d'ellipsométrie n'est absolument pas fiable. Troisièmement, nous n'avons fait qu'éliminer les mauvais modèles pour le silicium, on va donc supposer qu'il doit rester parmi notre infinité de modèles, au moins un modèle qui se rapporte à la physique réelle de notre étape de photolithographie et donc qui sera prédisposé à la modélisation des structures sur silice.

Comment travailler avec un paramètre tel que l'épaisseur de silice, à la fois si influant et si incertain ? Et bien cette épaisseur est directement liée à un effet que nous connaissons bien, l'effet d'empilement de type substrat. Nous avons vu précédemment que cet effet s'exprime de deux manières. La première est la sur-exposition de la résine, il s'agit donc ici du paramètre de dose. La seconde est le décalage du paramètre de meilleur focus. C'est à dire que l'écart entre les valeurs de paramètre de meilleur focus sur silicium et sur silice est directement relié à l'épaisseur de silice. La solution est donc la suivante : pour chaque point de nos intervalles de modèles sur silicium sélectionnés précédemment, nous allons optimiser l'épaisseur de silice de sorte que le décalage

de meilleur focus entre les deux substrats en simulation correspond avec le décalage mesuré sur plaque. Nous n'utiliserons qu'une seule structure test mais sur les deux substrats uniformes. Le tableau ci-dessous reporte les meilleurs focus en micromètres mesurés et simulés sur quelques structures. L'algorithme a travaillé sur l'optimisation de l'épaisseur de silice à partir de la structure ligne 405 nm que nous appelons référence.

Structures	Si mesure	SiO2 mesure	Si simulation	SiO2 simulation
Ligne 177 nm	0.001	0.052	-0.001	0.051
Ligne 405 nm ref	-0.002	0.056	-0.001	0.051
Espace 177 nm	-0.026	-0.005	0.001	0.058
Espace 405 nm	x	0.023	-0.002	0.115
réseau 405/810 nm	-0.01	0.043	0.003	0.090

TABLE 5.2 – Décalage du paramètre de meilleur focus de l'effet substrat en mesure et en simulation

On voit ainsi que l'algorithme qui permet l'optimisation de l'épaisseur de la silice a convergé correctement, les deux lignes de résine ont des décalages de meilleurs focus qui correspondent en simulation et en mesure. Cependant, le résultat sur les espaces résine est un peu moins bon et c'est une chose intéressante. On voit très clairement que les deux lignes de résine se comportent de manière similaire en simulation et en mesure sur les deux substrats, mais ce n'est pas le cas des espaces. Cela vient du fait que le décalage du meilleur focus vient de la réponse optique de l'empilement sur lequel la structure se tient. Or pour une ligne, une large région de substrat est directement illuminée, mais pour un espace, seul la région définie par cet espace est directement illuminée, donc la dimension de cet espace joue un rôle important dans le décalage du meilleur focus, et cela bien sûr davantage sur silice que sur silicium.

À cette étape nos modèles sont constitués de quatre valeurs, le focus, la position de l'image, la dose et l'épaisseur de silice. Chaque point des intervalles échantillonnés que nous avons récupérés de la première étape sont maintenant à nouveau testés avec 40 structures unidimensionnelles mais sur silice cette fois. Une nouvelle étude de l'erreur quadratique permet d'éliminer à nouveau une partie des modèles. Voici un exemple de résultats obtenus dans la zone d'intérêt (erreur faible) de la résine à 65% de l'épaisseur, sans la valeur de l'épaisseur de silice pour des raisons de confidentialité :

Position image % silicium	Focus %	Dose	Erreur silicium nm	Position image % silice	Épaisseur silice	Erreur silice nm
64.8	75.8878	4.6875	3.8881	103.1423	X	7.7286
64.9	75.6852	4.6094	4.1132	102.8452	X	6.8275
65	75.5039	4.586	3.8727	102.5934	X	6.7366
65.1	75.2758	4.5313	4.0305	101.9464	X	6.7254
65.2	75.1173	4.4688	4.07	99.9623	X	6.8444
65.3	74.913	4.4219	4.0572	98.8253	X	6.939

TABLE 5.3 – Recherche d'un modèle pour les deux substrats uniformes

On a ici une valeur pour la position de l'image pour le substrat de silice mais ce paramètre ne fait pas parti de notre modèle, tout du moins il s'exprime déjà à travers les autres paramètres. La position de l'image pour substrat silicium couplée à la position du focus induira un décalage en cas de changement de substrat. Dans cette zone d'intérêt, le meilleur modèle est à 65,1% de l'épaisseur de la résine. Rappelons qu'on trouve quatre zones d'intérêt de ce type lorsque l'on parcourt la résine de 0% à 100%. Par la suite, nous avons beaucoup travaillé sur la calibration d'autres paramètres optiques, type signaux parasites que l'on appelle le "flare" en photolithographie, et sur des paramètres de modèle résine. Mais d'optimisation en optimisation, nous avons réussi à quasiment annuler l'impact des paramètres résine sur l'erreur globale, ce qui est un résultat intéressant puisque nous avons donc un modèle purement optique sans paramètre mathématique pour capturer une erreur résiduelle.

Les limites techniques de Matlab-Panoramic

Finalement, cette technique prometteuse a été mise à mal pour des raisons de ressources temporelles et informatiques. Le lecteur se sera sûrement demandé pourquoi les optimisations se sont faites uniquement sur des structures uni-dimensionnelles. C'est parce que nos ressources ne nous permettaient pas de travailler avec des systèmes plus complexes. Notons que si notre algorithme est intéressant sur le plan de la précision, pour la construction d'un modèle physique, il est cependant basé sur un nombre de simulations très important. Par exemple, si l'on souhaite échantillonner convenablement la résine pour le tracé de la courbe focus-position de l'image, il faut au moins 200 points. Ajouter à cela, 5 simulations minimums pour le tracé des courbes de Bossung nous sommes à 1000 simulations. Ensuite, pour chaque point, il faut une erreur sur 40 structures donc à nouveau 80000 simulations. Mais le logiciel Panoramic étant rapide, ce ne fut pas le problème principal. Nous avons commencé à travailler sur ces difficultés qu'une fois notre propre simulateur réalisé. En effet, notre gestion notamment de la source optique, ne nous permettait pas d'être aussi rapide que Panoramic. Ce sont les simulations des structures sur des empilements contenant des transitions qui nous ont limités avec Panoramic. Dans ce cas par contre, les simulations sont extrêmement longues compte tenu de nos ressources informatiques.

Pour continuer à travailler avec la même philosophie du raisonnement inverse, il nous aurait fallu optimiser de nouveaux paramètres pour la prise en compte des effets de transition. Par exemple, compte tenu de l'allure de la courbe de l'effet de transition silicium/silice, on comprend vite qu'une incertitude sur le placement de la transition peut induire une erreur très importante sur la dimension résine finale. Le paramètre de premier ordre doit donc être un paramètre de correction de la distance, puis en second ordre l'inclinaison de la pente de la transition silicium-silice. Cependant, nous avons calculé à ce moment là que plus d'un mois de simulation aurait été requis avec nos ressources disponibles.

Malgré cela nous avons quand même effectué des simulations sur des structures contenant des effets d'empilement de type transitions :

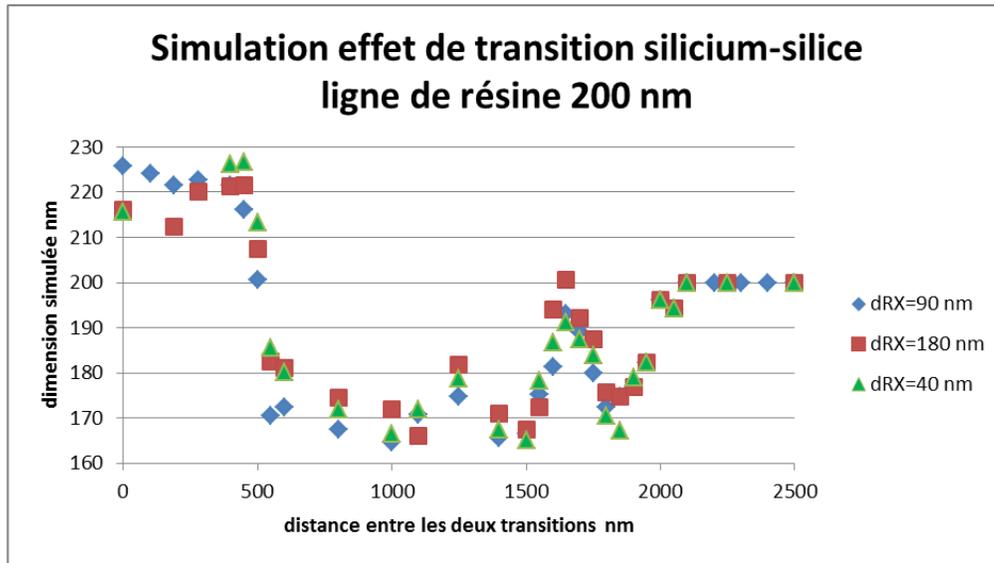
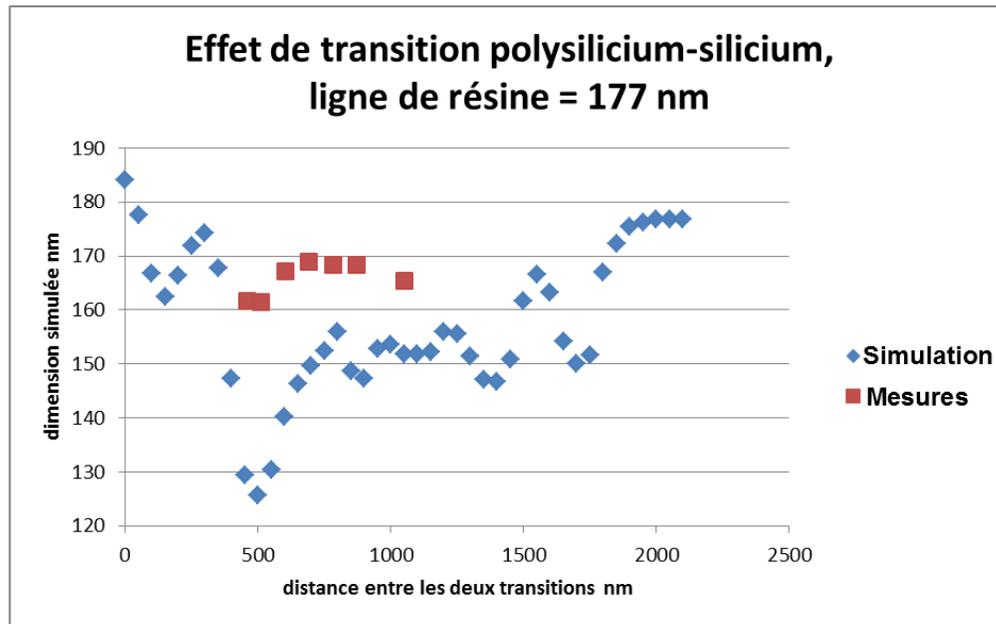


FIGURE 5.14 – Simulation de l'impact de la transition silicium-silice sur une ligne de résine de 200 nm, pour plusieurs largeurs des lignes de silicium dRX.

Ici nous avons optimisé la dose pour que la dimension de la résine soit de 200 nm lorsque les transitions sont assez éloignées, ce qui n'est pas correct au sens où nous savons que lorsque les transitions sont très loins on ne retrouve pas la situation d'une ligne de résine sur substrat de silice. Mais pour essayer de le prendre en compte, il nous faudrait modifier en même temps l'épaisseur de silice ce qui rendrait la simulation beaucoup trop lourde. On peut observer plusieurs choses sur ce résultat de simulation. Premièrement, l'allure de la courbe correspond à nos résultats de mesures. Deuxièmement, le début de la courbe est au dessus des 200 nm, on retrouve le masquage de l'effet substrat. Troisièmement, il y a deux remontées de la dimension sous forme de pics de dimension qu'on ne retrouve pas sur les mesures. Mais sur les mesures on remarque une remontée de la dimension de la ligne par palier, ce qui s'en rapproche. Enfin, et c'est important, nous avons affirmé avoir optimisé la dose pour que la ligne de résine fasse 200 nm lorsque les transitions sont très éloignées. Nous l'avons fait sur le dernier point, c'est à dire avec une distance résine-transition de 2500 nm moins 200 nm le tout divisé par deux (l'abscisse reporte la distance entre les deux transitions) donc 1150 nm. Or les points qui précèdent ont déjà convergé à la référence. La simulation ne voit plus d'effet de transition à partir d'une distance résine-transitions d'environ 850 nm. Cela pourrait sous-entendre qu'après 850 nm, l'écart mesuré entre la structure avec des transitions lointaines et la structure de référence ne serait dû qu'à un problème de topographie. Dernier point, la simulation ne voit pas non plus de dimension égale à zéro dans la zone de plus forte influence. On peut donc penser que la disparition de la résine est davantage due à son effondrement qu'à un développement complet. Mais attention, cette simulation est basée sur un modèle dont la précision est remise en question !

Regardons par exemple l'écart entre les mesures et la simulation pour une structure ligne de résine affectée symétriquement par des transitions polysilicium-silice :



L'algorithme actuel

L'illustration ci-dessous représente l'algorithme tel qu'il est utilisé aujourd'hui, en attendant le développement d'un module d'optimisation des paramètres des effets de transitions :

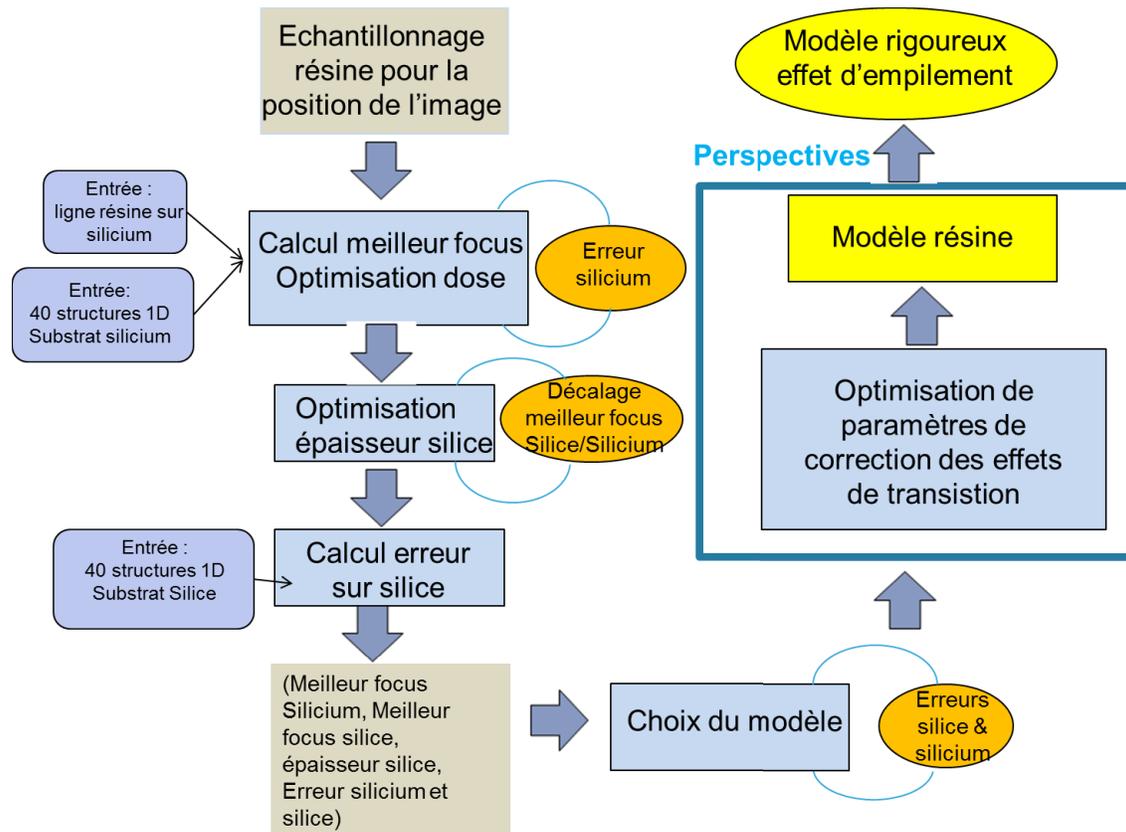


FIGURE 5.16 – Représentation de l'algorithme de construction de modèle

Que nous a-t-il apporté ?

Le logiciel professionnel Panoramic, couplé avec le langage de programmation matlab, nous a permis d'établir les bases de l'algorithme de construction de modèles. Il a également servi de support à notre apprentissage de la modélisation de la photolithographie optique. Finalement, nous avons dû développer notre propre simulateur pour plusieurs raisons. Tout d'abord, le logiciel Panoramic est fait pour l'étude de la photolithographie au sens large voire même pour l'étude de la diffraction. De ce fait, son fonctionnement n'est pas toujours parfaitement adapté à nos effets d'empilement. Nous rencontrons des difficultés avec le temps de simulation et la mémoire requise pour ces calculs compte tenu des ressources que nous avons. De plus, une dernière partie de mes travaux doctoraux qui sera présentée dans le prochain chapitre correspond à l'application d'une méthode de résolution des équations de Maxwell à la modélisation

du procédé de photolithographie optique. Or, cette application n'a jamais été effectuée auparavant. Il nous faut donc un moyen de comparaison avec une méthode de simulation classique et connue pour s'assurer du bon fonctionnement de cette méthode. C'est le rôle que va jouer le simulateur RCWA car la RCWA et la méthode que nous allons développer doivent donner les mêmes résultats. Ceci donne deux intérêts supplémentaires aux travaux qui ont été réalisés avec le simulateur Matlab-Panoramic. Le premier est qu'il va nous servir de référence pour évaluer les résultats du simulateur RCWA. Le deuxième est qu'il m'aura servi d'intermédiaire dans le développement de mes simulations. J'aurais pu apprendre à faire des simulations et à anticiper pas mal de problèmes avant de coder mon propre simulateur.

5.3.3 La réalisation du simulateur RCWA

Nous nous proposons dans cette section de parler brièvement du simulateur RCWA encore en cours de développement au moment où j'écris ce manuscrit. Ce simulateur a été source de nouvelles difficultés techniques mais surtout de nouvelles questions qui m'ont permis d'améliorer mes connaissances de la modélisation du procédé de photolithographie optique. Ce fut l'occasion de mettre en place une structure de simulation plus adaptée à nos besoins.

Des difficultés techniques supplémentaires

Cette fois-ci, il a été nécessaire de tout coder du début à la fin. Les fonctions de bases du simulateur, à savoir l'application de la méthode RCWA au réticule puis au substrat et le calcul des images aériennes et latentes ont été réalisées au laboratoire avec mon directeur de thèse. Nous avons également défini ensemble les formats d'entrées et sorties des paramètres clés de la modélisation. Il a fallu gérer beaucoup de détails préalablement traités par le moteur Panoramic comme la normalisation des images, la gestion de la taille des cellules élémentaires, la combinaison des images de chaque point source, la définition de la source, le maillage de la source, etc. Cela a été assez compliqué de gérer toutes les situations possibles pour que les algorithmes d'extraction de seuil ou d'optimisation ne tombent pas dans des boucles infinies.

Différentes versions du simulateur ont été réalisées mais je suis généralement passé d'une version à la suivante lorsque les multiples ajouts de fonctions ont généré des instabilités dans le simulateur.

Une structure plus adaptée

À partir de ces fonctions, j'ai réalisé un simulateur sans interface graphique qui permet la réalisation des actions suivantes :

- la lecture d'un unique fichier contenant les informations du procédé lithographique et les structures à étudier ;

- la classification des structures en catégories pour permettre l'optimisation des paramètres sur un ensemble de données spécifiques ;
- le lancement d'une simulation au choix sur le réticule uniquement, ou réticule et substrat ;
- la lecture des fichiers d'une simulation précédente pour éviter de réeffectuer les calculs rigoureux mais utiliser un nouveau type d'optimisation de paramètres ;
- l'interrogation d'une base de données pour éviter de doubler les simulations. Par exemple, une même structure sur deux empilements différents ne sera simulée qu'une seule fois au niveau réticule et deux fois au niveau substrat ;
- l'optimisation d'un paramètre de dose sur la catégorie de données choisie au niveau choisi (réticule ou plaque) ;
- le choix de la normalisation à effectuer et du type de gestion de la source ;
- l'écriture des résultats dans un fichier texte ;
- la recherche du meilleur focus.

Un approfondissement de la modélisation

Mais surtout le plus grand intérêt que j'ai trouvé dans la réalisation de ce simulateur en dehors de l'apprentissage du langage C++, c'est l'approfondissement que cela m'a demandé dans la compréhension de la modélisation du procédé lithographique. La gestion de la source par exemple n'a jamais été un problème avec le simulateur Matlab Panoramic. Dans mon propre simulateur, il a fallu réfléchir au maillage de la source, à la combinaison des images, à l'approximation des points sources non rigoureusement calculés, etc. Comprendre les insuffisances de mon simulateur m'a poussé à faire des recherches plus poussées dans la littérature et aussi à mieux comprendre la simulation de la propagation des ondes lumineuses.

5.3.4 Discussion

J'aimerais dans ce paragraphe donner mon opinion concernant l'importance des algorithmes de construction de modèles. Ce mode de fonctionnement s'est présenté naturellement dans ces travaux pour des raisons évidentes, lorsqu'il m'a fallu remplir les cases du simulateur par des valeurs physiques. La modélisation peut se résumer à déterminer un ensemble d'équations, de paramètres et de conditions limites donnant une description mathématique d'un phénomène physique donné. Mais ces modèles peuvent prendre des formes diverses et variées influençant fortement les moyens à mettre en œuvre pour fournir des prédictions suffisamment précises, c'est à dire utilisables sur le plan industriel. C'est donc la raison pour laquelle nous utilisons des modèles empiriques

ou semi-rigoureux et des modèles approchés plutôt qu'exactes. Alors on pourrait penser que la solution clé est de travailler avec des modèles rigoureux exacts et des ressources informatiques très grandes (en supposant les modèles rigoureux valides évidemment, un modèle de mécanique classique appliqué à la physique subatomique ne donnera jamais de bons résultats quelles que soient les ressources utilisées). Et pourtant cela ne fonctionnerait pas ! En effet, ces modèles en admettant qu'ils soient basés sur des théories suffisamment approfondies ont tout de même besoin en entrée de paramètres mesurés. C'est à dire que quand bien même les équations de Maxwell fournissent une meilleure description des phénomènes optiques en photolithographie que les équations d'Hopkins dont les approximations sont dépassées, il faut quand même fournir en entrée une description de la source, des indices optiques de matériaux, des épaisseurs de matériaux, etc, qui dépendent de moyens de mesure comportant des incertitudes. Aucune mesure n'est absolue ! L'algorithme de construction de modèle est une solution possible à ce problème. En sélectionnant des mesures appropriées on peut affiner les valeurs théoriques des paramètres dans la limite de l'incertitude de ces mesures comme nous l'avons fait avec l'épaisseur de silice sous la résine. Mais une autre difficulté, rapidement abordée dans ce manuscrit subsiste alors. Quand bien même nous aurions à disposition une mesure absolue des paramètres physiques d'une exposition lumineuse sur une plaque de silicium, comment prendre en compte la variabilité de ces paramètres d'une expérience à l'autre ? Est-il envisageable demain avec des ressources informatiques et techniques illimitées de construire un modèle par plaque de silicium exposée ? Nous arrivons ici à une limite. Si nous continuons à avoir besoin d'une plus grande précision sans pour autant réduire les incertitudes sur les paramètres physiques du procédé, il faudra utiliser des modèles qui s'adaptent à cette problématique. Ils seront donc plus lourds à mettre en place et on n'aura encore besoin de choisir entre la précision et la vitesse de simulation.

5.4 Conclusion

Après avoir étudié le comportement des effets d'empilement par la voie expérimentale, ce chapitre a abordé la question du traitement de ces effets ou phénomènes. Les effets d'empilement, très importants à l'étape d'implantation des sources et drains des transistors qui n'utilise généralement pas de couche anti-reflet, ne peuvent plus être négligés en dessous du nœud technologique 45 nm. Les premières manifestations dans la littérature des effets d'empilement sont généralement liées à des problèmes de topographie après l'étape de polissage mécanico-chimique de la couche de silice.

Il existe de nombreux moyens pour limiter les effets d'empilement. Nous avons vu que l'optimisation des paramètres du procédé lithographique, comme l'illumination ou l'épaisseur de résine, peut permettre de minimiser ces effets sans pour autant les annuler. Nous avons pu effectuer des mesures d'effets d'empilement pour plusieurs épaisseurs de résine sur plaque. Le gain potentiel sur l'effet d'empilement peut s'élever à 60 nm sur une ligne de résine dégradée de part et d'autres par des transitions de matériaux. L'amélioration du procédé par ajout d'une couche anti-reflet développable permet une réduction drastique des effets d'empilement, mais qui subsistent encore dans des proportions qui laissent à penser que d'autres niveaux des technologies d'aujourd'hui ou de demain sont concernés. Nous avons démontré par des mesures expérimentales que

l'utilisation d'une couche anti-reflet permet une réduction de la globalité des effets d'empilement. Les effets de masquage et de topographie semblent tout autant réduits que les effets de substrat et de transition. Une dernière possibilité consiste à modéliser les effets d'empilement pour les anticiper et les corriger. C'est le choix qui a été fait dans le cadre de cette thèse.

Il existe dans la littérature de nombreuses modélisations des effets d'empilement, en passant de simple carte d'erreur de focus en fonction de la densité des motifs de silice et silicium, à la simulation rigoureuse en trois dimensions de la propagation de la lumière issue de l'exposition. Au démarrage de cette thèse, nous avons testé certains outils de simulation avec notamment le système d'exposition secondaire de Mentor Graphics. Nous avons alors réussi à diminuer l'erreur due aux effets d'empilement entre les structures mesurées et les structures simulées. Mais la complexité des effets que nous avons de par leurs amplitudes, la combinaison de trois matériaux silice-silicium-polysilicium, et l'utilisation de la technologie FDSOI est trop importante. Nous avons alors pris part à des projets de développement d'outils de prise en compte des effets d'empilement avec nos fournisseurs. Mon rôle a été de fournir les données expérimentales bâties à partir des protocoles présentés dans le chapitre précédent, et de fournir une expertise sur le comportement des effets d'empilement.

De notre côté, nous avons développé l'algorithme de construction de modèles qui, basé sur l'utilisation de données mesurées précises et la stratégie du raisonnement inverse, a permis de réaliser des modèles très performants sur les structures uni-dimensionnelles sur substrat uniforme. Nous avons été amenés à développer notre propre outil de simulation pour palier la complexité de nos situations, outil encore en développement aujourd'hui.

Les perspectives de ce chapitre sont multiples. Tout d'abord, de nombreux moyens de modélisation des effets d'empilement ont été développés avec chacun leur avantages et inconvénients en termes de précision, de complexité, de vitesse de calcul. Il faudrait reprendre ces outils et évaluer leur potentiel avec l'expertise que nous avons aujourd'hui sur les effets d'empilement et tenter la réalisation d'une abaque qui permettrait à n'importe quel responsable de niveau de photolithographie affecté par les effets d'empilement de choisir le mode de correction souhaitable en fonction de ses ressources et de son budget d'erreur. Couplé avec les fichiers de structures de test pour l'évaluation systématique des effets d'empilement présentés aux chapitres précédents, cela pourrait constituer un outil global de gestion des effets d'empilement en photolithographie optique. Une autre perspective importante est de finaliser l'algorithme de construction de modèle et, mieux que de proposer un algorithme, il faudrait que le simulateur puisse proposer un ensemble de module d'optimisation de paramètres basés sur un nombre restreint de mesures, que l'utilisateur pourrait agencer à sa guise pour bâtir son propre modèle, et pas nécessairement pour des effets d'empilement. Une dernière perspective enfin, utiliser mon simulateur pour tester des idées novatrices comme l'utilisation de réticules définis en niveau de gris par exemple.

Chapitre 6

L'application de la méthode des sources généralisées

Introduction

Nous voici arrivés au dernier chapitre de ce manuscrit après un chapitre d'étude expérimentale des effets d'empilement et un chapitre de prise en compte de ces effets par la modélisation. Nous avons maintenant une bonne expertise des effets d'empilement et nous avons trouvé le moyen de réaliser des modèles de qualité. Cependant, une difficulté subsiste lorsque l'on aborde la question de la simulation rigoureuse, c'est celle des ressources. En effet, si la simulation rigoureuse n'est pas ou peu utilisée aujourd'hui pour la correction des réticules du procédé de photolithographie optique c'est parce que le temps de simulation nécessaire et la mémoire requise pour mener à bien ces simulations sont trop importants pour une application industrielle. Nous avons donc la connaissance physique, le modèle, il ne reste plus qu'à nous doter d'un moyen de calcul adéquat.

Ce chapitre se consacre à l'application de la méthode dite "des sources généralisées" à la modélisation du procédé de photolithographie. Cette méthode rigoureuse de résolution des équations de Maxwell permet grâce à une formulation mathématique astucieuse du problème, de réduire considérablement le temps de calcul et la mémoire nécessaires à la simulation de bon nombre de problèmes optiques. Dans ce chapitre, nous aborderons donc le principe de la méthode. Nous expliquerons quelles sont les raisons qui font de cette méthode, équivalente aux méthodes classiques de résolution des équations de Maxwell en termes de précision, une méthode rapide et économe en mémoire informatique. Nous effectuerons, en termes de précision, une comparaison avec la méthode classique et connue RCWA, puis nous montrerons le gain en vitesse et mémoire obtenus pendant ces travaux de thèse.

6.1 La méthode des sources généralisées

La méthode des sources généralisées est une méthode modale. En se basant sur une formulation mathématique astucieuse du problème, elle permet un gain en vitesse de calcul et consommation mémoire [54] [3].

6.1.1 Le principe de la méthode

La méthode des sources généralisées est une méthode exacte de résolution des équations de Maxwell. Le principe de la méthode des sources généralisées est de décomposer le problème à résoudre comme la superposition de deux problèmes distincts. Le premier problème doit être simple et posséder une solution analytique qui sert de départ à la méthode. Le second problème est la différence entre le problème à résoudre et le problème simple. Il contient les modifications de permittivités. La figure ci-dessous illustre ce principe sur un empilement de couches minces :

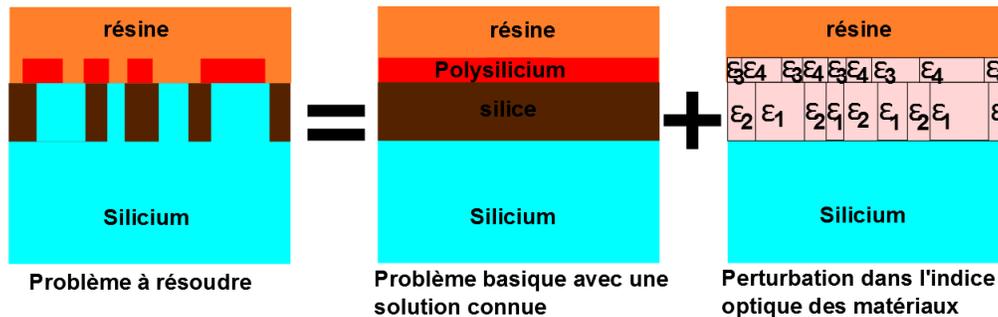


FIGURE 6.1 – Principe de la méthode des sources généralisées

L'application de cette méthode devra se faire deux fois dans le cas de nos travaux de thèse, la première fois au niveau du réticule, la seconde au niveau du substrat. Cette décomposition du problème permet de ramener la description du système à un système d'équations linéaires formulé comme le produit de matrices de Toeplitz et de matrices diagonales. Le système sera traité par des algorithmes rapides basés sur la transformée de Fourier rapide et la méthode de minimisation du résidu GMRES. De plus, la résolution de ce type de problème avec une méthode type RCWA induit la diagonalisation de matrices, ce qui ne peut pas se faire en calculs parallèles. La méthode des sources généralisées quant à elle est basée sur l'inversion de matrice. Nous avons donc ici une méthode de résolution directe des équations de Maxwell par voie itérative, dont les calculs se basent sur des produits de matrice particulière de type Toeplitz et de type diagonale, et sur l'inversion de matrice plutôt que la diagonalisation. Ceci va nous permettre d'effectuer les calculs en parallèle sur plusieurs cartes graphiques.

6.1.2 Le paramètre de résolution de la méthode

Une méthode modale

On va donc traiter notre problème comme une modification de l'indice de réfraction des couches minces de l'empilement au niveau du substrat ou du réticule. Pour pouvoir

résoudre le problème dans le domaine de Fourier, nous allons périodiser les structures en deux dimensions et décomposer la fonction d'indice optique des couches minces comme la somme des termes d'une série de Fourier. Le nombre de termes que nous allons conserver dans nos calculs va correspondre à notre paramètre de résolution, qui se nomme le nombre d'ordre de diffraction No (différent des ordres de diffraction physiques). Les méthodes modales classiques type RCWA ont des temps de calculs et des besoins mémoires qui évoluent avec ce nombre d'ordres de diffraction au cube, alors qu'avec la méthode GSM (generalized source method), ces paramètres évoluent linéairement avec No . Ainsi, pour une structure bi-dimensionnelle, la RCWA présente une complexité en No^6 et la méthode GSM une complexité en No^2 . C'est à travers la variation de ce paramètre de résolution que nous allons étudier les besoins en temps de simulation et mémoire de la méthode GSM. Mais dans un premier temps observons l'évolution de la prédiction de la simulation en fonction du nombre d'ordre de diffraction.

La résolution de la méthode

Nous nous proposons de reprendre le motif circuit présenté dans le chapitre précédent dans la partie des résultats de simulation des outils fournisseurs, et de regarder l'évolution de la simulation en fonction du nombre d'ordres de diffraction :

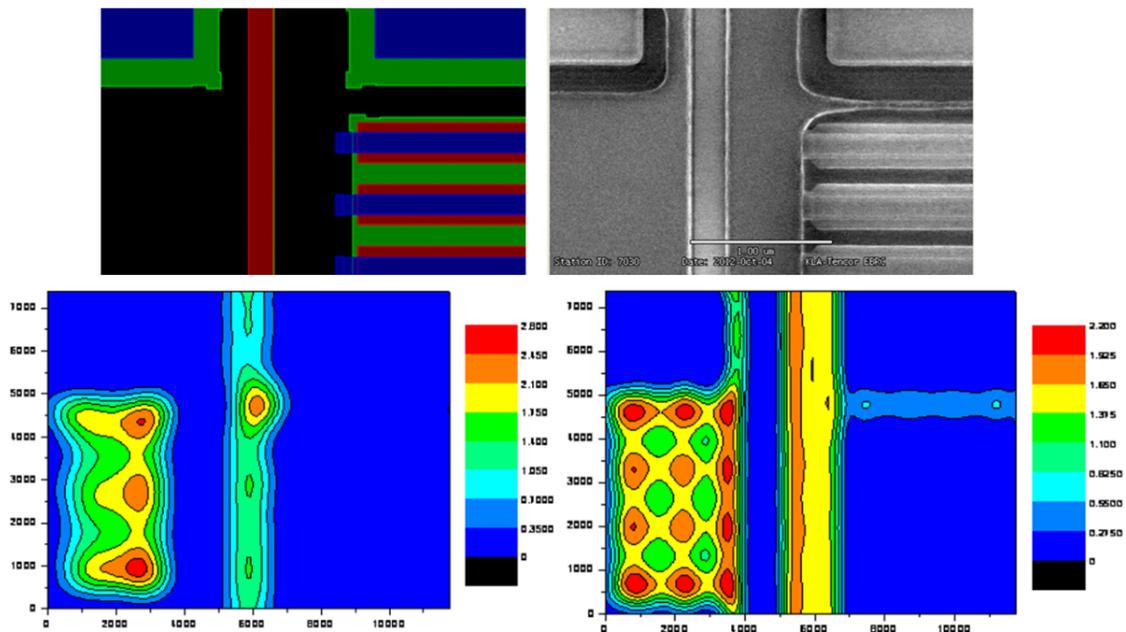


FIGURE 6.2 – Images aériennes obtenues par simulation GSM en fonction de No . A gauche $No=10 \times 10$, à droite $No=50 \times 50$.

Ces images mettent en évidence l'impact du paramètre de résolution No . Ces images sont issues d'une simulation au niveau du réticule uniquement. On reconnaît bien pour $No=50 \times 50$, les motifs de l'image SEM. On montre ainsi qu'une des questions essentielles qu'il faudra se poser pour une utilisation de cette méthode dans le cadre des techniques de correction des effets de proximité, est de trouver le bon compromis entre la précision souhaitée sur la simulation et le temps de simulation.

6.2 Application de la méthode à la lithographie optique

Une partie des travaux réalisés dans le cadre de cette thèse a été de travailler sur l'application de la méthode des sources généralisées à la modélisation du procédé de photolithographie optique. La question implicite qui est posée ici est de savoir si le gain en vitesse de simulation et consommation mémoire peut permettre d'envisager l'utilisation de la simulation rigoureuse dans les techniques de correction des effets de proximité optique, en prenant en compte bien entendu le gain en précision par rapport aux méthodes actuelles. On ne peut pas immédiatement comparer une simulation fournisseur sur une puce complète avec la GSM car la mise en place de cette nouvelle méthode pour une simulation aussi grande demanderait un effort technique qui sort du cadre de nos travaux. Nous allons donc comparer la GSM avec la méthode de référence bien connue qu'est la RCWA.

6.2.1 Comparaison de précision RCWA et GSM

Avant de comparer les vitesses de simulation et consommation mémoire des deux méthodes, il faut s'assurer qu'elles renvoient un résultat similaire sur nos circuits. Nous avons développé au cours de ces trois années plusieurs méthodes. En effet nous avons besoin d'une simulation de type RCWA uni-dimensionnelle pour l'algorithme de construction de modèle et une méthode GSM bi-dimensionnelle rapide pour les morceaux de circuit. Nous avons donc réalisé un ensemble de codes intermédiaires, RCWA 2D, RCWA 2D avec transformée de Fourier rapide (FFT), RCWA 2D FFT avec le formalisme mathématique similaire à celui utilisé dans la GSM, pour préparer la validation de nos codes. Ainsi, la comparaison en termes de précision a été faite entre les deux méthodes bi-dimensionnelle avec le même formalisme mathématique. Il y a eu une phase de correction des codes très importante qui s'est basée sur l'interprétation des résultats de simulation sur des structures particulières type carré parfait. Finalement, on étudie le résultat de simulation sur le morceau de circuit suivant :

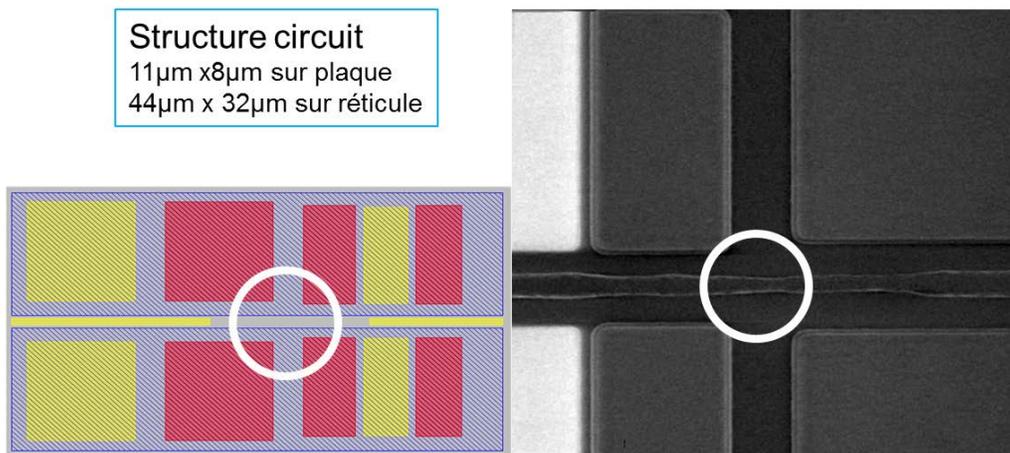


FIGURE 6.3 – Circuit à l'étape d'implantation des sources et drains utilisé pour la comparaison des résultats de simulation RCWA et GSM. Le silicium est en jaune, le polysilicium en rouge.

Ce circuit est composé de motifs de silicium en jaune et de polysilicium en rouge. En dehors de ces deux matériaux, nous sommes sur de la silice. La partie violette correspond à l'ouverture de la résine. Une ligne de résine traverse le circuit de gauche à droite. On voit sur l'image obtenue par microscopie électronique à balayage que la ligne de résine est affectée par les effets d'empilement.

On effectue alors une simulation avec les deux méthodes RCWA et GSM. On obtient alors avec une résolution de 32 ordres pour chaque dimension les images latentes suivantes :

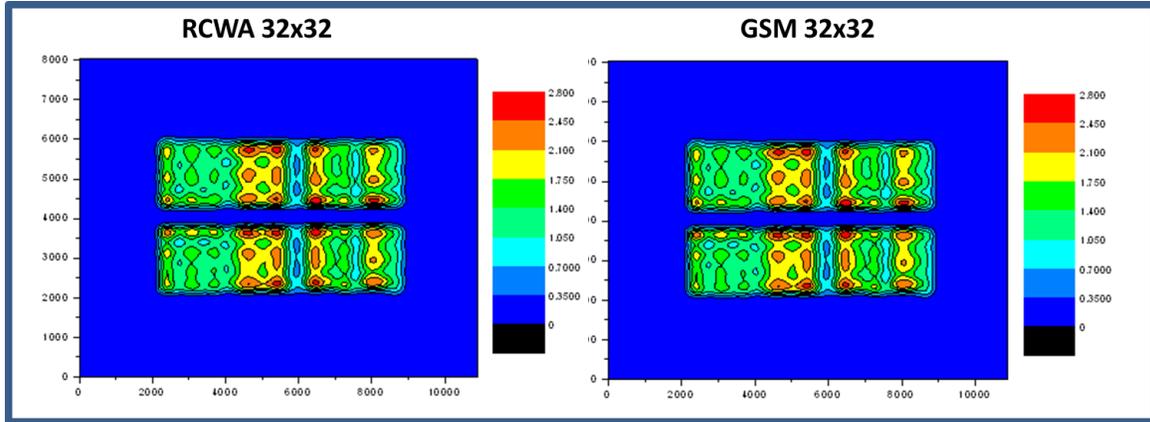


FIGURE 6.4 – Circuit à l'étape d'implantation des sources et drains utilisé pour la comparaison des résultats de simulation RCWA et GSM.

Sur ces images, aucune différence n'est visible à l'oeil nu. Nous avons donc évalué l'erreur maximale en termes d'intensité lumineuse sur les images latentes obtenues :

$$Max\left\{\frac{|I_{GSM32}(x, y) - I_{RCWA32}(x, y)|}{I_{RCWA32}(x, y)}\right\} < 0,1\% \quad (6.1)$$

Pour les deux images latentes obtenues précédemment, l'écart maximal que l'on peut trouver en termes d'intensité à un point de maillage dans la résine fixé est de 0,1%. On peut donc conclure ici que les deux méthodes donnent des résultats identiques et que nous avons rempli l'objectif d'avoir une méthode des sources généralisées valide. Maintenant que nous sommes certains que les deux méthodes renvoient des résultats cohérents l'une avec l'autre, nous pouvons comparer leurs temps de simulation et leurs consommations mémoire.

6.2.2 Etude du temps de simulation et de la consommation mémoire

Utilisation du calcul parallèle sur carte graphique

Nous voici donc prêts à mener une étude comparative entre les deux méthodes pour évaluer le gain en temps de simulation et consommation mémoire de la GSM par rapport à la RCWA. Cependant, une nouvelle donnée va entrer en compte ici. Pour pouvoir bénéficier de l'aspect parallélisable des calculs de la méthode des sources généralisées, le laboratoire a développé des codes pour travailler sur un ensemble de cartes graphiques.

Nous allons donc ajouter ce nouveau mode de fonctionnement à notre étude. Nous utiliserons un ordinateur équipé d'un processeur Intel Core TMI7-3820 CPU 8 core @ 3,60 GHz et d'une carte graphique NVIDIA GeForce GTX680.

Etude du temps de simulation au niveau du réticule

On commence par la simulation du circuit au niveau du réticule. Sur le graphique ci-dessous sont représentées les trois méthodes utilisées à savoir la RCWA, la GSM et la GSM sur carte graphique. On trace à chaque fois le temps de simulation pour une onde transverse électrique issue de la source optique du système de photolithographie en fonction du nombre d'ordres de diffraction choisis.

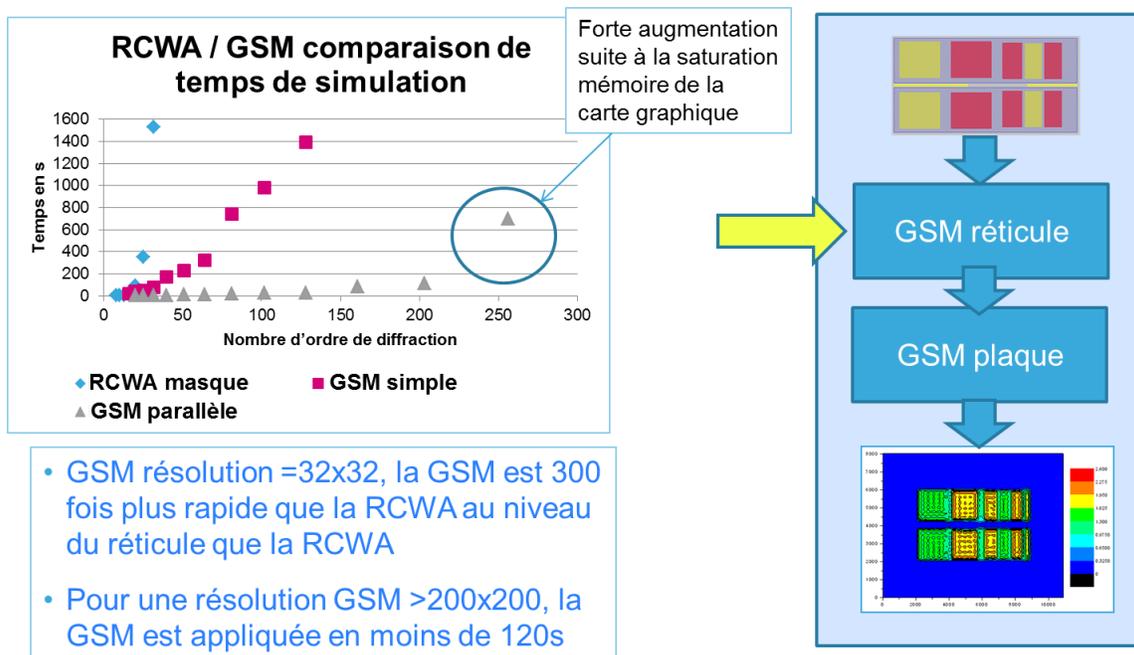


FIGURE 6.5 – Temps de simulation au niveau du réticule.

Pour une résolution de 32x32 ordres la GSM sur une seule carte graphique simule 300 fois plus vite que la méthode RCWA classique. Il y a deux éléments essentiels à noter ici. En plus du facteur 300, on aurait pu utiliser plusieurs cartes graphiques et ainsi encore diviser le temps de simulation de la GSM parallélisée. Ensuite, ce facteur est valable pour une seule onde transverse électrique. Même si l'on échantillonne la source optique et qu'on ne fait la simulation que sur un sous-ensemble de points représentatifs, il faudra faire l'opération sans doute plusieurs dizaines de fois. Même avec une résolution de 200x200 ordres, la méthode des sources généralisées parallélisées permet encore d'effectuer la simulation en seulement deux minutes. Notez que la courbe correspondante monte très fortement à partir de 256x256 ordres. On vient de saturer la mémoire de la carte graphique, le processeur de l'ordinateur est alors contraint de prendre la relève, ce qui engendre un ralentissement de la vitesse de simulation. Cependant, il suffirait d'utiliser une seconde carte graphique pour que la courbe retrouve sa tendance linéaire de départ jusqu'à saturation de la seconde carte graphique.

Etude du temps de simulation au niveau du substrat

Nous pouvons maintenant poursuivre la simulation. En effet, la simulation au niveau du réticule a généré un ensemble de fichiers contenant les amplitudes des ordres diffractés de l'onde incidente en sortie du réticule. Ces fichiers vont être lus puis utilisés pour la seconde étape. A nouveau, on trace le temps de simulation pour les trois méthodes, sur la figure ci-dessous :

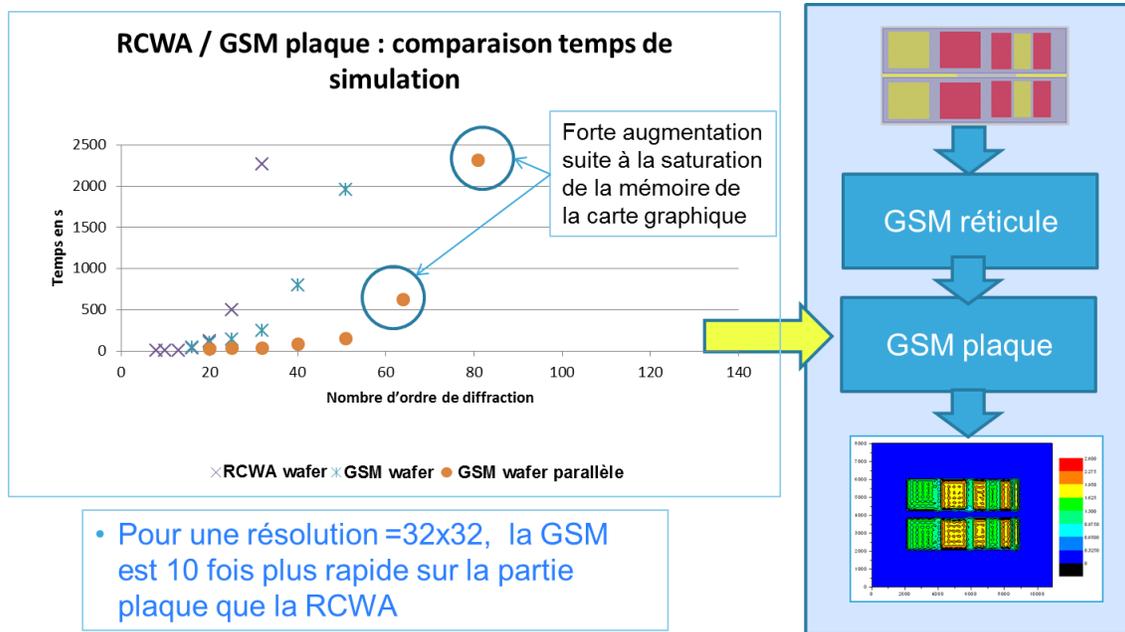


FIGURE 6.6 – Temps de simulation au niveau du substrat.

Même si les tendances sont très similaires aux résultats précédents, cette fois-ci le gain en vitesse n'est que d'un facteur 10. Ce résultat est particulièrement intéressant. En effet, la méthode des sources généralisées a des difficultés à être vraiment efficace au niveau substrat parce que le préconditionnement matriciel du système linéaire à résoudre rencontre des difficultés si ce système est constitué de matériaux à fort coefficient d'absorption, comme c'est le cas avec le silicium et le polysilicium. Ce qui est intéressant, c'est que cette situation est aussi valable pour le réticule. Un des matériaux du réticule est aussi constitué d'un matériau qui limite la vitesse de résolution du système. Ceci implique que le facteur 300 n'est pas représentatif du potentiel de la méthode. Le laboratoire a développé des solutions à ce sujet dont il faudra évaluer le gain.

Etude de la consommation mémoire

Observons maintenant dans les mêmes conditions l'évolution de la consommation mémoire de la méthode RCWA et de la méthode GSM standard :

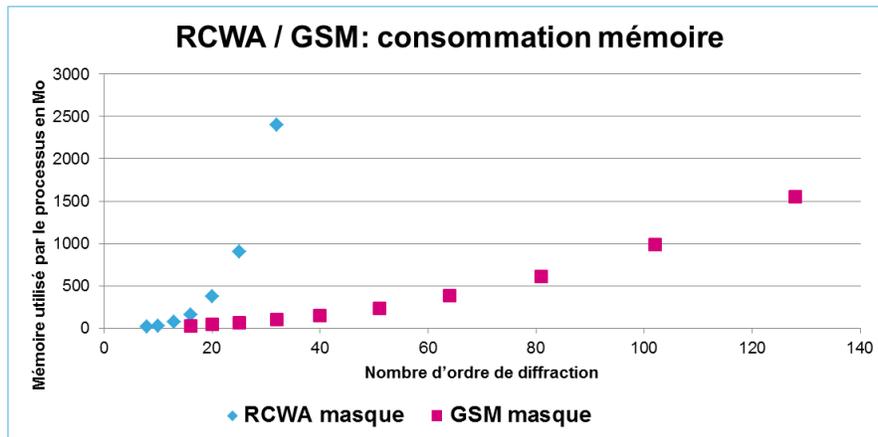


FIGURE 6.7 – Consommation mémoire de la simulation au niveau du substrat.

Ici on n'a pas la courbe de consommation de la mémoire pour la GSM parallélisée parce que nous avons relevé les points en lisant la mémoire utilisé par notre programme depuis le gestionnaire des tâches de l'ordinateur, donc sur le processeur. Mais dans le cas de la GSM parallélisée, la quasi-totalité des calculs sont effectués par la carte et n'apparaissent donc pas sur la mémoire du processeur de l'ordinateur. Cela dit, on confirme l'hypothèse selon laquelle la méthode GSM est beaucoup plus économe en mémoire que la méthode classique RCWA.

Résultat circuit

Nous nous proposons tout de même, après ces diverses simulations sur ce morceau de circuit à l'étape d'implantation des sources et drains, de regarder la précision de la simulation GSM sur la figure 6.8.

On s'aperçoit qu'à partir d'une résolution égale à 64x64 ordres de diffraction, on détecte la surexposition de la ligne de résine photosensible.

6.3 Discussion

Nous souhaitons ouvrir ici une discussion sur les perspectives importantes qui feront potentiellement suite aux travaux présentés ici. Tout d'abord, il faudrait faire une étude de vitesse de simulation en fonction de la précision requise pour une correction ou vérification des effets d'empilement. En effet, de nombreux paramètres réglés par défaut peuvent être modifiés en ce sens. Par exemple, la taille mémoire allouée à l'expression d'un nombre peut-être modifiée. On perd en précision si on définit les nombres sur moins de mémoire mais on gagne de l'espace mémoire. Lorsque l'on décompose le problème pour l'application des sources généralisées, on se retrouve avec des rectangles de

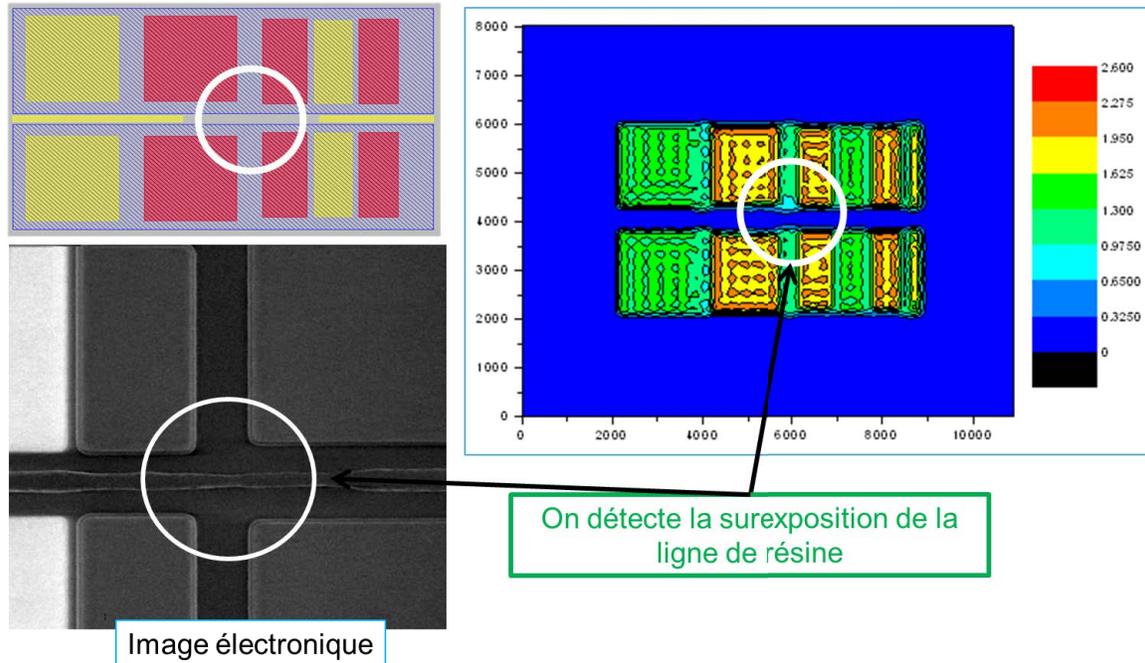


FIGURE 6.8 – Simulation de l'image aérienne d'un niveau Implant Source Drain avec effet d'empilement.

permittivités fixées. On peut choisir de traiter le problème en travaillant avec ou sans les normales aux transitions entre rectangle. Il faudrait étudier l'impact de tous ces paramètres et établir une relation entre les trois paramètres utiles pour les simulations numériques du procédé lithographique : la précision désirée, le temps de simulation requis, la mémoire nécessaire.

Ensuite, il faut essayer de répondre aux deux plus grandes questions de ces travaux sur la méthode des sources généralisées : "Combien de temps et de ressources mémoires sont nécessaires pour une simulation d'une puce complète pour une précision donnée?" et "Est-ce industriellement acceptable?". La réponse à la deuxième question est sans doute subjective au sens où chaque industriel pourra décider si c'est acceptable ou non pour lui. Admettons maintenant que la réponse soit non, c'est à dire que malgré le gain démontré par rapport à une méthode rigoureuse classique de résolution des équations de Maxwell, cette méthode ne soit pas compétitive avec les méthodes actuellement utilisées en industrie. Dans ce cas, une technique hybride aurait-elle du sens? Serait-il possible de coupler la méthode des sources généralisées avec les outils fournisseurs pour n'effectuer qu'un nombre de simulations GSM restreintes, par exemple là où notre expertise nous aura permis d'identifier un effet d'empilement potentiellement dangereux? L'étude d'une simulation de type GSM sur une puce complète est très complexe. En effet, il n'est pas possible d'effectuer la simulation de la puce entière même avec les outils fournisseurs. La stratégie employée est le découpage du circuit à simuler en régions plus petites, la simulation indépendante de ces sous-ensembles de circuit, puis la réunion de ces morceaux avec la gestion de la continuité entre les morceaux que cela implique. Il faudra donc étudier la capacité de la GSM sur de grandes surfaces pour trouver la taille correspondant à une simulation efficace.

Enfin, après avoir achevé les travaux sur l'algorithme de construction de modèles, il serait intéressant d'utiliser la GSM pour appliquer un modèle optimisé à un ensemble de parties de circuit affectées par les effets d'empilement pour valider notre simulation numérique.

6.4 Conclusion

En conclusion de ce dernier chapitre de thèse, nous avons appliqué pour la première fois la méthode des sources généralisées à la modélisation du procédé de photolithographie optique. La méthode des sources généralisées est une méthode exacte de résolution des équations de Maxwell qui grâce à une formulation astucieuse, permet une résolution itérative et parallélisable. Nous avons commencé par valider la démarche expérimentale par comparaison des résultats de simulation de notre méthode avec une autre méthode de résolution d'équation de Maxwell qui est bien connue, la RCWA. Nous avons pu constater que l'écart maximum en termes d'intensité entre la méthode GSM et celle de référence ne dépassait pas 0,1%. De ce fait, nous avons pu passer à l'étude comparative des deux méthodes et de la méthode des sources généralisées avec utilisation d'une carte graphique sur les critères du temps de simulation et de la consommation de la mémoire informatique. Nous avons pu démontrer un gain en temps d'un facteur 300 entre les simulations du réticule des méthodes RCWA et GSM parallélisée mais seulement d'un facteur 10 pour la simulation du substrat. La méthode des sources généralisées telle qu'elle est utilisée actuellement n'est pas prédisposée à la simulation de systèmes contenant des matériaux à comportement métallique.

De nombreuses perspectives existent pour compléter ces travaux. En effet, l'application de la méthode à la modélisation du procédé de photolithographie passe aussi par une réflexion sur les paramètres internes du code. Ensuite il faudra aller au bout de l'étude en évaluant le potentiel de la méthode sur la simulation de puces complètes et éventuellement réfléchir à la possibilité de construire un outil hybride.

Conclusion et perspectives

Nous voici arrivés au terme de nos six chapitres de thèse sur la caractérisation et la modélisation des effets d'empilement des couches minces sous la résine photosensible pendant l'étape de photolithographie optique en microélectronique.

J'ai souhaité commencer ce manuscrit de thèse par une contribution originale à la littérature à travers une présentation du monde de la microélectronique au sens large, basée sur une étude bibliographique conséquente et la construction d'un ensemble de réflexions personnelles. Ce premier chapitre est une démarche personnelle d'approfondissement et d'enrichissement de ma connaissance du milieu qui m'a accueilli pendant ces trois années de thèse. Il a aussi pour objectif de laisser à mes collègues actuels et futurs, ainsi qu'à toute personne intéressée par ce milieu, un ensemble de références bibliographiques qui peut constituer un point de départ à leurs propres recherches personnelles.

Ainsi nous avons vu que l'industrie du semi-conducteur est un monde très technique qui lie les sciences fondamentales et des hautes technologies et est responsable d'une véritable révolution sociétale depuis environ 50 ans qui ne semble pas encore avoir atteint sa limite. Les puces électroniques sont omniprésentes dans notre quotidien et la quantité d'électronique dans les objets de tous les jours augmente d'année en année. La microélectronique génère, grâce à l'industrie électronique et au service associé, un chiffre d'affaire annuel qui dépasse deux fois le produit intérieur brut de la France. Les enjeux sociétaux qui pèsent sur l'industrie du semi-conducteur sont nombreux et importants, tels que la santé ou l'énergie, ce qui laisse sous-entendre que de nombreux nouveaux marchés attendent que la microélectronique s'y investisse. Le principe de fonctionnement de cette industrie est basé sur la miniaturisation des composants électroniques qui permet la réalisation de circuits plus complexes, plus performants et moins chers. Ces nouveaux composants vont générer un marché dont les capitaux permettront d'investir sur la prochaine génération de circuits électroniques. Nous avons étudié avec précision l'histoire de la microélectronique depuis les quelques recherches qui ont précédé le transistor jusqu'à la naissance du circuit intégré, même si nous n'avons rapporté qu'une petite partie de cette histoire dans ce manuscrit. Nous avons également pris le temps d'aborder les notions de simulation numérique et de modélisation, et de définir un certain nombre de termes importants pour ce domaine.

Les chapitres deux et trois ont été l'occasion d'implanter tout le contexte technique de notre thèse à commencer par le procédé de photolithographie optique. Cette étape de la fabrication des circuits intégrés est un acteur clé dans la course à la miniaturisation des composants électroniques. L'équipement de photolithographie, composé d'une source lumineuse et d'une optique de projection va permettre le transfert des motifs d'un réticule dans une résine sensible à l'exposition lumineuse. Cette résine va permettre le traitement sélectif des plaques de silicium sur lesquelles elle a été déposée. On réalise ainsi les composants électroniques par combinaison d'étapes de photolithographie et d'étapes de traitement de type dépôt/gravure de matériaux ou implantation ionique. Nous avons pris grand soin de réunir et discuter les informations de la littérature afin de définir convenablement les paramètres clés du procédé lithographique que sont la dose et le focus d'exposition, ainsi que la résolution du système de photolithographie optique. Nous avons donc pu aborder le fait que depuis quelques années déjà, la réso-

lution au sens optique du terme est devenue insuffisante à la réalisation des transistors. C'est grâce à un ensemble de techniques d'amélioration de la résolution que l'industrie du semi-conducteur réussit à faire face aux lois de la physique en imprimant des motifs toujours plus petits.

Parmi ces techniques d'amélioration de la résolution il y a l'ensemble des techniques de correction des effets de proximité optique qui font l'objet du chapitre trois. Cet ensemble de techniques a pour objectif de traiter l'ensemble des distorsions au sens large qui pourraient perturber l'impression de motifs de formes et de dimensions fixées. Ces distorsions peuvent être d'origine optique, physico-chimique avec la réaction de la résine à l'exposition lumineuse, ou peuvent être issues du traitement que subira la plaque après développement de la résine. Les industriels de la microélectronique ont alors développé un ensemble de moyens qui vont permettre de lutter contre ces phénomènes avec par exemple l'optimisation de la source lumineuse, l'utilisation de réticules à décalage de phase, etc. Mais un des outils les plus essentiels de la photolithographie est la modélisation de cette étape de réalisation des transistors. Nous avons donc pris le temps dans une section dédiée à la modélisation de la lithographie d'aborder les problématiques liées à cette modélisation, de reprendre les approximations nécessaires à ces modélisations et j'ai exposé avec un minimum de mathématiques, la stratégie des TCC utilisée dans l'industrie.

Après avoir clairement défini le contexte de la thèse, nous avons commencé à présenter les effets d'empilement et surtout la caractérisation expérimentale des effets d'empilement. Notre étude expérimentale a été très dépendante de la production de l'entreprise. Nous avons donc mis en place une organisation spécifique pour bénéficier d'un maximum de mesures utiles en limitant les ressources notamment de place sur les plaques de silicium, ce qui a rendu possible une excellente étude expérimentale des effets d'empilement. Devant la quantité très importante de mesures à traiter, j'ai très vite mis en place un protocole de traitement de données qui m'a permis de bâtir des groupes de données particulièrement robustes. Cela nous a aussi permis parfois de détecter des erreurs qui auraient été difficiles à trouver si l'ensemble des mesures pouvait facilement être remis en cause. Grâce à ces groupes de données, nous avons pu mener des études précises des effets d'empilement, les classer, et en comprendre les mécanismes. L'aboutissement de mes travaux expérimentaux, (conception des structures, organisation des mesures, traitement des données, construction des groupes de données, étude des mécanismes des effets et rétroaction vers de nouvelles mesures) a été l'acquisition d'une expertise très forte des effets d'empilement et la mise en place systématique en entreprise de groupes de structures sur les nouveaux réticules correspondant à la photolithographie de l'implantation ionique des sources et drains en 28 nm.

Grâce aux compétences acquises sur l'étude expérimentale, j'ai pu aborder efficacement les moyens de traitement de ces effets d'empilement, et pas seulement ceux liés à la modélisation du procédé lithographique. En effet, à STMicroelectronics, des études ont été menées sur l'impact de certains paramètres sur les effets d'empilement comme notamment l'épaisseur de résine ou sur la mise en place d'une couche anti-reflet développable. Grâce à l'organisation mise en place pendant l'étude expérimentale des effets d'empilement, j'ai pu m'insérer dans ces projets et évaluer ces solutions sur mes

propres structures conçues pour la mise en évidence des effets d'empilement. J'ai ainsi pu démontrer qu'il est possible de réduire ou fortement limiter les effets d'empilement mais pas de les supprimer intégralement. Ces découvertes ont deux conséquences fondamentales qui sont de laisser penser que d'autres niveaux peuvent être atteints par les effets d'empilement et que nos travaux sur la modélisation de ces effets risquent de prendre une importance majeure pour les technologies à venir. En parallèle, dès le début de mes travaux, j'ai tenté de corriger les effets d'empilement avec les moyens de modélisation qui existaient à l'époque mais sans résultat concluant. J'ai pu par la suite participer à des projets de recherche et développement entre STMicroelectronics et ses fournisseurs Mentor Graphics et ASML Brion sur des outils de modélisation du procédé photolithographique capables de prendre en compte les effets d'empilement. Mon rôle a été de fournir des groupes de données fiables et exploitables pour la calibration de leurs modèles et d'utiliser mes connaissances sur les effets d'empilement pour comprendre les avantages et inconvénients des modèles proposés. De mon côté, j'ai travaillé sur la réalisation d'un algorithme de construction de modèle basé sur ce que j'ai appelé "la stratégie du raisonnement inverse" puisque son fonctionnement s'oppose à celui utilisé par les outils classiques de modélisation. En utilisant astucieusement les structures mesurées, j'ai pu optimiser les paramètres du modèle les plus sensibles aux incertitudes de mesures en production. Ainsi par exemple, l'effet d'empilement de substrat a été utilisé pour l'optimisation de l'épaisseur de silice. Les résultats obtenus ont été extrêmement concluants sur les structures uni-dimensionnelles sur substrat uniforme. Tous ces développements m'ont amené à la réalisation de mon propre simulateur augmentant encore davantage mon besoin de connaissances approfondies dans la modélisation du procédé lithographique. Ce simulateur, toujours en développement, a été construit autour d'une structure intelligente dans le but de permettre la création de modèles à travers des algorithmes variés.

Enfin, après avoir étudié expérimentalement et de manière approfondie les effets d'empilement, et après avoir travaillé sur de nombreux moyens de modélisation de ces effets, nous nous sommes intéressés à la première application de la méthode des sources généralisées à la modélisation du procédé lithographique. Cette méthode exacte de résolution des équations de Maxwell permet une formulation astucieuse du problème, se résumant à un système d'équations linéaire sous la forme de produit de matrices de Toeplitz et diagonales. Nous avons effectué une étude comparative entre la méthode des sources généralisées GSM et la méthode classique RCWA. Nous avons pu montrer que les résultats étaient identiques validant ainsi la réalisation de la méthode GSM. Une étude du temps de simulation et de la consommation mémoire a montré un gain d'un facteur 300 en temps de simulation d'une structure au niveau du réticule et d'un facteur 10 au niveau de l'empilement des couches minces.

Ces travaux ouvrent la voie à de nombreuses perspectives à commencer par l'étude expérimentale des effets d'empilement. Dans un souci d'efficacité de cette étude, de nouvelles structures ont régulièrement été embarquées sur des réticules pour la recherche de nouvelles sources d'effet d'empilement. En l'occurrence, il y a aujourd'hui des structures disponibles pour la mesure des effets de transition lointains, de l'impact de l'implantation ionique précédant la nôtre, ou encore de mire pour des mesures scattérométriques des profils des empilements de couches minces. Il serait intéressant d'aller explorer d'autres niveaux que les niveaux implants. Et surtout il faudrait se po-

ser sur la problématique de l'impact des effets d'empilement sur le faisceau d'électrons du microscope électronique à balayage.

Dans le cadre des simulations, il faut reprendre tous les outils disponibles avec l'expertise que nous avons aujourd'hui et essayer de construire une abaque des moyens de prise en compte des effets d'empilement. A chaque niveau correspondra un ensemble d'effets d'empilement qui s'exprimeront par des interactions de distance différentes et des amplitudes différentes. Les problématiques de précision et de vitesse de simulation ne seront pas toujours les mêmes, donc le choix des outils sera probablement différent. L'algorithme de construction de modèle n'est pas encore complet, il faut non seulement le finaliser mais aussi donner la possibilité à l'utilisateur d'agencer les modules d'optimisation des paramètres selon sa volonté et surtout selon son expertise des effets qu'il veut modéliser.

La méthode des sources généralisées quant à elle a été utilisée avec succès sur le procédé de lithographie optique mais son potentiel industriel reste encore inconnu. On sait que l'on peut diviser le temps de calcul encore de nombreuses fois en ajoutant des cartes graphiques mais que cela vaut-il comparé avec un outil industriel? La méthode GSM a été abordée d'un point de vue industriel dans cette thèse, je l'ai appliquée sans une connaissance parfaite de son fonctionnement. Il faut maintenant approfondir l'étude de cette méthode pour voir comment on peut la modifier, la transformer, pour une meilleure efficacité sur la modélisation de la photolithographie optique.

Enfin, il y a de nombreux travaux complémentaires à mener! Il y a aussi des structures qui attendent d'être mesurées sur des noeuds technologiques inférieurs au 28 nm. Une fois le simulateur achevé, il faudra s'en servir pour étudier des solutions particulières comme l'utilisation de réticule en niveau de gris, pourquoi pas le placement de résine sacrificielle qui pourrait être développée complètement à l'absorption d'un effet d'empilement, mais surtout commencer à étudier les prochains effets! Nous avons montré que les effets d'empilement ne se contentent pas des niveaux non protégés par des couches anti-reflet. Le budget d'erreur des dimensions et de placement des motifs vont continuer à diminuer, rendant encore plus difficile la mesure des paramètres influant dans des situations pas trop éloignées des situations réelles dans le circuit. Les effets d'empilement ont souvent été négligés avant la technologie 45 nm, sont devenus très importants en 28 nm et vont continuer à jouer leur rôle d'effet parasite certainement pour les prochaines générations de transistors!

Bibliographie

- [1] "Le petit Larousse illustré". Larousse, 2006.
- [2] Christian Adam. "une histoire des transistors en france". <http://www.radiomuseum.org>, 2010.
- [3] Alexandre Tishchenko Alexey Shcherbakov. "new fast and memory-sparing method for rigorous electromagnetic analysis of 2d periodic dielectric structures". *Journal of Quantitative Spectroscopy and radiative transfer*, pages 158–171, 2012.
- [4] Clovis Alleaume. "Etude de la modification de la source dans l'utilisation de la méthode de cooptimisation source masque en lithographie optique, mise en oeuvre et applications". PhD thesis, Ecole doctorale Sciences Ingénierie Santé Saint-Etienne, 2014.
- [5] Claude Allègre. "La science est le défi du XXIe siècle". Plon, 2009.
- [6] Todd C. Bailey and al. "reflectivity induced variation in implant layer lithography". *Optical Microlithography Proc of SPIE*, 6924, 2008.
- [7] Gérard Berry. "Pourquoi et comment le monde devient numérique". Collège de France/Fayard, 2008.
- [8] William Brinkman. "a history of the invention of the transistor and where it will lead us". *IEEE Transactions on electron devices*, 32 :1858, 1997.
- [9] James Cameron and al. "design and development of production worthy developable bars (dbars) for implant lithography". *Proc of SPIE*, 7639, 2010.
- [10] Jean-François Parent Cécile Gouy-Gilbert. "De la Houille blanche à la microélectronique".
- [11] Sénateur Claude Saunier. Rapport sur l'évolution du secteur des semi-conducteurs et ses liens avec les micro nanotechnologies. *Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques*, Tome I, 2003.
- [12] Sénateur Claude Saunier. Rapport sur l'évolution du secteur de la micro/nanoélectronique. *Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques*, 2008.
- [13] John D. Cressler. "Silicon Earth". Cambridge University Press, 2009.
- [14] Frederick Dill. "modeling projection printing of positive photoresists". *IEEE Transactions on electron devices*, 22 :456, 1975.
- [15] Andreas Erdmann and al. "rigorous simulation of exposure over non-planar wafers". *Proc of SPIE*, 5040, 2003.
- [16] James Word et al. "reduction of reflective notching through illumination optimization". *Optical Microlithography Proc of SPIE*, 4691, 2002.

- [17] Coblenz et Owens. *"Transistors : Theory and Applications"*. McGraw-Hill, 1955.
- [18] Hervé Fanet. *"Micro et nanoélectronique, Bases Composants Circuits"*. Dunod, 2006.
- [19] FrAndroid. "fabricants de semi-conducteurs : Intel toujours en tête, suivi de samsung". http://www.frandroid.com/materiels-accessoires/qualcomm/183589_fabricants-de-semi-conducteurs-intel-toujours-en-tete-suivi-de-samsung", le 10 décembre 2013 à 13h28.
- [20] Puneet Gupta and al. "wafer topography aware optical proximity correction for better dof margin and cd control". *Proc of SPIE*, 5853, 2005.
- [21] Eugene Hecht. *"Optics"*. Addison Wesley, 2002.
- [22] Marcel Heller and al. "grayscale lithography : 3d structuring and thickness control". *Optical Microlithography Proc of SPIE*, 8683, 2013.
- [23] Steven Holmes and al. "implementation of reflectivity control on block mask lithography at 20 and 14 nm nodes".
- [24] J. Gauthier J.L. Leray, J.C. Boudenot. *"La Micro-Nanoélectronique Enjeux et Mutation"*. CNRS Editions, 2009.
- [25] Bruce Smith Kazuaki Suzuki. *"Microlithography Sciences and Technology"*. CRC Press, 2007.
- [26] JC Le-Denmat and al. "wafer sub-layer impact in opc/orc models for 2x nm node implant layers". *Proc of SPIE*, 8673, 2013.
- [27] JC Le-Denmat and al. "wafer sub layer impact in opc/orc models for advanced node implant layer". *Proc of SPIE*, 9052, 2014.
- [28] Torkel Glad Lennart Ljung. *"Modeling of Dynamic Systems"*. Prentice Hall, 1994.
- [29] Olivier Levard. *"Nous sommes tous des robots"*. Michalon, 2014.
- [30] Harry Levinson. *"Principles of Lithography"*. SPIE Press, 2001.
- [31] L.J. Libois. *"Genèse et croissance des télécommunications"*. Masson, 1983.
- [32] Bernhard Liegl and al. "predicting and reducing substrate induced focus error". *Proc of SPIE*, 7640, 2010.
- [33] Henri Lilen. *"Cinq inventions à l'origine de l'ère électronique"*. Vuibert, 2004.
- [34] Commissariat à l'énergie atomique de Grenoble. "comment fabrique-t-on les circuits intégrés?". http://www.cea.fr/jeunes/themes/micro-nanotechnologies*la-microelectronique/comment-fabrique-t-on-les-circuits-integres.
- [35] Commissariat à l'énergie atomique de Grenoble. "découvrez le leti, qui sommes-nous?". <http://www-leti.cea.fr/fr/Decouvrez-le-Leti/Qui-sommes-nous/Histoire>.
- [36] Ridha Loukil. "le coup de pouce de 400 millions d'euros de l'état à stmicroelectronics". <http://www.usine-digitale.fr/article/le-coup-de-pouce-de-400-millions-d-euros-de-l-etat-a-stmicroelectronics.N271594>, Publié le 27 juin 2014, à 17h41.
- [37] Chris Mack. *"Fundamental Principles of Optical Lithography"*. Wiley, 2007.

- [38] Franco Maloberti. *"Understanding Microelectronics A top-Down Approach"*. Wiley, 2012.
- [39] Saied Mazen. *"Etude de la stabilité et de la précision des modèles utilisés dans la correction des effets de proximité optique en photolithographie"*. PhD thesis, Ecole doctorale d'Electronique, Electrotechnique, Automatique et Traitement du signal, Grenoble, 2011.
- [40] JC Michel and al. "full chip implant correction with wafer topography opc modeling in 2x bulk technologies". *Proc of SPIE*, 8880, 2013.
- [41] JC Michel and al. "wafer topography modeling for ionic implantation mask correction dedicated to 2x nm fdsoi technologies". *Proc of SPIE*, 8683, 2013.
- [42] Mincheol Oh and al. "full chip correction of implant layer accounting for underlying topography". *Proc of SPIE*, 8326, 2012.
- [43] Thomas Pistor. *"Electromagnetic Simulation and Modeling with Applications in Lithography"*. PhD thesis, Université de Berkeley, Californie, 2001.
- [44] Marine Rabreau. "l'e-commerce contourne la fiscalité française". <http://www.lefigaro.fr/societes/2010/04/07/04015-20100407ARTFIG00419-l-e-commerce-contourne-la-fiscalite-francaise-.php>, Publié le 07/04/2010 à 16h50.
- [45] Michael Riordan. "how europe missed the transistor". *IEEE Spectrum*, page 53, 2005.
- [46] Stewart A. Robertson and al. "simulation of optical lithography in the presence of topography and spin coated films". *Proc of SPIE*, 7273, 2009.
- [47] Emmanuel Rosencher. *"La puce et l'ordinateur"*. Flammarion, 1995.
- [48] Dongbing Shao and al. "substrate aware opc rules for edge effect in block levels". *Proc of SPIE*, 7823, 2010.
- [49] Socha and al. "effects of wafer topography on the formation of polysilicon gates". *Proc of SPIE*, 2440 :361, 1995.
- [50] Robert Socha. *"Propagation effects of partially coherent light in optical lithography and inspection"*. PhD thesis, Université de Berkeley, Californie, 1997.
- [51] Nicolas Spaziani. *"Détermination simultanée de la mise au point et de la dose d'un équipement de micro-lithographie optique"*. PhD thesis, Ecole doctorale d'Electronique, Electrotechnique, Automatique et Traitement du signal, Grenoble, 2012.
- [52] Hans-Jürgen Stock and al. "virtual fab flow for wafer topography aware opc". *Proc of SPIE*, 7640, 2010.
- [53] Elodie Sungauer and al. "stack effect implementation in opc and mask verification for production environment". *Proc of SPIE*, 8326, 2012.
- [54] A. Tishchenko. "a generalized source method for wave propagation". *Pure Appli. Opt.*, pages 1425–1449, 1998.
- [55] VIPress. "top20 du semiconducteur en 2013 : avantage à sk hynix, mediatek, micron et qualcomm". <http://europelectronics.vipress.net/?id=hcofthnff1211gduu>, 07/11/2013.

- [56] R.M. Warner. "microelectronics : Its unusual origin and personality". *IEEE Transactions on electron devices*, 48 :2457, 2001.
- [57] Thomas Williams. "eda to the rescue of the silicon roadmap". *IEEE International Symposium on Multiple-Valued Logic*, 2008.
- [58] Gustaf Winroth and al. "modeling the lithography of ion implantation resist on topography". *Proc of SPIE*, 9052, 2014.
- [59] Alfred Kwok-Kit Wong. "*Optical Imaging in Projection Microlithography*". SPIE Press, 2005.
- [60] Vidéo youtube. Fonctionnement du transistor mos.
<https://www.youtube.com/watch?v=-l6QgYoYcko>.
- [61] Lei Yuan and al. "a novel method to reduce wafer topography effect for implant lithography process". *Proc of SPIE*, 7640, 2010.
- [62] Nassima Zeggaoui. "*La lithographie par double impression pour les noeuds technologiques avancés*". PhD thesis, Ecole doctorale d'Electronique, Electrotechnique, Automatique et Traitement du signal, Grenoble, 2011.

La photolithographie optique assure en partie à la microélectronique la miniaturisation des circuits électroniques. Afin de faire face à la limite de résolution de l'équipement de photolithographie, les industriels ont mis au point des techniques d'amélioration de la résolution dont certaines sont basées sur l'utilisation de la modélisation numérique. Jusqu'au nœud technologique 45 nm, cette modélisation ne prenait pas en compte la présence de plusieurs empilements de matériaux sous la résine photosensible négligeant ainsi les phénomènes de réflexion, de diffraction et d'ondes stationnaires. Pour les nœuds 32 nm et suivants, ces phénomènes rendent difficile le contrôle de la forme et des dimensions des motifs résine notamment pour les niveaux dont l'exposition s'effectue sans couche antireflet. Cette thèse CIFRE entre le laboratoire Hubert Curien de Saint-Etienne et l'industriel STMicroelectronics de Crolles traite de la caractérisation, de la modélisation et de la simulation numérique des effets d'empilement sous la résine photosensible.

Le premier chapitre regroupe un ensemble de pensées sur la microélectronique, son histoire et définit les notions essentielles de ce domaine et de la modélisation numérique. Les chapitres deux et trois donnent respectivement l'état de l'art de la photolithographie optique et des techniques de correction des effets de proximité optique. Le chapitre quatre présente l'étude expérimentale, de la conception des structures test à la caractérisation des effets d'empilement en passant par le protocole de création des groupes de données. La prise en compte de ces effets est l'objet du chapitre cinq avec l'état de l'art des techniques existantes suivi de la description de l'algorithme de construction de modèles développé dans cette thèse. Enfin l'application de la méthode des sources généralisées à la photolithographie optique est évaluée dans le chapitre six.

In IC manufacturing, optical photolithography is one of key actors of electronic circuit miniaturization. To work around the photolithography resolution limit, manufacturers developed resolution improvement techniques, including some based on numerical modeling. For nodes larger than 45 nm, this modeling didn't take into account several stacks under the photoresist and that caused optical reflection, diffraction, and standing wave phenomena to be neglected. For 32 nm and smaller nodes, these phenomena make it difficult to control the shape and dimensions of resist patterns, especially for layers without an anti-reflecting coating during exposure. The CIFRE thesis from Hubert Curien Laboratories in Saint-Etienne and industrial STMicroelectronics from Crolles deals with wafer stack effect characterization, modeling, and numerical simulation.

The first chapter gives my philosophy and history of IC manufacturing, and defines concepts in this field and concepts about numerical modeling. Chapter Two discusses state-of-the-art optical photolithography and Chapter Three discusses state-of-the-art optical proximity correction. Chapter Four emphasizes an experimental study from test pattern conception to wafer stack effect characterization, including data set building protocol. Chapter Five covers wafer stack effect management, first describing the current status of the industry followed by a description of the model building algorithm developed during this thesis. Finally, Chapter Six assesses the generalized source method applied to the photolithography process simulation.