



Lithographie directe à faisceaux d'électrons multiples pour les nœuds technologiques sub-20nm

Julien Jussot

► **To cite this version:**

Julien Jussot. Lithographie directe à faisceaux d'électrons multiples pour les nœuds technologiques sub-20nm. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université Grenoble Alpes, 2015. Français. <NNT : 2015GREAT086>. <tel-01235745>

HAL Id: tel-01235745

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01235745>

Submitted on 30 Nov 2015

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

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

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

Spécialité : **Nano Electronique et Nano Technologies**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Julien JUSSOT

Thèse dirigée par **Erwine PARGON** et
codirigée par **Christophe CONSTANCIAS** et **Béatrice ICARD**

préparée au sein du **Laboratoire des Technologies de la Microélectronique** et du **Laboratoire de Lithographie du Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives**
dans l'**École Doctorale Electronique, Electrotechnique, Automatisme et Traitement du Signal**

Lithographie directe à faisceaux d'électrons multiples pour les nœuds technologiques sub-20nm

Thèse soutenue publiquement le **28 septembre 2015**,
devant le jury composé de :

Mme Jumana BOUSSEY

Directrice de Recherche, LTM Grenoble, Présidente du Jury

M. Gérard BENASSAYAG

Directeur de Recherche, CEMES Toulouse, Rapporteur

M. Brice GAUTIER

Professeur des Universités, INSA Lyon, Rapporteur

M. Olivier SOPPERA

Directeur de Recherche, IS2M Mulhouse, Examineur

Mme Erwine PARGON

Chargée de Recherche, LTM Grenoble, Directrice de Thèse

M. Christophe CONSTANCIAS

Docteur, CEA-LETI Grenoble, Co-Encadrant



"Three Little Birds"
À mon pote Richard

Remerciements

J'aimerais tout d'abord remercier les membres du jury pour le temps consacré à la lecture de ce manuscrit, leur déplacement sur Grenoble pour la soutenance et bien évidemment pour les discussions/questions qui ont permis de parachever ces travaux de thèse. Je tiens également à remercier tout spécialement mes encadrants Erwine Pargon, Christophe Constancias et Béatrice Icard pour leur aide tout le long de ces travaux de thèse et particulièrement pour leur soutien pendant la difficile période qu'est la rédaction. Je remercie également Cyrille Laviron pour sa bonne humeur et son écoute bien que n'ayant pu le côtoyer que pendant mes derniers mois au laboratoire.

Je remercie particulièrement mes différents « co-bureau » du 438 au 4123 : Claire Sourd, Arame Thiam, Beatrice Icard, Thomas Degrouve, Cyrille Essomba et Patrick Quéméré pour les bons, très bons et excellents moments passés à parler de science, de musique ou de tout à fait n'importe quoi. Sans oublier les divers repas réalisés à l'Embuscade, chez Claire, chez Arame et chez Béa.

Je remercie grandement Daniel Dumon pour les très nombreuses heures qu'il a passé au CDSEM le weekend pour réaliser une partie de mes images. Mais aussi Jacques-Alexandre Dallery et Abdi Farah pour le support technique sur les équipements de lithographie électronique et les divers échanges que l'on a pu avoir.

J'aimerais dire merci aussi à Cyril Vannuffel pour les discussions éclairées sur le CDSEM et aussi sur différents points relatifs à la société tous aussi importants. Mais également à Bernard Dal'Zotto pour les bons produits issus de son potager/ruches et pour m'avoir fait courir à la pause de midi sous un soleil de plomb plusieurs fois. Merci encore à Jessy Bustos pour les discussions, blagues et sketches aux pauses, mais également en dehors du cadre du travail et j'espère que ça durera ! Je remercie grandement Martin Thornton pour la récurrente mais non moins exceptionnelle citation « MoSi S*** » et les discussions à propos de séries TV fantastiques. Dédicace à Pascale Nardi pour sa bonne humeur, les pauses et les mauresques, des bisous !

N'oublions pas non plus les soirées à la maison ou chez Christophe Brun, assez chaotiques avec Yannick, Romain Georges, Jérôme Reche et Thomas Degrouve. Les fraises tagada sont en réalité des objets aquatiques dotés d'une capacité non soupçonnée de vol.

Un remerciement tout spécial pour la team Carré/Passoire/1900 à savoir Gilles, Manu, Jérémy et Reynald pour les sorties après le travail que l'on peut largement qualifier de géniales. À continuer donc ! Mais parmi cette équipe on trouve également Mika qui apporte sa touche de remarques acides à l'exact bon moment et à qui je dois des soirées à finir au Vertigo sans savoir trop pourquoi on y était entré. Sans oublier Onin, pour des souvenirs de conférence, des cafés et une bonne humeur sans faille.

J'aimerais également remercier le reste des 2 très nombreuses familles que représentent les gens du LTM et du LLIT que j'ai pu côtoyer à savoir Nivea, Marc Fouchier, Virginie, Mathilde, Cédric, Philippe, Karine, Armel, Ahmed, Maxime, Jonathan, Shayma, Jamimi, Aurélien Fay, Aurélien Shum, Jérôme Belledent, Michael May, Marie-Line, Xavier, Sébastien Soulan, Cheikh, Loïc et beaucoup d'autres.

Les remerciements ne seraient pas complets sans les « Mandrineurs », Pompom, Simon et Manon le samedi à 17h. Il faut faire vivre les petites exploitations locales.

N'oublions pas le désormais mondialement connu Swann et ses questionnements profonds relatifs aux horaires de fermeture des boucheries.

Merci également à Aude qui m'a rafistolé et merci à tous les autres Lalous.

J'en viens aux gens avec qui le temps passé est plus que significatif et je les remercie ! En premier, Sébastien B. aka Gland aka Huitre sans qui les idées saugrenues seraient largement sous représentées, on pensera à la distillation d'une chèvre sous atmosphère inerte. N'oublions pas son usage des « PON » et autres onomatopées tonitruantes et variées. François aka F..... Pichet, pour les soirées jeux fantastiques, les tartiflettes, sa peur des battes et les aux au piment. Loic P. aka grosale pour les fous rires sur skype, le CMLC et sa tant détestée acid techno, paf la pastèque. Geoffrey B. aka Ömi pour les envolées fantastiques, « Rendez-vous compte de la magnificence de ces colonnades ! », mais peut-on payer en deux fois ? Marie-Alix aka Manix pour trouver le moyen de me supporter ! Ro, pour le très célèbre : ENCORE ! Eric et Gui pour leurs nombreuses venues à « Grenoble » résultantes en d'inoubliables weekends. Ben pour les « staring contest », l'introduction de la paranoïa dans les parties de Battlestar et les nombreuses discussions cinéma, entre autres. Vix et Lisa, les inséparables. Satan, qui n'a très certainement toujours pas acheté de rideaux. Barbara, sponsor officiel des éléphants. David « photo bomber » reconnu et grand maître des jeux. Maxou, le dévoreur de mondes. Ruchette et les soirées ambiance. VG, ses rhums arrangés et ses crocs. Mini Memette, Ju, Leo, Laurie et Momo sans qui Grenoble ne serait pas vraiment pareil !

Finalement, une pensée à Richard parti bien trop tôt.

Table des matières

<i>Introduction générale</i>	5
<i>Chapitre I : Microélectronique, la lithographie et ses enjeux</i>	9
<i>Introduction</i>	9
1. <i>La lithographie</i>	10
2. <i>Les résines d'exposition</i>	20
3. <i>La théorie liée à la lithographie électronique</i>	28
4. <i>Le LWR : un enjeu majeur pour la lithographie</i>	40
<i>Bibliographie du chapitre I</i>	45
<i>Chapitre II : Moyens et techniques mis en œuvre</i>	51
1. <i>Outils d'exposition en lithographie électronique</i>	51
2. <i>Procédé lithographique</i>	65
3. <i>Traitement des motifs par plasma</i>	70
4. <i>Caractérisation des films minces de résine</i>	72
5. <i>Caractérisation dimensionnelle des motifs</i>	79
<i>Bibliographie du chapitre II</i>	92
<i>Chapitre III : Impact du dépôt d'énergie sur les performances lithographiques</i>	97
1. <i>Modèle de simulation de dépôt d'énergie</i>	97
2. <i>Stratégie d'exposition</i>	102
3. <i>Conclusions du chapitre III</i>	127
<i>Bibliographie du chapitre III</i>	129
<i>Chapitre IV : Procédés visant à réduire la rugosité de ligne de résine</i>	131
1. <i>Effet du développement</i>	131
2. <i>Procédés post-lithographie</i>	135
3. <i>Combinaison des stratégies de lissage</i>	153
4. <i>Conclusions du chapitre IV</i>	158
<i>Bibliographie du chapitre IV</i>	160

<i>Conclusion Générale</i>	163
<i>Glossaire</i>	167

Introduction générale

Il va sans dire qu'à l'heure actuelle les technologies issues de l'industrie microélectronique impactent largement notre vie quotidienne, à l'échelle de l'individu mais également d'une manière plus globalisée. Nous sommes toujours plus connectés, on peut très facilement contrôler à distance un appareil électronique à l'aide de nos téléphones, ou bien se repérer grâce aux systèmes de géolocalisation par satellite. La miniaturisation ainsi que la portabilité des systèmes électroniques profitent également au domaine de la recherche, par exemple des sondes autonomes permettent désormais de faire des relevés océanographiques de température avec une régularité et précision inégalées. La puissance de calcul est également un point important, elle est telle de nos jours que les ordinateurs personnels peuvent être mis en commun via internet au profit de projets de calcul distribué à vocation de recherche (Folding@Home et LHC@Home par exemple). Ce sont d'indéniables progrès dont une grande partie de l'humanité peut bénéficier. Ces bénéfices sont largement dus à l'extraordinaire croissance que subit l'industrie microélectronique depuis maintenant plus de 50 ans.

En 1947, au sein des laboratoires Bell de la société AT&T, J. Bardeen et W. Brattain ont mis au point le premier transistor. Dès 1958 le premier circuit intégré est fabriqué. Dès lors, l'industrie a voulu intégrer toujours plus de transistors MOS (Metal Oxyde Semiconductor) dans ses puces pour améliorer les capacités de calculs de ces dernières. Pour ce faire, elle réduit la taille unitaire des transistors. Cette ligne directrice a permis le développement de très nombreuses techniques et matériaux afin de répondre à cette problématique. Parmi ces techniques, on trouve la lithographie qui sert à la réalisation des structures nécessaires à l'élaboration des transistors.

La lithographie est l'une des techniques les plus critiques du procédé d'élaboration d'une puce électronique. En effet, c'est elle qui fixe la densité et la plus petite dimension réalisable des structures. L'industrie utilise encore très largement la technique de photolithographie qui repose sur l'utilisation de photon UV. Cependant, pour continuer à augmenter la densité en transistors de ses dispositifs l'industrie prévoit de remplacer cette technique. Plusieurs techniques de nouvelle génération sont en cours de développement, parmi lesquelles on trouve la lithographie à multiples faisceaux d'électrons.

La lithographie à multiples faisceaux d'électrons est un développement récent des outils de lithographie électronique à simple faisceau. Les technologies de lithographie à multiples faisceaux d'électrons se proposent d'améliorer la technique à simple faisceau. Cette dernière bien que très résolutive ne permet pas de réaliser des structures avec un débit suffisant pour que celle-ci soit utilisée pour la production en masse. Plusieurs entreprises développent des technologies à multiples faisceaux d'électrons, notamment IMS Nanofabrication et MAPPER Lithography. Les formes abouties des deux technologies diffèrent par l'énergie d'accélération des électrons (respectivement 50keV et 5keV) et le nombre de faisceaux utilisés (respectivement 262144 et 13260), la première vise à l'écriture de masques pour la photolithographie et la seconde à l'écriture directe pour la production de dispositifs CMOS (pour Complementary MOS).

Le CEA-LETI s'est associé avec l'entreprise MAPPER Lithography pour aider à l'émergence d'une technologie de lithographie à multiples faisceaux d'électrons à basse énergie (5 keV). Diminuer l'énergie d'accélération des électrons n'est pas une stratégie courante. En effet, les équipementiers ont plutôt tendance à avoir des énergies d'accélération supérieures à 50 keV. Ce choix de la basse

énergie permet de limiter l'échauffement du substrat en cours de lithographie et permet une écriture plus rapide des motifs dans le matériau dit de résine (moins d'électrons à déposer).

Cependant ce choix de la basse énergie a une implication directe sur les propriétés de la lithographie. L'étude des procédés dédiés à l'émergence d'une lithographie électronique basse énergie est donc primordiale. Dans ce contexte, les travaux de ce manuscrit sont portés sur la compréhension des phénomènes permettant le contrôle d'une des grandeurs critiques du procédé de lithographie, à savoir la rugosité de ligne (LWR) des motifs. Le LWR est une limite indéniable des performances des transistors et doit convenir après lithographie aux critères fixés par l'ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors). A l'heure actuelle, le LWR est de 4 à 5 nm après lithographie mais doit être inférieur à 1.7 nm pour les futurs nœuds technologiques inférieurs à 20 nm. Les travaux de ce manuscrit doivent permettre de suggérer des voies de développement à suivre pour obtenir une faible rugosité pour une lithographie basse énergie (5 keV). Néanmoins, les travaux ont été réalisés à l'aide de deux équipements de lithographie électronique, le premier un outil de Vistec Electron Beam à faisceau simple formé d'énergie d'accélération 50 keV (utilisé majoritairement) et le second le prototype de MAPPER Lithography d'énergie d'accélération de 5 keV possédant 110 faisceaux disponible dans la salle blanche du CEA-LETI.

Le premier chapitre de ce manuscrit permet d'abord de faire le point sur la principale technique de lithographie utilisée actuellement par l'industrie et pourquoi une rupture technologique est nécessaire pour continuer à augmenter la densité de transistor des puces électroniques. Ensuite, ce chapitre permet de situer les solutions de lithographie à multiples faisceaux d'électrons parmi les technologies concurrentes également en lice. Finalement ce chapitre résume les multiples aspects de la lithographie électronique (propriétés des matériaux de résine, interaction électron-matière), ce qui permettra de définir les outils nécessaires à la compréhension du reste du manuscrit.

Le deuxième chapitre, lui, traite des moyens et techniques mis en œuvre pendant ces travaux de thèse. A savoir, la présentation des outils de lithographie électronique utilisés, les conditions des étapes de préparation du matériau de résine et finalement le détail des techniques de caractérisation physico-chimiques et dimensionnelles utilisées.

Le troisième chapitre traite des modifications des performances lithographiques notamment en matière de LWR à l'aide d'une stratégie d'écriture non conventionnelle modifiant le contraste de l'image aérienne.

Le quatrième et dernier chapitre, lui porte sur les procédés complémentaires envisagés pour réduire le LWR des motifs de résine obtenu après lithographie. Il vise à trouver un maximum de réduction de LWR en combinant les techniques utilisées pendant ces travaux.

Chapitre I.

Microélectronique, la lithographie et ses enjeux

Introduction

L'essor indéniable que connaît l'industrie microélectronique depuis maintenant plus de 50 ans a permis une large diminution des coûts des transistors des circuits intégrés et conséquemment l'accès pour une grande partie de la population mondiale aux bénéfices de ce développement (ordinateurs de bureau, téléphones portables, tablettes, objets connectés,...)

Cet essor suit la loi de Moore formulée en 1965 par Gordon E. Moore un des co-fondateurs de la société Intel. Avant son énonciation, Gordon E. Moore avait repéré que le nombre de transistors des circuits intégrés d'entrée de gamme doublait chaque année (à prix constant). Il a alors émis la conjecture selon laquelle l'observation qu'il avait réalisée serait vraie pour les 10 prochaines années. Dès 1975, il corrigea cette assertion en précisant que le doublement apparaîtrait tous les 2 ans. Cette dernière affirmation s'est avérée très juste jusqu'à 2011 (figure I.1).

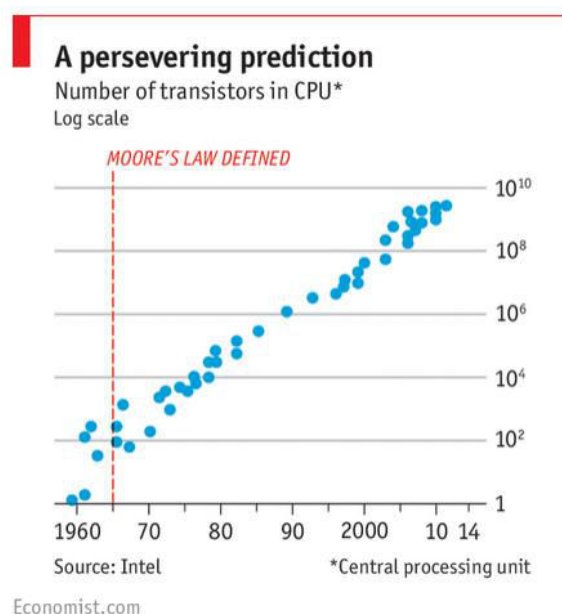


Fig. I.1 : Evolution du nombre des transistors pour des processeurs de la société Intel (reproduction de [1.1])

La formulation de Gordon E. Moore bien que purement économique et empirique, a été le moteur du développement de l'industrie microélectronique et a permis l'apparition de nombreuses techniques permettant la réalisation de structures toujours plus petites et denses. Ces améliorations n'ont pas apporté qu'une diminution du coût unitaire d'un circuit intégré, mais également une large augmentation du rapport puissance de calcul par la puissance consommée par ces circuits autorisant de ce fait l'émergence de dispositifs à faible consommation et mobiles.

Pour réaliser les circuits microélectroniques, l'industrie utilise de nombreuses étapes technologiques comme la lithographie, la gravure plasma, l'implantation ionique, la planarisation des surface et des dépôts. C'est la technique de lithographie qui permet la réalisation des structures, c'est une étape cruciale de la réalisation de circuits microélectroniques puisque c'est elle qui limite la dimension et la densité des motifs réalisables. Elle permet de réaliser des structures plus ou moins complexes constituées souvent de plots/trous et ou lignes et tranchées mais pas seulement comme le montre la figure I.2.

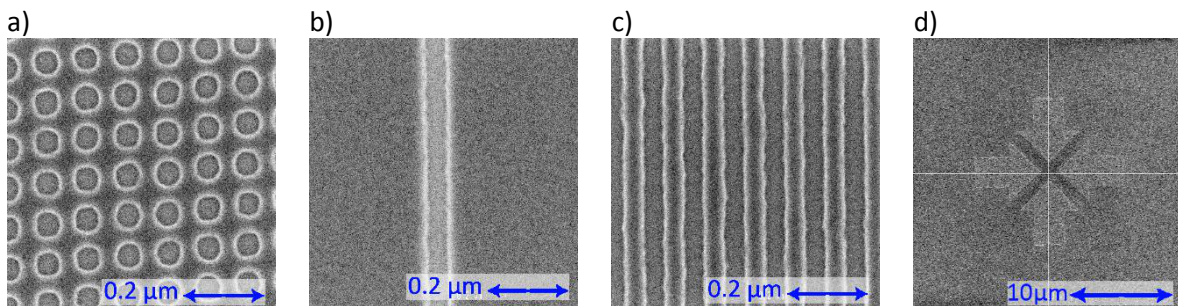


Fig. I.2 : Vues de dessus réalisées en microscopie électronique à balayage de structures diverses, a) réseau de trous, b) tranchée isolée, c) réseau de lignes et tranchées, d) flèches

1. La lithographie

L'étape de lithographie détermine généralement la taille minimale des structures réalisées et donc le nœud technologique auquel appartient le dispositif final. On parle dans ce cas de résolution, une meilleure résolution permet la création de structures toujours plus petites et plus denses, c'est pour cela qu'elle est l'un des enjeux majeurs de l'industrie microélectronique. Néanmoins la production horaire ne peut pas être omise, c'est pour cela que la photolithographie est à l'heure actuelle la technique la plus usitée par l'industrie. Il existe par ailleurs de nombreuses autres techniques de lithographie, telles que la lithographie électronique, la lithographie à faisceau ionique et d'autres utilisant des microscopes à sondes locales (microscopes à force atomique, microscopes à effet tunnel). Ces techniques présentent toutes une résolution minimale atteignable proche de la dizaine de nanomètres voire moins mais souffrent d'un cruel manque de production horaire ce qui les laisse hors course pour la production industrielle de dispositifs électroniques.

1.1. Principe

Cette partie présente brièvement le principe de la photolithographie plus précisément de la lithographie optique par projection, technique la plus utilisée par l'industrie grâce à sa forte production horaire (le lecteur pourra se reporter aux références ^[1.2]^[1.3]^[1.4] pour plus d'informations sur la

technique). Cette dernière repose sur une modification locale du matériau dit de résine à l'aide de photons (similaire dans son fonctionnement à la lithographie électronique).

L'extension spatiale des modifications est contrôlée dans ce cas par un masque d'exposition qui laisse ou non passer la lumière de la source selon un dessin prédéfini. Cette technique permet donc une écriture en parallèle d'une large quantité d'informations présente sur le masque. Une lentille permet la réduction de l'image du masque d'un facteur de 4 pour les équipements actuellement utilisés (figure I.3). De plus, le caractère fini du système optique implique que seuls quelques ordres de diffraction soient récupérés et produit donc une image du masque altérée dans le matériau de résine (on parle d'image latente).

La limite de résolution atteignable par le procédé de photolithographie (ou de la lithographie électronique) dépend d'un des facteurs suivants :

- des capacités de l'équipement (qualité de l'image aérienne ou contraste en énergie)
- du couple matériau de résine et procédé de développement.

Dans le cas d'une limite de résolution liée à l'équipement, par exemple pour la photolithographie, une limite physique liée à la diffraction de la lumière est rencontrée. Une version simplifiée de la limite de résolution d'un équipement de photolithographie, que l'on notera R , est calculée grâce au critère de Rayleigh et égale à :

$$R = 0.61 * \frac{\lambda}{NA} \quad (\text{eq. I.1})$$

où λ est la longueur d'onde émise par la source et NA l'ouverture numérique de l'équipement de lithographie qui dépend du système optique inséré dans ce dernier.

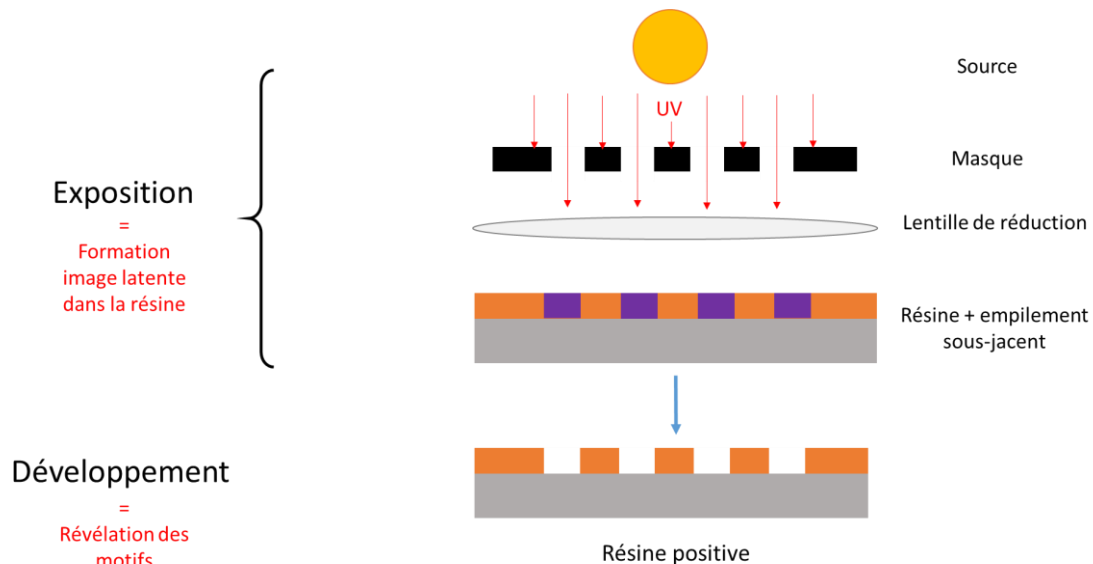


Fig. I.3 : Schéma de principe simplifié du procédé de photolithographie par projection. La création de motifs dans le matériau de résine résulte de l'étape d'exposition qui réalise une image latente des motifs dans le matériau cible (en orange la résine n'a pas été impactée par l'exposition, en violet cette dernière a été modifiée). Puis l'étape de développement permet la révélation des motifs (cas d'une résine positive ici, la tonalité des résines sera abordée dans la partie 2 de ce chapitre)

L'ouverture numérique est égale à :

$$NA = n * \sin(\theta_{max}) \quad (\text{eq. I.2})$$

où n est l'indice du milieu traversé par la lumière UV et θ_{max} le demi-angle de collection des différents ordres de diffraction en sortie du masque.

Lorsque l'on travaille en dehors de toute limite liée à l'équipement, c'est le couple résine/procédé de développement qui peut être limitant. La raison des limitations de résolution liées à ce couple sera abordée dans la section 2.2 de ce chapitre.

Les progrès énormes des dispositifs de l'industrie microélectronique intimement liés à leurs dimensions proviennent d'un développement conjoint entre les équipements de photolithographie et des matériaux de résine qui ont permis depuis les années 1960 l'amélioration des capacités de résolution. La section suivante fait un bref résumé des choix de développement des équipements qui ont permis d'arriver aux nœuds technologiques actuels.

1.2. Evolution de la photolithographie

Au fil des années, afin de pouvoir produire des puces comportant toujours plus de transistors, c'est-à-dire en réduisant la taille de ces derniers, l'industrie a amélioré ses équipements de photolithographie en réduisant la longueur d'onde du rayonnement émis par la source.

Ainsi l'utilisation de lampes à vapeur de mercure a permis de générer 2 des premières longueurs d'ondes utilisées 436nm et 365nm (appelées respectivement g-line et i-line en anglais) ^[1.5]. Pour continuer la réduction, des sources à base de lasers excimères de Fluorure de Krypton (KrF) et à Fluorure d'Argon (ArF), ont été ensuite utilisées, celles-ci permettant la génération de longueurs d'ondes de 248nm et 193nm respectivement. On parle alors de lithographie dans les UV profonds (ou DUV, pour Deep UV). Il est à noter, que de nos jours l'industrie utilise largement des équipements utilisant les longueurs d'ondes 248nm et 193nm.

Il va sans dire que l'industrie a développé conjointement à la longueur d'onde, l'ouverture numérique (NA) de ses équipements de lithographie. Initialement les améliorations de NA ont été apportées grâce à la conception de systèmes de lentilles plus complexes permettant la collecte de la lumière avec des angles plus larges ^[1.5]. Il a été ensuite envisagé d'introduire un milieu d'indice de réfraction n plus important que l'air pour augmenter encore plus NA , le choix a porté sur l'eau qui permet, par exemple pour λ égal à 193nm de porter n à 1.44 (dans l'air $n = 1.0$). On parle alors d'équipement à immersion (ou « Wet » contrairement aux équipements dit « Dry » qui ne contiennent pas d'eau). Introduits massivement vers 2007 dans l'industrie, les équipements à immersion ont permis de générer des structures de dimensions inférieures aux 65nm obtenus avec les meilleurs équipements « dry ».

Les difficultés technologiques et financières liées à la génération de sources de longueurs d'onde plus faibles que 193nm ou des systèmes optiques à ouverture numérique plus importante ont conduit l'industrie à améliorer la résolution des systèmes de photolithographie en utilisant d'autres stratégies. On parle de technologies dites d'amélioration de la résolution (ou Resolution Enhancement Technologies, RET en anglais). Ces dernières sont au nombre de 3 et peuvent être combinées ou non (pour plus d'informations sur ces technologies, le lecteur pourra se reporter à la référence ^[1.2]):

- La correction des effets de proximité (OPC, pour Optical Proximity Correction)
- L'utilisation de masques à changement de phase (PSM, pour Phase-Shift Mask)
- L'utilisation d'une illumination dite hors-axe (OAI, pour off-axis illumination)

En réalité pour décrire la dimension la plus petite réalisable (appelée dimension critique minimum) avec un équipement de lithographie optique, on utilise plutôt la variante ci-après de l'équation 1.1 :

$$CD_{min} = k_1 * \frac{\lambda}{NA} \quad (\text{eq. 1.3})$$

où CD_{min} est la dimension critique minimum atteinte par la technique. k_1 lui est un facteur qui dépend de l'intégralité du procédé de lithographie optique (dimension et densité du motif, RET utilisés et du procédé résine).

La figure I.4 présente l'évolution du facteur k_1 en fonction des années et également quelles longueurs d'ondes ont été utilisées afin de réaliser des nœuds technologiques anciens.

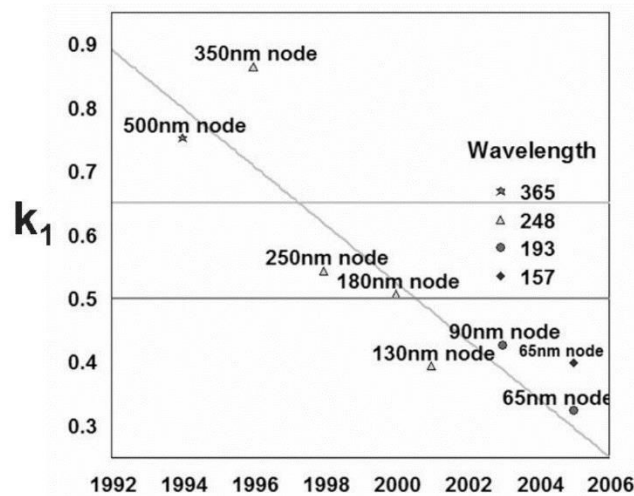


Fig. I.4 : Evolution du facteur k_1 et des longueurs d'ondes utilisées au fil des années (reproduction de [1.4])

Si l'on considère les équations 1.1 et 1.3 et la figure I.4, on peut voir que les améliorations de la technique de photolithographie ont permis de réaliser des structures de dimensions inférieures à celle que l'on obtiendrait en considérant uniquement le critère de Rayleigh (i.e. $k_1 < 0.61$)

A l'heure actuelle, les meilleurs équipements de photolithographie à immersion 193nm permettent de produire des structures de dimension minimale de 38 nm tout en imprimant jusqu'à 250 plaques à l'heure [1.6]. Si l'industrie veut pouvoir continuer l'amélioration des performances de ses dispositifs, il faut mettre au point de nouvelles technologies de lithographie permettant la réalisation de structures encore plus petites et denses tout en gardant un débit conséquent.

1.3. Lithographies émergentes accessibles pour les nœuds technologiques inférieurs à 20 nm

L'ITRS (pour International Technology Roadmap for Semiconductor) définit depuis 2000 les routes de développement à suivre pour continuer la réduction de la taille des dispositifs. Elle présente en général l'évolution de la dimension appelée demi-pas de répétition (halfpitch en anglais, abrégé en hp) pour les dispositifs DRAM (pour Dynamic Random Access Memory). Le tableau I.1 présente la route de développement des dispositifs DRAM et MPU (pour MicroProcessor Unit) proposée par l'ITRS (extrait de [1.7]) depuis les nœuds technologiques 32nm et les technologies de lithographies envisagées. Les termes et acronymes utilisés dans le tableau I.1 sont définis en dessous du tableau.

Tableau I.1 : Nœuds technologiques et techniques de lithographies associées

Année de production	2012	2015	2018	2021
DRAM demi-pas dans la résine (nm)	32	24	18	14
MPU longueur de grille après gravure (nm)	22	17	13	9.7
Technologies de lithographie envisagée pour l'industrie	<ul style="list-style-type: none"> •Optique 193nm à immersion avec «double patterning » 	<ul style="list-style-type: none"> •Optique 193nm à immersion avec «double patterning » 	<ul style="list-style-type: none"> •Optique 193nm à immersion avec «quadruple patterning » •EUV (13.5nm) •DSA •Nano-impression •ML2 	<ul style="list-style-type: none"> •Optique 193nm à immersion avec «quadruple patterning » •EUV (13.5nm) •DSA •Nano-impression •ML2

« Double et Quadruple patterning » sont des techniques actuellement employées par l'industrie, elles apparaissent dans la littérature avec le terme « multiple patterning » que l'on peut traduire en multiplication de la densité.

« EUV » (pour Extreme UV) correspond à une lithographie optique utilisant une longueur d'onde de 13.5nm, on parle de lithographie optique dans les UV extrêmes.

« DSA » (pour Directed Self-Assembly) correspond à l'utilisation de l'auto-assemblage dirigé de copolymères à blocs.

« ML2 » (pour Maskless Lithography) correspond aux techniques de lithographie sans masque dans lesquelles on trouve les lithographies électroniques à faisceau(x) simple ou multiples.

Les sections suivantes parlent brièvement du fonctionnement des différentes techniques de lithographie émergentes pour les nœuds technologiques inférieurs à 20nm.

1.3.1. Techniques dites de « multiple patterning »

Les techniques de multiplication dites de « multiple patterning » permettent de doubler, quadrupler ou d'octupler la densité de certains motifs. Elles ont permis à l'industrie de continuer à diminuer les dimensions des dispositifs, depuis quelques années maintenant, tout en utilisant les outils de lithographie 193nm à immersion. Leur apparition n'est due qu'au retard de développement considérable de la lithographie EUV qui sera décrite dans la section suivante.

Il existe 3 grandes techniques de multiplication de la densité :

- LELE (pour Litho-Etch-Litho-Etch). Cette méthode consiste en une première étape de lithographie qui définit des motifs non denses (ratio largeur ligne/tranchée < 1). Les motifs sont ensuite transférés par gravure plasma dans un premier masque dur, puis une seconde étape de lithographie décalée de la première permet de réaliser des structures dans les espaces disponibles. Finalement, les motifs sont tous transférés dans le second masque dur (figure I.5)

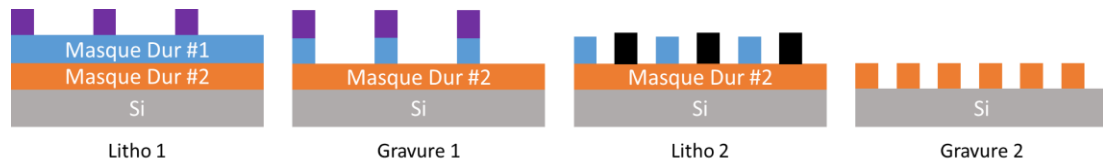


Fig. I.5 : Représentation schématique en coupe de la méthode LELE

Cette technique coûte cher puisqu'il faut réaliser deux étapes de lithographie et deux étapes de gravure plasma.

- LFLE (pour Litho-Freeze-Litho-Etch). La méthode LFLE est dérivée de la LELE, elle a été introduite pour minimiser les coûts de la technique LELE. En effet la première étape de gravure du LELE est remplacée par une étape où l'on fige les motifs de résine de la première étape de lithographie. Par figer on entend la modification physicochimique des motifs de résine pour les rendre insolubles dans la solution qui permet le dépôt du film de résine de la seconde étape de lithographie (figure I.6).



Fig. I.6 : Représentation schématique en coupe de la méthode LFLE

Cette technique nécessite néanmoins des résines compatibles avec l'étape de « Gel » (consistant à un traitement chimique ou thermique) et reste une technique coûteuse.

Il est à noter que les techniques LELE et LFLE souffrent d'une sensibilité accrue à l'alignement entre deux niveaux d'un dispositif (overlay). En effet, ces dernières possèdent deux étapes de lithographie pour un même niveau. Pour les nœuds technologiques avancés, le contrôle de l'overlay est presque aussi drastique que le contrôle de la dimension critique des motifs. Conséquemment, leur utilisation est possiblement délaissée pour la méthode suivante.

- SAMP (pour Self-Aligned-Multiple-Patterning) où M peut être D, Q ou O (pour Double, Quadruple ou Octuple). La méthode SAMP ne contient contrairement aux méthodes LELE et LFLE qu'une unique étape de lithographie. Après l'étape de lithographie, on procède à un dépôt conforme d'un matériau appelé espaceur (ou spacer en anglais), ce dépôt est ensuite partiellement gravé, puis l'on retire le matériau dans lequel sont réalisées les lignes (on parle de motifs sacrificiels ou dummy patterns). Ensuite les motifs obtenus dans le matériau d'espaceur sont transférés par gravure plasma dans le masque dur (figure I.7).

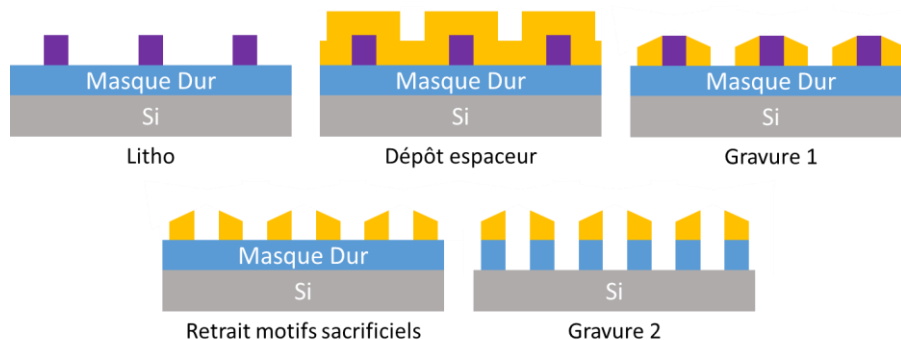


Fig. I.7 : Représentation schématique en coupe du doublement du nombre de motifs de lignes par SADP.

Les motifs obtenus avec la technique SADP peuvent subir les étapes montrées dans la figure I.7 pour doubler encore une fois le nombre de motifs. On parle alors de SAQP. L'industrie a démontré

qu'il était possible de réaliser encore une fois cette technique, on multiplie alors le nombre de motifs par 8 (SAOP).

La particularité de ces stratégies a engendré une augmentation du nombre d'étapes nécessaires à la réalisation des différents niveaux en plus de forcer les designers à repenser les règles de dessin puisque certaines géométries sont incompatibles avec ces procédés. Le lecteur pourra se reporter aux références [1.8-10] pour plus d'informations sur les techniques. Ces techniques permettent d'atteindre de forte densités, mais sont peu flexibles et coûteuses pour l'industrie, l'idéal serait de pouvoir réaliser des motifs en une seule étape de lithographie.

1.3.2. EUV – Photolithographie aux Ultra-Violet extrêmes

L'utilisation d'une longueur d'onde diminuée pourrait permettre la génération de structures plus petites comme le laisse voir l'équation I.3. Il existe une technologie de lithographie émergente qui va dans ce sens. On parle de lithographie EUV, elle se propose d'utiliser une longueur d'onde de 13.5nm (photons d'énergie environ 92 eV). L'utilisation d'une telle longueur d'onde pose quelques problèmes que l'industrie essaye de résoudre depuis presque 10 ans, notamment la puissance de la source. Pour une quantité d'énergie donnée à déposer dans le matériau cible (on parle de dose), une faible puissance source implique une durée importante d'exposition au rayonnement. L'objectif est de pouvoir produire environ 100 plaques par heure avec un seul équipement de lithographie EUV.

La génération d'UV de longueur d'onde 13.5nm est problématique, les atomes neutres et la matière condensée ne peuvent pas produire une telle radiation. Pour générer des photons à haute énergie, il faut utiliser par exemple des plasmas possédant des espèces ionisées auxquelles on peut retirer des électrons plus fortement liés à l'atome qui les porte. Les développements industriels utilisent actuellement un plasma d'étain. Ce dernier est généré grâce à l'excitation de gouttelettes d'étain par un laser CO₂ de forte puissance (>200kW).

Un autre problème que rencontre la technique est que tous les matériaux absorbent à une telle longueur d'onde et limitent conséquemment l'énergie déposée dans le matériau à structurer. L'intégralité des optiques doit donc être sous vide. Un développement particulier a permis de générer des matériaux multicouches Mo/Si qui n'absorbent que 30% la lumière EUV. La lithographie EUV utilise donc des optiques réfléchives contrairement aux optiques en transmission utilisées dans les équipements 193nm. Au final la puissance qui arrive au niveau de la plaque de silicium est considérablement diminuée et en 2015 les prototypes permettent une production d'environ 1000 plaques en une journée (soit une quarantaine de plaques à l'heure, encore loin de l'objectif des 100 plaques à l'heure) [1.11].

Compte tenu des capacités de résolution d'un système EUV, le moindre défaut même nanométrique sera imagé, réduisant ainsi le rendement de la technique. Un des soucis de la lithographie EUV est de garder ses optiques propres de toute contamination. Cette dernière peut de plus être sujette à de la croissance de matériaux carbonés issus du dégazage d'espèce des matériaux polymères de résine employés pendant l'exposition (on parle de dégazage et croissance).

L'équipement seul de lithographie EUV coûte plus de 100M\$, le rajout du prix des jeux de masques nécessaires aux expositions rend finalement la technique extrêmement coûteuse.

1.3.3. DSA - Auto-assemblage dirigé des copolymères à bloc

Les copolymères à blocs, sont des chaînes polymères constituées de deux homopolymères reliés par une liaison covalente. Ils peuvent être linéaires, greffés ou en étoile. Par exemple, le cas d'un copolymère linéaire à deux blocs constitué de deux comonomères A et B sera représenté AAAAA-BBBBB et noté PA-b-PB. Soit N le nombre total de monomères du copolymère considéré et f_A la fraction en comonomère A, on a alors $f_A \cdot N$ comonomères A et $(1-f_A) \cdot N$ comonomères B. Pour un tel polymère on peut calculer la grandeur X_N (paramètre d'incompatibilité de Flory-Huggins) qui rend compte des interactions entre les deux blocs. Si X_N devient suffisamment important (en général > 10.5), les blocs sont non-miscibles et on peut observer la formation de nano-domaines périodiques.

Selon la valeur de N et f_A , il a été montré que les copolymères linéaires pouvaient s'organiser en plusieurs structures d'équilibre (figure I.8) : Lamellaire (notée L), hexagonale (notée H ou C), bicontinue (notée G, pour gyroid) et sphérique (notée S) [1.12].

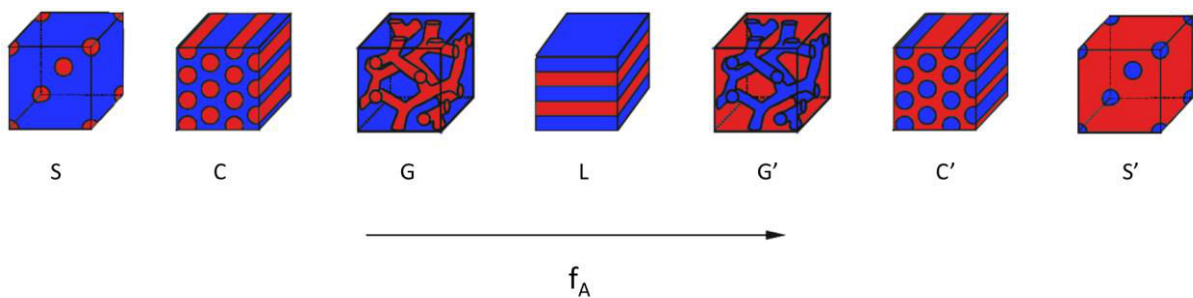


Fig. I.8 : Représentation schématique des phases obtenues avec un copolymère di-bloc linéaire en fonction de la fraction en comonomère A. [1.13]

L'industrie microélectronique travaille depuis quelques années pour utiliser à son avantage ce phénomène d'organisation périodique. Il est en effet possible d'introduire de tels copolymères dans les procédés de la microélectronique et de réaliser localement (à l'aide de structures préexistantes par exemple) une organisation dirigée du copolymère déposé. L'organisation dirigée dépend de plusieurs paramètres comme l'épaisseur du film de copolymère, l'affinité des blocs du copolymère avec les matériaux environnants. Selon la méthode utilisée pour réaliser l'organisation des copolymères à blocs on parle de grapho-épitaxie ou chemo-épitaxie. Une fois l'organisation réalisée, on peut réaliser le retrait sélectif d'un des deux blocs du copolymère afin de générer de nouvelles structures.

En microélectronique on peut trouver à l'heure actuelle diverses utilisations de cette auto-organisation. La figure I.9 montre par exemple son utilisation pour réduire la taille et multiplier le nombre de trous de contact de motifs guides.

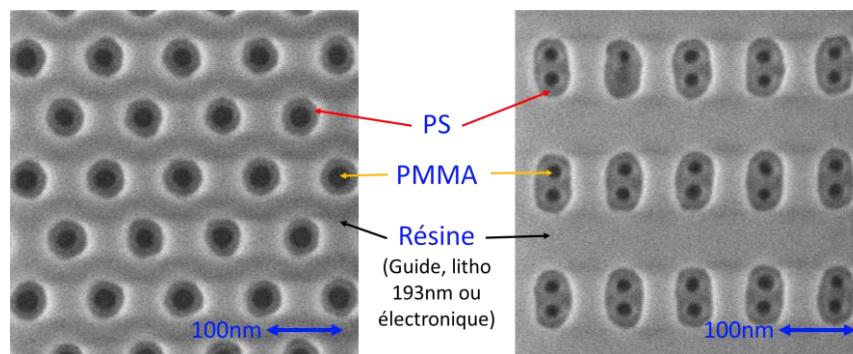


Fig. I.9 : Images en microscopie électronique en vue de dessus de motifs copolymère PS-b-PMMA permettant la formation de cylindres perpendiculairement au substrat dans des motifs de guidage réalisés avec une technique de lithographie conventionnelle.

Les copolymères à blocs permettent également de réaliser la réduction de la période de motifs de lignes et tranchées (line and spaces, abrégé en L/S, figure I.10)

L'attrait de cette technique réside dans deux points :

- Son coût modéré, il est en effet possible d'utiliser diverses techniques de lithographie pour générer les motifs de guidage et donc continuer à utiliser des équipements de lithographie optique 193nm par exemple.
- La taille des structures très faibles réalisables. D'environ 10 nm, voire moins avec certaines formulations de copolymères. ^[1.14]

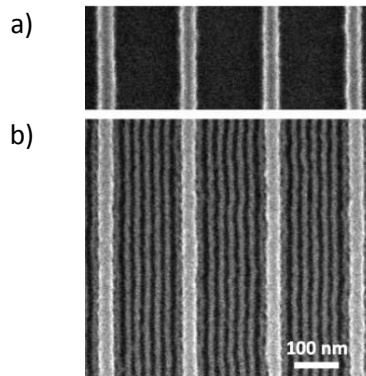


Fig. I.10 : Images en microscopie électronique à balayage de motifs L/S, (a) motifs guides (lithographie électronique), (b) motifs guides + copolymère à bloc lamellaire (reproduction de ^[1.14])

Elle est néanmoins sujette à des défauts d'organisation locaux qui pour l'instant ne permettent pas son utilisation d'un point de vue de production industrielle pour la réalisation de puces (on parle de défektivité).

1.3.4. Nano-impression

La technique de lithographie appelée nano-impression, permet la réalisation de motifs tridimensionnels complexes par application d'une déformation dans un matériau polymère à l'aide d'un moule possédant des micro/nano-structures sur sa face active (en contact avec le matériau polymère organique ou inorganique, cf. figure I.11).

La formation de motifs repose sur le fait que le matériau de résine puisse remplir les cavités du moule et garde la forme imprimée après démoulage. On rencontre les termes de nano-impression assistée thermiquement ou par les UV. La première génère les motifs dans le matériau de résine porté à une température supérieure à sa température de transition vitreuse (T_g), puis on procède au retrait du moule à une température inférieure à la T_g . La seconde utilise un moule transparent aux UV et fait réticuler le matériau polymère sous l'action des UV, puis on procède au retrait du moule.

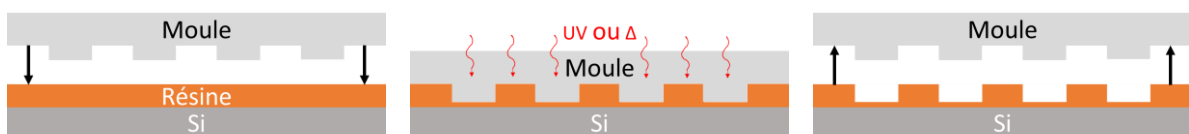


Fig. I.11 : Schéma de principe de la technique de nanoimpression en vue en coupe

Contrairement aux techniques de lithographie optique et électronique où la génération de motifs est due à la transformation chimique locale du matériau de résine (on parle de contraste

chimique), la nano-impression permet de réaliser des motifs par « contraste topologique » et permet donc la réalisation de structures dans une très large gamme de matériaux.

Des structures générées avec la nano-impression de dimensions inférieures à 15nm ont été reportées dans la littérature ^[1.16-17]. Néanmoins pour réaliser de telles structures il faut produire un moule possédant la structure complémentaire ce qui nécessite l'utilisation d'autres techniques de lithographie à disposition (lithographie optique, électronique, etc...).

Cette technique souffre néanmoins de la présence de défauts dans les motifs produits, souvent générés à l'étape de retrait du moule à cause de phénomènes d'adhésion et de friction à l'interface moule-résine ^[1.18].

La simplicité de la technique et la large gamme de matériaux imprimables permet à des domaines variés comme la photonique, le stockage magnétique et les biotechnologies de bénéficier de nanostructures réalisées avec la nano-impression. La nano-impression est une technique peu coûteuse en comparaison aux autres techniques de lithographie et son champ d'application n'est pas restreint au domaine de la microélectronique. Pour plus d'information sur la technique le lecteur pourra se reporter aux références ^{[1.15] [1.19] [1.17] [1.20]}.

1.3.5. ML2 – Lithographie électronique simple et multifaisceaux

Dans cette section relative aux techniques sans masque (ML2) seules les lithographies électronique simple et multifaisceaux sont abordées. En effet, on peut également trouver la lithographie à faisceau d'ion et les techniques utilisant des microscopes à sonde locales (microscopes à force atomique et à effet tunnel) parmi les techniques sans masques.

La lithographie électronique (notée ebeam pour electron beam) tout comme la photolithographie repose sur la modification chimique locale d'un matériau, dans ce cas le dépôt d'énergie nécessaire à la modification du matériau cible est réalisé à l'aide du balayage d'un faisceau d'électrons et l'étape de développement révélera les motifs. Il s'agit d'une écriture séquentielle, l'écriture d'un motif complet requiert le passage du faisceau au-dessus des zones définies par l'utilisateur. Les électrons générés par la source sont portés à l'énergie de fonctionnement de l'équipement (généralement 50 et 100 keV) grâce à l'application d'une tension dite d'accélération.

Le détail de la constitution des équipements relatifs à la technologie de lithographie électronique à faisceau(x) simple et multiples est décrit dans le chapitre II puisque cette dernière permet d'introduire les équipements utilisés au cours de ces travaux de thèse.

La résolution atteinte par la technique est souvent limitée par la taille du faisceau qui balaye la cible et est de l'ordre de grandeur de cette sonde. La tendance générale pour augmenter la résolution de la technique est d'augmenter la tension d'accélération des électrons. En effet, cela limite les phénomènes d'aberrations dans le faisceau et permet donc de diminuer la taille du faisceau. Néanmoins ce n'est pas le seul critère permettant d'avoir un faisceau de faible taille. **Le détail des phénomènes physiques liés à l'utilisation d'électrons comme quanta pour véhiculer l'information des motifs à réaliser est abordé dans la partie 3 de ce chapitre.**

Par ailleurs, les travaux issus de la littérature ont montré la possibilité de réaliser des motifs isolés de 2 nm de dimension critique et des motifs périodiques de 5 nm de demi-pas ^[1.21].

Un des avantages indéniables de la lithographie électronique est sa flexibilité. Celle-ci repose sur la capacité de pouvoir réaliser des structures sans masques, en effet les motifs à réaliser dans le

matériau cible sont dessinés sur ordinateur puis décomposés en formes élémentaires telles que des carrés, rectangles, triangles (inclinés à 0 ou 45° par rapport aux axes du substrat) ou des points (que l'on note pixels) selon l'équipement utilisé. Cette étape que l'on nomme préparation des données permet de transformer un dessin dans un format lisible par la machine de lithographie.

Bien que la technique soit très résolutive et flexible, elle souffre néanmoins d'un manque de débit considérable. Son utilisation à l'heure actuelle concerne essentiellement la création de masques pour la photolithographie, le prototypage et le test de dispositifs en avance de phase. Le temps d'écriture d'une plaque de silicium 300 mm est de l'ordre de la centaine d'heure avec un outil à faisceau gaussien et de la dizaine d'heure avec un outil à faisceau formé. Depuis une dizaine d'année environ, quelques entreprises telles que MAPPER lithography, IMS Nanofabrication, KLA-Tencor et d'autres ont projeté l'idée de réaliser des équipements (d'énergie allant de 5keV à 50keV) comportant plusieurs faisceaux d'électrons qui écrivent en parallèle afin d'utiliser les avantages de la flexibilité et de la grande résolution de la technique tout en augmentant son débit. On parle alors d'équipements de lithographie électronique multifaisceaux (multibeam en anglais).

Le CEA-LETI s'est associé avec MAPPER Lithography (une entreprise hollandaise) afin d'aider au développement de la technologie de lithographie électronique multifaisceaux basse énergie (électrons d'énergie 5 keV – tension d'accélération de 5kV). Ce choix de la basse énergie a été réalisé pour permettre la réalisation des motifs avec une dose plus faible qu'à haute énergie (l'explication du phénomène sera fournie dans la section relative à l'interaction électron matière plus loin dans ce chapitre). Cette technologie pourra à terme produire des dispositifs pour les nœuds technologiques actuels et futurs. L'équipement final prévu comportera 13260 faisceaux et permettra l'écriture de 10 plaques par heure pour un coût d'environ 10M\$. **Les travaux de thèse de ce manuscrit visent à contribuer au développement de cette technologie.**

1.3.6. Comparatifs des techniques pour les nœuds avancés

Le tableau I.2 résume les performances relatives actuelles des différentes techniques de lithographie en développement pour les nœuds technologiques inférieurs à 20nm.

Tableau I.2 : Résumé des performances relatives des techniques de lithographie nouvelle génération

Technique de Lithographie	Résolution	Débit	Coût	Défectivité	Flexibilité	Légende
Multiple Patterning	+	-	-	?	-	- Mauvais
EUV	+	AD	-		-	Neutre
DSA	+	-	+	-	-	+ Bien
Nano-impression	+	+	+	-	+	AD A démontrer
Electronique multifaisceaux	+	AD	+		+	? Inconnu

Pour la résolution, les évaluations sont faites par rapport à la technique de photolithographie 193nm
 Pour le reste ce sont des évaluations entre les différentes techniques réalisées grâce aux informations contenues dans les sections précédentes

2. Les résines d'exposition

Les résines d'exposition sont des matériaux polymères qui voient leurs propriétés physico-chimiques localement modifiées sous l'exposition à un flux de photons ou d'électrons (la photolithographie et la lithographie électronique partagent de nombreuses formulations de résine à quelques constituants près). L'exposition doit créer un contraste chimique pour permettre la révélation des motifs.

La modification locale du matériau va le rendre soluble ou insoluble dans le bain révélation (dit étape de développement). Le fait de devenir soluble ou insoluble après exposition permet d'introduire l'existence de 2 familles de matériau de résine. Les résines dites positives et les résine dites négatives (figure I.12).

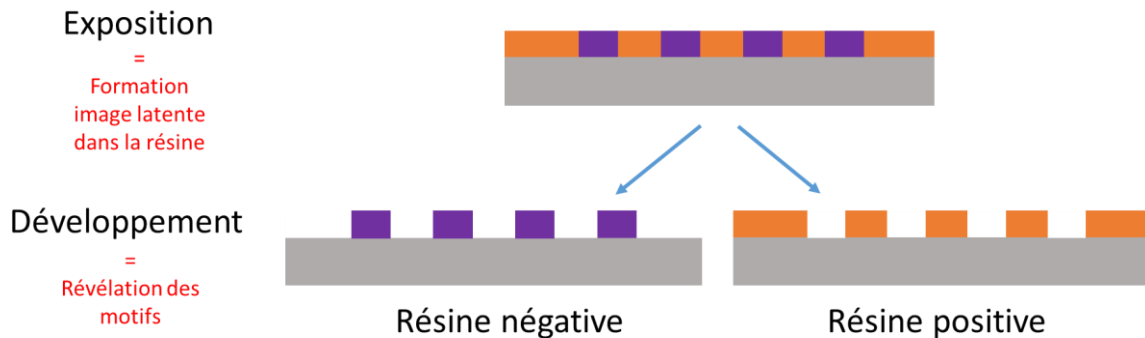


Fig. I.12 : Représentation schématique d'une résine positive et négative. Les zones violettes ont été modifiées par l'exposition contrairement aux zones oranges.

Les résines positives subissent des modifications telles que leur poids moléculaire moyen se voit diminuer sous exposition par coupure de liaisons covalentes, leur constante d'acidité (pKa) peut également être modifiée. Les zones exposées dans ce cas deviennent soluble après exposition, les parties non-insolées demeurent (figure I.12).

Les résines négatives, elles, voient leur poids moléculaire moyen augmenter et/ou la polarité de leurs groupements latéraux changer sous exposition ^[1.73]. Les zones exposées deviennent insolubles, les parties non-insolées sont solubilisées.

Les résines initialement en solution, sont déposées sous forme de films fins sur les matériaux de l'empilement de lithographie. Les tenants et aboutissants de la préparation et traitement des films de résine sont décrits au chapitre II dans la partie relative au procédé lithographique.

De manière générale, il faut une dose finie par unité de volume pour changer les propriétés des résines. On parle de sensibilité de la résine. Une résine est dite sensible si la dose d'exposition requise est faible et elle permettra donc une production horaire plus importante qu'une résine moins sensible. C'est l'un des critères les plus importants qui a permis l'émergence des résines à amplification chimiques décrites dans la section suivante.

2.1. Evolution des résines

Le fort développement industriel qu'a subi l'industrie microélectronique a largement dirigé l'évolution des matériaux de résine, notamment en matière de sensibilité. Il a permis l'apparition des résines dites à amplification chimique, ce concept a été découvert et largement développé par l'entreprise IBM.

Types de résines

Il existe deux groupes de résines :

1. Les résines dites conventionnelles (ou non-amplifiées), souvent utilisées en lithographie électronique à simple faisceau puisque ne répondant pas à des critères de production horaire. Dans ces résines on trouve :

- L'HSQ (pour Hydrogen Silsesquioxane) qui est un silsesquioxane constitué d'une cage cubique et dont les atomes de silicium comportent un hydrogène, il a pour formule brute $H_8Si_8O_{12}$ (figure I.13). Ce matériau réticule sous exposition à un faisceau d'électrons et sert de résine négative.

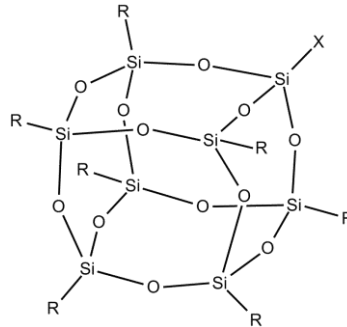


Fig. I.13 : Représentation en formule topologique d'un silsesquioxane à cage cubique, lorsque les groupements notés R sont remplacés par des H on obtient l'HSQ.

- Le poly(méthacrylate de méthyle) (abrégé en PMMA) est lui un matériau utilisée comme résine positive (figure I.14).

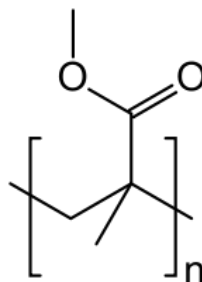


Fig. I.14 : Représentation en formule topologique d'une chaîne linéaire de PMMA

Ces résines sont souvent utilisées par les laboratoires universitaires, puisque leur structure chimique est entièrement connue. Il existe d'autres résines non-amplifiées mais ce point n'est pas développé ici, puisque non-relatif à ces travaux de thèse.

2. Les résines amplifiées chimiquement (notées CAR, pour Chemically Amplified Resist) largement utilisées en photolithographie. Elles répondent au critère de production industriel de la sensibilité grâce à la présence de molécules qui soumises au rayonnement d'exposition (photons ou électrons) vont libérer des espèces chimiques entraînant de nombreuses réactions catalytiques. Ces molécules sont appelées photogénérateurs d'acides (abrégé en PAG, pour PhotoAcid Generator) et libèrent un proton dans la matrice polymère qui peut ensuite diffuser et réagir. Cela permet de limiter la dose incidente puisque les modifications chimiques ne sont plus dues uniquement au rayonnement. Le polymère représente environ 95% de la masse du film de résine, le PAG et les autres constituants représentent le reste de la masse.

Fonctionnement d'une résine positive amplifiée chimiquement

Pour la majeure partie des résines positives à amplification chimique, les polymères sont des chaînes linéaires avec des groupements latéraux présentant des fonctions ester entre autres. Dans les zones exposées, la libération d'un proton par le PAG va conduire à la déprotection des fonctions esters des groupements latéraux de la chaîne polymère pour former des acides carboxyliques. Un seul acide peut déprotéger plusieurs centaines de sites fonctionnels [1.22].

Ces matériaux de résine contiennent également une base appelée « quencher ». Le rôle de la base est de neutraliser en partie l'acide et limiter sa diffusion dans les zones non-exposées. La présence de l'acide et de la base permet de renforcer le contraste chimique. Simplement, la zone exposée doit présenter un maximum de sites déprotégés afin d'assurer la solubilité de cette zone lors du développement et la zone non-exposée doit présenter le moins de sites déprotégés possibles afin de limiter au maximum la solubilité des chaînes de cette zone lors du développement. Au final les actions conjuguées des acides et des bases créent une zone où la déprotection des groupements latéraux des chaînes polymère de la résine est telle que c'est dans cette zone que sera défini le bord du motif après révélation.

Remarque : Depuis quelques années on peut voir certaines plateformes de résine comporter également une base photo-décomposable (PDB), ces dernières permettent d'apporter un contraste chimique plus important en dégradant par irradiation (photon) les molécules de bases présentes dans les zones exposées.

Brève évolution des résines

Les changements de longueur d'onde en photolithographie ont entraîné une modification radicale des polymères utilisés pour ces lithographies. En effet c'est le PAG qui doit être impacté par la radiation incidente, la chaîne polymère associée doit absorber le moins possible cette radiation sous peine de générer des hétérogénéités de dose d'exposition entre le haut et le bas du film de résine.

C'est pour cela que de nos jours on parle souvent en microélectronique de plateformes de résines, notamment des plateformes 248nm (KrF) basées sur des monomères de para(hydroxystyrène) et 193nm (ArF) basée sur des monomères d'acrylate/méthacrylate. Ces dénominations sont relatives à la longueur d'onde optimale d'utilisation de ces résines, la figure I.15 présente les exemples de structures de telles résines.

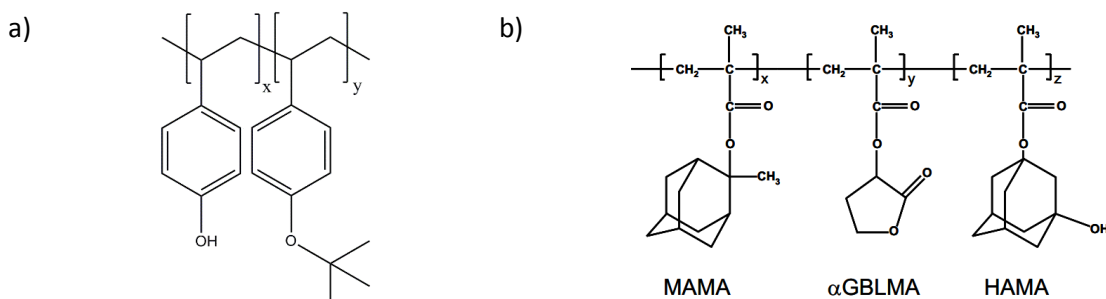


Fig. I.15 : Représentations de chaînes polymères de résines amplifiées chimiquement, (a) 248nm comportant des comonomères parahydroxystyrène et 1-(tert-butoxy)-4-vinylbenzène [1.23] et (b) 193nm (reproduction de [1.24], les noms en lettres capitales sont les versions abrégées des noms commerciaux anglais des comonomères du polymère de résine, MAMA = Methyl Adamantane MethAcrylate, alphaGBLMA = alpha-GammaButyrolactone MethAcrylate et HAMA = HydroxyAdamantane MethAcrylate)

C'est la forte absorbance des radiations de longueur d'onde de 193nm des polymères contenant des monomères para(hydroxystyrène) qui a conduit au passage des résines 248nm à 193nm (figure I.16).

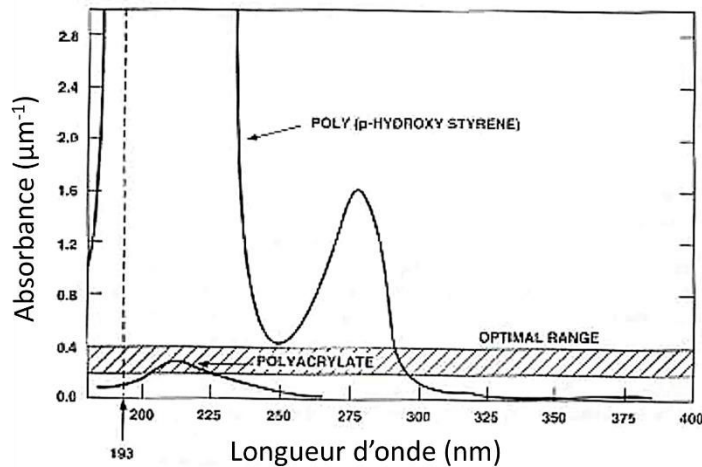


Fig. I.16 : Courbes d'absorbance de polymères de type poly(parahydroxystyrène) et polyacrylate pour la gamme de longueur d'onde de 175 à 400nm (reproduction de [1.25])

La réduction envisagée de la longueur d'onde à 13.5nm (lithographie EUV) ne posera pas ce genre de problème puisque tous les matériaux sont absorbants à cette longueur d'onde. Pour la lithographie électronique les phénomènes physiques mis en jeu sont différents (cf. partie 3 de ce chapitre) et ces considérations d'absorption n'ont pas lieu d'être.

Les plateformes de résines destinées à la lithographie EUV peuvent donc comporter un large panel de monomères. Certaines sont basées sur des plateformes de types 193nm uniquement et d'autres possèdent des monomères relatifs aux deux plateformes. Les résines développées pour la lithographie EUV sont compatibles avec une utilisation en lithographie électronique. Dans le cadre de ces travaux de thèse la résine utilisée est une version légèrement modifiée d'une résine initialement destinée pour la lithographie EUV, qui combine des monomères relatifs aux plateformes 248nm et 193nm (cf. chapitre II, section 4.1.1).

Il semble également important de préciser que dans le cas des résines amplifiées chimiquement les plus récentes, les fournisseurs de ces matériaux refusent de communiquer la formule chimique ou même la composition atomique de ces dernières. Informations qui pourraient aider largement à la compréhension de phénomènes mis en jeu lors de l'étape de lithographie électronique mais également lors des traitements des films de résine par divers procédés. C'est alors à l'utilisateur de la caractériser lui-même avec les outils à disposition.

2.2. Critères de performance d'une résine

Il y a 3 grands critères permettant l'évaluation des performances d'une résine : la **sensibilité**, la **résolution** et la **rugosité**.

Sensibilité :

Pour comparer la sensibilité des résines, on détermine la dose nécessaire à la modification de la résine sur toute la hauteur du film pour une large surface. On parle alors de dose-to-clear. On la détermine en mesurant à l'aide d'un ellipsomètre l'épaisseur du film de résine après développement

en fonction de la dose d'exposition. Lorsque celle-ci atteint une valeur nulle on a atteint la dose-to-clear. Une telle courbe est appelée courbe de contraste (figure I.17).

Une caractéristique importante des résines, comme le montre la courbe de contraste de la figure I.17, est son comportement dit à seuil. On peut nettement voir que le film de résine ne perd que très peu d'épaisseur en fonction de la dose jusqu'à une certaine dose après laquelle toute l'épaisseur est retirée pour une très faible augmentation de la dose. Une résine idéale aurait un comportement binaire avec aucune perte d'épaisseur jusqu'à une dose donnée et une perte totale d'épaisseur après cette dose. Néanmoins les résines s'écartent de ce comportement idéal et on modélise en général la perte d'épaisseur en fonction de la dose par la fonction :

$$E(D) = E_0 * \left(1 - \left(\frac{D}{D_0}\right)^\gamma\right) \quad (\text{eq. I.4})$$

où E est l'épaisseur du film de résine, E_0 l'épaisseur initiale du film de résine, D est la dose d'exposition, D_0 la dose-to-clear et γ le contraste de la résine. Graphiquement γ correspond à la pente de la tangente à la courbe de contraste en D_0 . Dans le cas d'une résine négative on remplace γ par $-\gamma$ dans l'équation I.4.

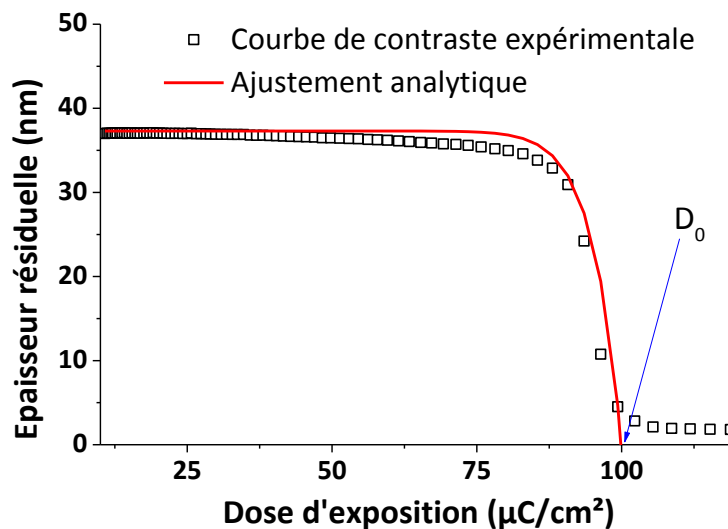


Fig. I.17 : Courbe de contraste expérimentale réalisée avec le Vistec SB3054 (50kV) et son ajustement analytique (pour un empilement résine d'étude sur silicium).

Plus D_0 est faible plus la résine est sensible et inversement. Un fort contraste est synonyme, en général, de bonnes capacités de résolution mais ce n'est pas un critère suffisant pour l'affirmer.

Le poids moléculaire du polymère de la résine et sa distribution impactent la courbe de contraste et donc la sensibilité et la résolution de la résine [I.26].

- Le poids moléculaire moyen. Plus il est grand, moins une résine positive sera sensible (et inversement pour une résine négative).
- L'indice de polymolécularité, noté I et égal au rapport de la masse molaire moyenne en masse par la masse molaire moyenne en nombre. Lorsqu'il est égal à 1 les chaînes ont toutes le même nombre de monomères. Plus cette valeur est proche de 1 meilleur sera le contraste. En effet, si I n'est pas égal à 1, le matériau présentera des hétérogénéités de propriétés de solubilité et les chaînes de plus faible poids moléculaire auront tendance à être soluble pour des moins grandes doses d'exposition (dans le cas d'une résine positive).

La faible perte d'épaisseur de la courbe expérimentale visible pour les doses avant la forte pente est appelée « dark-erosion » et montre que la résine même faiblement exposée est soluble dans le bain de révélation. Ce phénomène est néfaste aux performances lithographiques, puisqu'il participe dans le cas d'une résine positive au retrait d'une partie de la résine même dans des zones faiblement exposées.

Résolution :

La résolution est la taille minimale des structures réalisables avec le matériau de résine. Lorsque l'équipement de lithographie n'est pas limitant en termes de résolution, c'est-à-dire qu'il est capable de produire un contraste en énergie suffisant, le facteur limitant peut être la résine. La résolution de la résine est intimement liée au contraste chimique réalisé grâce à l'exposition.

Les résines non-amplifiées chimiquement ne possédant pas d'espèces induisant des modifications chimiques par diffusion d'une molécule spécifique permettent l'obtention d'un contraste chimique très proche du contraste en énergie, elles possèdent les meilleures capacités de résolution.

Dans le cas de résines amplifiées chimiquement, c'est la longueur de diffusion d'acide qui va limiter la résolution de la résine (figure I.18). Plus cette longueur de diffusion est grande, plus il est difficile de contrôler finement la zone dans laquelle les modifications chimiques de la résine ont lieu, le contraste chimique est impacté, néanmoins les résines à amplification chimique sont les matériaux de lithographie actuels présentant les plus fortes valeurs de contraste. Le phénomène est en général peu limitant dans le cas de motifs isolés, cependant dans le cas de plusieurs motifs, si on rapproche de plus en plus les structures à réaliser on aboutira finalement à la dimension minimale réalisable dans le matériau.

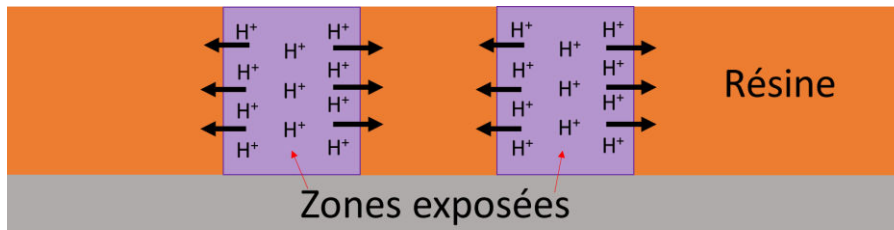


Fig. I.18 : Représentation schématique du phénomène de diffusion d'acide

En général, la procédure pour déterminer la résolution est d'exposer des motifs de plus en plus denses pour des larges plages de dose, finalement on trouvera une densité de motif ultime pour laquelle qu'il n'existe qu'une seule dose sans défauts, dose en dessous de laquelle on ne serait pas résolu et dose au-dessus de laquelle on serait surdosé.

Rugosité de ligne (LWR/LER) :

La rugosité de ligne se caractérise par deux paramètres le LWR et le LER (pour Line Width Roughness et Line Edge Roughness). Elle se matérialise par des bords de motifs irréguliers (figure I.19.a). Le LWR est défini comme 3 fois l'écart-type de la distribution des dimensions critiques (CD) du motif de ligne :

$$LWR = 3 \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (CD_j - \langle CD \rangle_N)^2} \quad (\text{eq. I.5})$$

où N est le nombre de mesures de CD réalisées le long de la ligne, CD_j est la valeur de CD de la ligne au point de mesure j et $\langle CD \rangle_N$ la valeur moyenne du CD sur les N mesures (figure I.19.a)

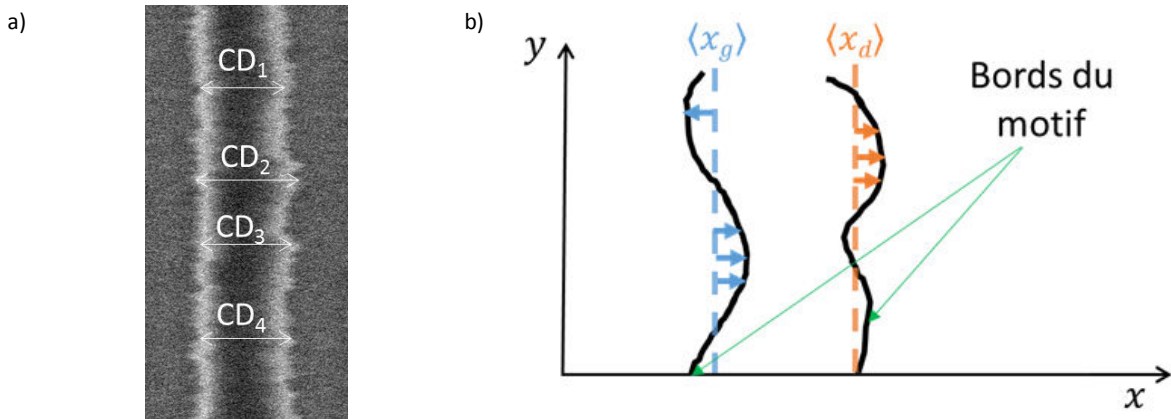


Fig. I.19 : (a) Image de microscopie électronique à balayage en vue de dessus d'un motif de ligne montrant diverses mesures de CD le long de la ligne. (b) Représentation schématique du LER (distance entre le bord d'un motif de ligne et la position moyenne du même bord)

Le LER quant à lui rend compte de la déviation (3 fois l'écart-type) de la distribution de la distance entre un bord par rapport à la position moyenne de ce même bord, on a donc un LER_{gauche} et un LER_{droit} (figure I.19.b). Les LER gauche et droit et le LWR sont liés par leurs variances et la relation :

$$\sigma_{LWR}^2 = \sigma_{LERg}^2 + \sigma_{LERd}^2 - 2 * \rho * \sigma_{LERg} \sigma_{LERd} \quad (\text{eq. I.6})$$

où ρ est le coefficient de corrélation entre les bords, la figure I.20 représente les cas extrêmes de corrélation des bords.

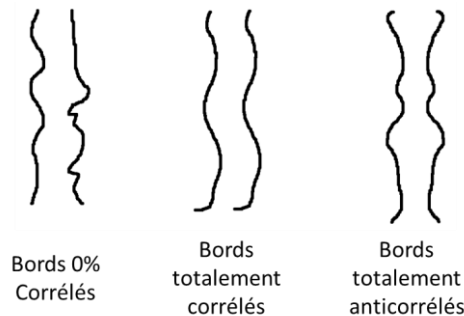


Fig. I.20 : Représentation schématique de la corrélation des bords des motifs

A l'heure actuelle, la rugosité de ligne est devenue un des facteurs critiques limitant la miniaturisation des transistors. En effet, cette dernière impacte négativement les performances des transistors en générant des courants de fuite^[I.27-34]. Il est donc crucial de la déterminer avec précision.

Le compromis RLS

On trouve beaucoup dans la littérature le terme de compromis RLS (ou RLS tradeoff, pour Resolution – LWR/LER – Sensitivity tradeoff). Il exprime l'incapacité de pouvoir améliorer à la fois de façon conséquente la résolution, la rugosité et la sensibilité d'une résine à amplification chimique et est souvent représenté sous la forme d'un triangle (figure I.21).

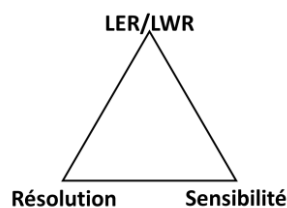


Fig. I.21 : Compromis RLS

Au cours des dernières années, les résines à amplification chimique ont été largement améliorées en termes de sensibilité et résolution. Par contre, les objectifs de rugosité fixés par l'ITRS ne sont clairement pas atteints pour les nœuds technologiques avancés qui requièrent une rugosité inférieure à 1.7 nm par exemple pour le nœud 20nm alors qu'actuellement les valeurs de LWR après lithographie sont de 4 à 5 nm.

Ainsi, les travaux de cette thèse visent à mieux comprendre la génération de la rugosité de lignes de résine par lithographie électronique afin de proposer des solutions pour l'améliorer.

3. La théorie liée à la lithographie électronique

Cette partie se consacre à la description des phénomènes physiques liés à l'utilisation d'électrons, d'abord les phénomènes liés au comportement des électrons accélérés dans le vide et ensuite les interactions entre les électrons et le matériau cible.

3.1. L'électron accéléré dans le vide

3.1.1. Comportement de l'électron

Longueur d'onde des électrons :

La longueur d'onde λ des électrons est donnée par l'équation de De Broglie :

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (\text{eq 1.7})$$

où h est la constante de Planck et p la quantité de mouvement de l'électron accéléré à la tension V .

La vitesse $v_{\text{classique}}$ d'un électron non-relativiste est donnée par l'équation :

$$v_{\text{classique}} = \sqrt{\frac{2eV}{m_0}} \quad (\text{eq 1.8})$$

où e est la charge élémentaire de l'électron et m_0 la masse de l'électron au repos.

Ainsi on peut donner la longueur d'onde de l'électron (non-relativiste) égale à :

$$\lambda_{\text{classique}} = \frac{h}{p} = \frac{h}{m_0 v_{\text{classique}}} = \frac{h}{\sqrt{2m_0 eV}} \quad (\text{eq 1.9})$$

Lorsque des électrons sont accélérés aux tensions de 5kV et 50kV, on obtient d'après l'équation 1.8 des vitesses égales à environ 14% et 44% de la vitesse de la lumière dans le vide c (égale à 299 792 458 m.s⁻¹). Un électron accéléré à 50kV a donc une vitesse telle qu'il ne peut plus être considéré non relativiste et sa longueur d'onde s'écrit :

$$\lambda_{\text{relativiste}} = \frac{h}{\sqrt{2m_0 eV}} * \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{eV}{2m_0 c^2}}} \quad (\text{eq 1.10})$$

Application numérique :

Pour les tensions d'accélération de 5kV et 50kV, on obtient respectivement des longueurs d'ondes de 17 pm et 0.5 pm. A titre de comparaison un photon de la lithographie DUV dernière génération est de 193nm. Ainsi, compte tenu des tensions d'accélération utilisées en lithographie électronique, la diffraction des électrons ne sera pas un facteur limitant pour la résolution.

Localisation d'un électron :

Le principe d'incertitude d'Heisenberg (équation I.11) énoncé en 1927, affirme l'impossibilité de connaître avec certitude à la fois la vitesse et la position d'une particule à un instant donné.

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{2\pi} \quad (\text{eq I.11})$$

où Δx et Δp sont les incertitudes sur la position et la quantité de mouvement.

Application numérique :

Dans le cas des électrons utilisés en lithographie électronique, sachant que le contrôle de la tension d'accélération des équipements se traduit en une incertitude de 0.1% d'erreur sur la vitesse des électrons^[1,2]. On peut alors considérer pour des électrons accélérés à 5kV et 50kV que l'incertitude de position est au minimum respectivement de $\Delta x_{5kV} = 2.8$ nm et $\Delta x_{50kV} = 0.9$ nm.

On peut donc prévoir qu'à la tension d'accélération de 5kV, la précision de notre dépôt d'énergie dans le matériau cible est réduite et cela peut avoir une implication sur la rugosité des motifs notamment pour les nœuds technologiques futurs.

L'incertitude sur la position d'un électron est intéressante, néanmoins pour réaliser un dépôt d'énergie dans le matériau cible c'est l'extension spatiale du faisceau d'électron qu'il faut considérer.

3.1.2. Extension spatiale d'un faisceau d'électron

Une source d'électrons produit un point source que l'on nomme *crossover*. Dans un cas idéal, la taille du faisceau est égale à la taille du *crossover* divisée par le grandissement du système optique associé à la source (ou colonne électronique contenant de nombreuses lentilles). L'ensemble source/colonne électronique est décrit au chapitre II. Cependant, le système est en réalité imparfait et possède des aberrations qui altèrent l'image du point source.

Les phénomènes d'aberrations que l'on rencontre dans les outils de lithographie électronique et qui impactent la taille du faisceau sont :

- Les aberrations chromatiques
- Les aberrations géométriques
- Les aberrations de charge d'espace

Les deux premières aberrations de la liste précédente sont des phénomènes existants dans l'optique photonique mais également présents dans le cas de l'optique des particules chargées. Le détail calculatoire pour les obtenir est en dehors du cadre de ces travaux de thèse, néanmoins puisqu'elles jouent un rôle significatif dans l'élargissement du faisceau un bref rappel semble de mise.

Les aberrations chromatiques :

Le phénomène d'aberration chromatique d'une lentille traduit la variation de distance focale en fonction de l'énergie des électrons qui traversent la lentille. Les sources ne sont pas parfaites et produisent des électrons non « monochromatiques », on parle alors de dispersion en énergie de la source (cf. chapitre II). La figure I.22 illustre le phénomène.

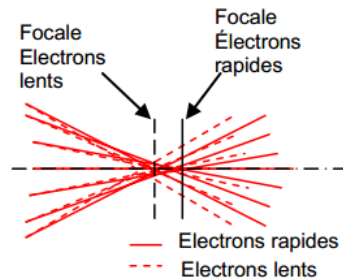


Fig. I.22 : Représentation schématique du phénomène d'aberration chromatique (reproduction de [1,2])

Les aberrations géométriques :

Parmi les aberrations géométriques on trouve les aberrations de coma, de courbure de champ, d'astigmatisme, de distorsion et sphérique. Le phénomène d'aberration sphérique est le plus prononcé des phénomènes d'aberrations géométriques et traduit la variation de la force d'une lentille à mesure que l'on s'éloigne de l'axe optique du système. La figure I.23 illustre le phénomène.

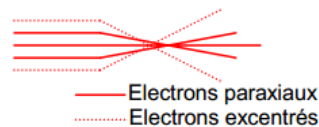


Fig. I.23 : Représentation schématique du phénomène d'aberration sphérique (reproduction de [1,2])

Les aberrations de charge d'espace :

L'utilisation de particules chargées implique la prise en compte des phénomènes de répulsion qu'exercent les particules du faisceau les unes sur les autres.

Dans l'ouvrage de Landis [1,2], on peut trouver un modèle simple qui considère un faisceau d'électrons de rayon r comme un cylindre de densité de charge ρ constante et permet après quelques calculs et approximations d'estimer l'angle α de divergence du faisceau et donc la dilatation du faisceau pour une distance parcourue par le faisceau L (distance entre la lentille de focalisation et la cible).

L'équation suivante exprime la dilatation relative du faisceau :

$$\left. \frac{\Delta r}{r} \right|_{z=L} = \frac{I}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{L}{r} \right)^2 \frac{(V + U_0)^2}{c(V + 2VU_0)^{3/2}} \quad (\text{eq. I.12})$$

où I est le courant du faisceau, V la tension d'accélération des électrons, U_0 l'énergie de l'électron au repos et ϵ_0 la constante de permittivité du vide. D'après cette formule, on peut voir que la dilatation relative est proportionnelle à la fois au courant et au carré de la distance L . De plus le produit $\Delta r.r$ est

constant et implique que si l'on force un faisceau à se contracter par focalisation, il se dilatera d'autant plus.

Application numérique :

Dans le cas d'un faisceau d'énergie 50 keV, avec $r = 30$ nm, $I = 0.1$ nA et $L = 10$ mm (distance entre la lentille de focalisation et la cible), on obtient une dilatation de charge d'espace d'environ 0.9%. Si l'on prend un même faisceau d'énergie 5 keV, la dilatation passe à environ 24.0%

Effet sur la taille du faisceau :

Les phénomènes liés à l'étalement du faisceau s'ajoutent et on peut considérer en première approximation que la taille finale du faisceau est la somme quadratique de l'image du crossover, des aberrations chromatiques, sphériques et de charge d'espace ^{[1.2], [1.35], [1.36]}. On peut alors écrire le diamètre d du faisceau de la manière suivante :

$$d = \sqrt{d_g^2 + d_s^2 + d_c^2 + d_{ce}^2} \quad (\text{eq. I.13})$$

où d_g est le diamètre de du faisceau sans aberrations (taille du crossover divisée par le grandissement du système), d_s la contribution des aberrations sphériques, d_c la contribution des aberrations chromatiques et d_{ce} la contribution des aberrations de charge d'espace (la contribution de la charge d'espace peut être négligée si l'on travaille à faibles courants).

Remarque : Il est à noter que dans le cas de la microscopie électronique à transmission il aurait fallu ajouter à la somme quadratique un terme prenant en compte la diffraction des électrons.

3.2. Interaction électron-matière – dépôt d'énergie

Dans cette section, le cœur de la technique de lithographie électronique, c'est-à-dire l'effet de l'utilisation de quanta comme moyen pour véhiculer l'information, les mécanismes physiques qui participent à l'absorption d'énergie par la cible et l'extension de la distribution spatiale de l'énergie, sont abordés.

Le lithographe dispose en général de l'information sur la quantité d'électrons déposée par la source par unité de surface que l'on nomme dose et qui s'exprime généralement en micro-coulombs par centimètre carré ($\mu\text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$).

3.2.1. Mécanismes

Phénomènes physiques liés à l'interaction électron-matière :

Le bombardement du matériau cible par le faisceau d'électrons conduit à différents processus collisionnels élastiques (sans perte d'énergie) ou inélastiques. Les électrons incidents peuvent interagir soit avec les champs électromagnétiques générés par les noyaux atomiques, soit avec les électrons des diverses sous-couches électroniques liées aux atomes. Les électrons interagissant avec la cible sont soit diffusés vers l'avant, c'est-à-dire dans le même sens que les électrons émis par la source (on parle de forward-scattering), soit diffusés vers l'arrière on parle de rétrodiffusion (ou back-scattering).

L'impact des électrons incidents fortement accélérés avec la cible se traduit par différents processus tels que :

- Une émission d'électrons (cf. figure I.24)
 - De haute énergie, égale ou proche de celle des électrons incidents (respectivement dus à une interaction élastique et inélastique). Ces électrons de forte énergie sont susceptibles de faire d'autres collisions et donc d'engendrer de la rétrodiffusion.
 - De faible énergie qui comprend les électrons de type Auger (correspondant à la désexcitation d'un atome qui a perdu un électron d'une couche électronique de cœur, d'énergie allant de 50 à 1000 eV) et les électrons dits secondaires (d'énergie quelques eV à 30 eV)
- Une émission d'un rayonnement électromagnétique, issu des phénomènes de cathodoluminescence (émission dans le domaine du visible ou proche visible), de freinage dû aux champs électromagnétiques des noyaux atomiques (dit Bremsstrahlung, spectre continu dans le domaine des rayons X) et de raies caractéristiques des éléments présents dans la cible (rayonnement X également)

L'intensité relative des différents types d'électrons émis lors de l'interaction avec le substrat est représentée dans la figure I.24. Les électrons de forte énergie sont trop rapides pour casser les liaisons covalentes de la cible directement (une liaison covalente a pour énergie quelques eV). La rupture des liaisons covalentes provient en réalité des interactions avec les électrons secondaires de faible énergie qui sont très nombreux.

Remarque : Cela fait de la lithographie électronique une technique à interaction non-spécifique tout comme la lithographie EUV.

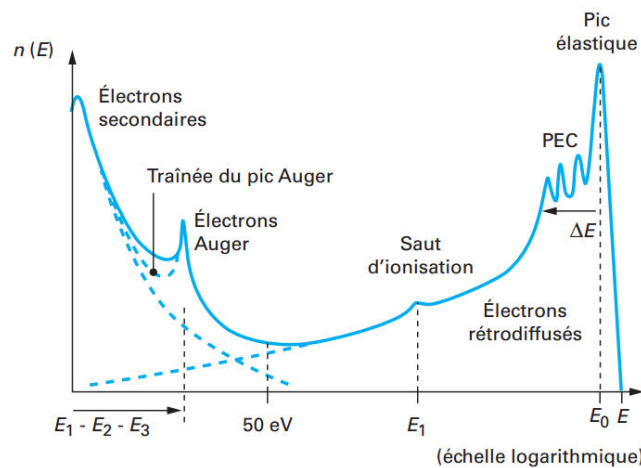


Fig. I.24 : Intensité des processus émettant des électrons dans la matière. PEC signifie pics d'énergie caractéristique et correspond aux pertes par phonons et plasmons (reproduction de [1.37]).

Les interactions entre les électrons et la cible peuvent se résumer en 3 mécanismes [1.2]:

- La diffusion élastique sur les noyaux atomiques
- La diffusion inélastique sur les électrons des noyaux atomiques
- La diffusion inélastique sur les noyaux atomiques

De plus, en considérant la probabilité qu'a un électron d'interagir avec le noyau atomique ou le cortège électronique d'un atome comme proportionnelle respectivement aux carrés des rayons des

noyaux atomiques et aux rayons des atomes, on peut alors estimer le ratio R des évènements liés à la diffusion sur les noyaux par la diffusion sur les électrons égale à :

$$R \propto \left(\frac{R_{\text{noyau}}}{R_{\text{atome}}} \right)^2 \approx \left(\frac{10^{-14}}{10^{-10}} \right)^2 = 10^{-8}$$

Cela indique que la majeure partie des interactions est donc liée aux interactions avec les cortèges électroniques des atomes et sont donc des phénomènes de diffusion inélastiques. En général, on parle plutôt de section efficace σ pour exprimer la notion de probabilité de réaction entre un électron et la cible (dans notre cas). C'est une grandeur homogène à une surface.

3.2.2. Les chocs élastiques

Les chocs élastiques sont des interactions sans perte d'énergie, les électrons incidents sont diffusés par interaction avec les noyaux atomiques du matériau cible. Rutherford ^[1.38] a proposé une formule en 1911 qui décrit la section efficace de diffusion d'une particule chargée non relativiste lorsqu'elle bombarde un matériau. On en tire que l'utilisation d'un matériau de faible poids atomique limite l'angle de diffusion élastique des électrons et vice et versa. Il en est de même avec une forte énergie qui limitera l'angle de diffusion élastique et inversement. D'après ^[1.2] les phénomènes élastiques sont décrits comme minoritaires mais jouent un large rôle dans la distribution spatiale du dépôt d'énergie et sur le phénomène de rétrodiffusion des électrons qui sera abordé en section 3.2.4 de ce chapitre.

Conséquence : Elargissement du faisceau

Les formules de Rutherford ^[1.38] et Mott ^[1.39] permettent d'affirmer que le faisceau d'électron va voir son diamètre augmenter à mesure que les électrons subissent des chocs élastiques. Cet élargissement est également lié au nombre d'évènements élastiques possibles dans le matériau cible. On peut trouver dans la littérature ^[1.40] une approximation du nombre d'évènements élastiques pendant la traversée d'un matériau de résine.

Pour un film d'épaisseur z (en μm) et un électron d'énergie E_0 (en keV) on a l'équation :

$$n_{\text{élastique}} = \frac{400z}{E_0} \quad (\text{eq. I.14})$$

A titre d'exemple, un film de résine de 40 nm d'épaisseur et une énergie des électrons de 5keV donne un nombre d'évènement élastique de 3.2.

Un film de résine de faible épaisseur et l'utilisation d'une haute énergie permettent donc de limiter l'élargissement du faisceau à sa traversée du film de résine. Cet élargissement qui sera présent pendant la réalisation des motifs, implique que la définition de la taille du faisceau vue dans la section 3.1.2 doit être réévaluée pour prendre en compte ce phénomène. Ainsi la taille du faisceau d'un point de vue du procédé lithographique peut être considérée comme la somme quadratique du faisceau dans le vide plus une contribution d'élargissement du faisceau d'électrons dans la résine.

Ce phénomène a des implications négatives sur les capacités de résolution d'un équipement de lithographie et plus particulièrement si ce dernier opère à basse énergie. Il faut alors limiter l'épaisseur initiale du film de résine pour l'étape de lithographie afin de conserver les capacités de résolution. Cela implique un budget résine amoindri pour les étapes de gravure plasma suivantes et donc des problèmes de sélectivité.

3.2.3. Les chocs inélastiques

Les interactions inélastiques très nombreuses conduisent au dépôt d'énergie dans le matériau. Les interactions sont coulombiennes et la perte d'énergie de l'électron est considérée comme transfert de quantité de mouvement. Il existe de nombreux modèles pour les décrire, un des plus connus est l'équation de Bethe ^[1.41] appliquée à l'électron qui traduit la perte d'énergie de l'électron incident par interaction avec le cortège électronique des atomes de la cible. Cette perte d'énergie, notée $-dE$, le long d'un parcours ds s'exprime par la relation :

$$-\frac{dE}{ds} = \frac{4\pi N_A Z \rho e^4}{m_0 v^2 A} \log\left(\frac{m_0 v^2}{I}\right) \quad (\text{eq 1.15})$$

où e est la charge de l'électron, N_A est le nombre d'Avogadro, Z le numéro atomique moyen, ρ la densité volumique moyenne du matériau, A la masse atomique moyenne du matériau, v la vitesse des électrons incidents, m_0 est la masse d'un électron et I est l'énergie moyenne d'ionisation (en eV, définie empiriquement par ^[1.42]) valable pour $Z \geq 13$ et telle que $I = (9.76 + 58.8 Z^{-1.19})Z$. Le terme $-dE/ds$ est qualifié de pouvoir d'arrêt.

Cette formule a été ensuite corrigée pour tenir compte des effets relativistes des électrons. De manière générale, la connaissance des mécanismes des phénomènes issus de l'interaction électron-matière est cruciale puisqu'elle permet de réaliser des simulations de dépôt d'énergie en utilisant les modèles de la littérature (cf. section 3.3.2 de ce chapitre).

Energie des électrons, nature de la cible et dose d'exposition :

Dans la partie II de ce chapitre, nous avons pu voir que la résine d'exposition requiert une dose finie d'énergie afin de modifier ses propriétés physico-chimiques localement et permettre ensuite la révélation des motifs désirés. Les électrons doivent donc perdre suffisamment d'énergie dans le volume de matériau à modifier. D'après l'équation de Bethe (eq 1.15) on peut voir que la perte d'énergie d'un électron incident dépend de :

- Sa vitesse et donc son énergie. Plus celle-ci est importante moins le pouvoir d'arrêt est important. Il faudra donc augmenter la dose d'exposition pour atteindre le seuil de modification de la résine.
- La densité volumique du matériau : Un matériau dense implique un pouvoir d'arrêt plus important et donc moins de dose et inversement.

Distance parcourue par les électrons :

L'utilisation de la loi de Bethe permet également d'estimer la distance parcourue par les électrons dans la matière. L'intégration de l'équation (1.15) donne la distance parcourue de Bethe notée R_B , cette dernière correspond au chemin parcouru par l'électron pour qu'il obtienne une énergie nulle. On obtient la formule proposée par Everhart ^[1.43] :

$$R_B = \frac{v_0^4}{c_{tw} \rho} \quad (\text{eq 1.16})$$

où v_0 est la vitesse initiale de l'électron (en cm.s^{-1}), c_{tw} une constante issue de la loi de Thomson-Whiddington (en $\text{cm}^6.\text{g}^{-1}.\text{s}^{-4}$) et ρ la densité volumique moyenne du matériau (en g.cm^{-3}).

Application numérique :

Pour un matériau classique tel que le silicium de densité 2.33 g.cm^{-3} , avec c_{tw} égal à $5.05 \cdot 10^{42} \text{ cm}^6 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{s}^{-4}$ [I.43], on calcule R_B pour des énergies d'accélération de 5keV et 50keV. On obtient respectivement $0.26\mu\text{m}$ et $19.9\mu\text{m}$.

Cette valeur de distance parcourue R_B est en réalité inférieure à la distance réelle parcourue par les électrons, en effet cette dernière ne considère pas les chocs élastiques.

Effet thermique :

Le dépôt d'énergie par les électrons induit de plus un effet d'élévation de température dans les zones impactées (résine et silicium). Si cette élévation de température n'est pas contrôlée, elle peut induire des modifications locales des propriétés physicochimiques de la résine en cours d'exposition ainsi qu'une dilatation des zones exposées. C'est un phénomène qui a été reporté dans la littérature de nombreuses fois [I.44-47].

Effet électrique :

Les interactions entre les électrons (primaires, Auger et secondaires) et la matière peuvent conduire à la création de charges locales. Selon le type de matériau impacté (métal, semi-conducteur et isolant électrique) cela conduit à des comportements différents, pour plus d'informations le lecteur pourra se reporter à la référence [I.2].

3.2.4. Rétrodiffusion

La rétrodiffusion des électrons est caractérisée par le renvoi des électrons vers la surface de la cible. Un électron est considéré comme rétrodiffusé dès que la somme totale de ses angles de diffusion est supérieure à 90° (par rapport au sens et à la direction du faisceau d'électrons). Ces électrons participent à un dépôt d'énergie à longue distance de la zone d'impact du faisceau (par exemple quelques dizaines de μm pour une énergie de 50keV). On peut considérer ce phénomène dans le cas de la lithographie électronique comme parasite puisqu'il induit une exposition dans des zones qui devraient rester totalement non exposées. Le contraste en énergie entre la zone exposée directement par le faisceau et les zones adjacentes s'en retrouve amoindri. Les travaux d'Everhart [I.43] ont montré que pour limiter la génération des électrons rétrodiffusés il faille travailler avec des matériaux de faibles numéros atomiques moyens.

3.3. Répartition spatiale du dépôt d'énergie - Fonction d'étalement du point

Comme nous avons pu l'entrevoir dans les sections précédentes, le dépôt d'énergie n'est pas seulement limité dans la résine aux zones balayées par le faisceau d'électrons. La rétrodiffusion génère un dépôt de dose parasite dans la résine qui est caractérisé par son intensité et sa distribution spatiale. Le dépôt global de l'énergie réalisé par une source ponctuelle est appelé fonction d'étalement du point (ou point spread function) souvent abrégé en PSF. En réalité, les sources d'électrons conduisent à la formation d'un faisceau de dimension allant de quelques nanomètres à quelques dizaines de nanomètres. On utilise néanmoins la même appellation. La connaissance des paramètres de la PSF, par simulation ou par l'expérimentation, est nécessaire pour réaliser un dépôt de dose contrôlé selon

la géométrie des motifs (on parle de corrections des effets de proximité). Cette section s'attarde à expliquer comment modéliser la PSF et réaliser son obtention (par simulation et expérimentalement).

Avant de traiter des considérations relatives à la modélisation de la PSF, les représentations des trajectoires électroniques et du dépôt d'énergie peuvent être faits pour clarifier les sections précédentes (figures I.25.b et c). Pour ce faire, utilisons les résultats d'une simulation de dépôt d'énergie par un faisceau d'électrons d'énergie 50 keV d'incidence normale à un film de résine modélisé par le PMMA d'épaisseur 37nm déposé sur du silicium (la simulation de la figure I.25.a a été réalisée grâce au logiciel CASINO v2.48 © dans un repère orthonormé cartésien XYZ), l'outil de simulation sera décrit dans une section ultérieure).

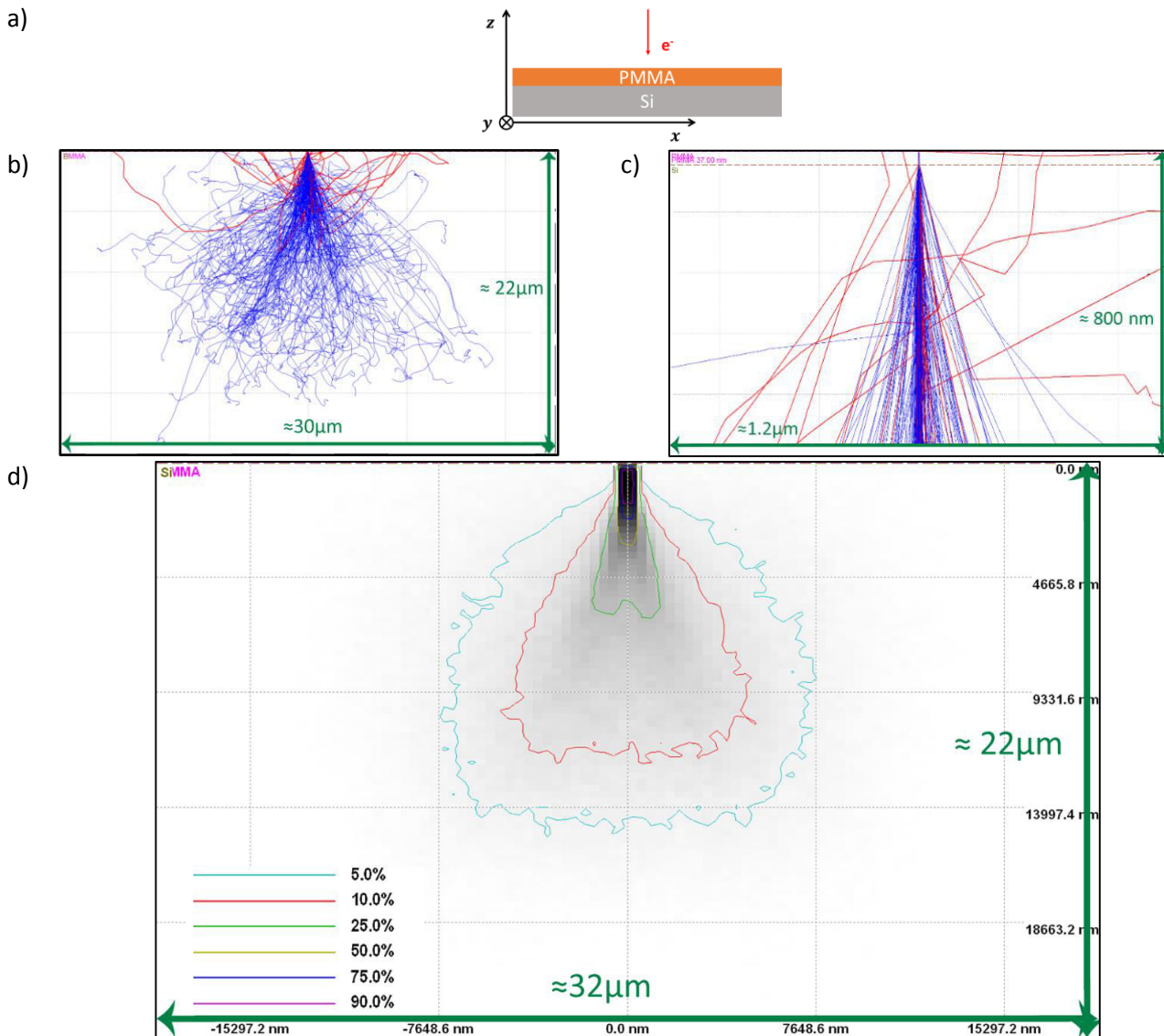


Fig. I.25 : Représentations (a) de l'empilement de la simulation et de 200 trajectoires électroniques (énergie d'accélération de 50 keV) projetées dans le plan XZ. (b) avec une vue d'ensemble, (c) avec une agrandissement sur la partie supérieure plus proche du film de PMMA (située au dessus des pointillés beiges) et (d) le dépôt d'énergie qui en résulte, les valeurs en pourcentage précisées dans la légende sont les ratios d'énergie situés à l'extérieur des zones délimitées par les lignes continues colorées, par exemple à l'extérieur de la zone délimitée par la ligne continue bleue ciel réside 5% de l'énergie déposée, etc...

Les diverses représentations de la figure I.25 permettent de voir les trajectoires chaotiques des électrons dans la matière. Les trajectoires en rouge représentent le trajet des électrons rétrodiffusés qui finissent par traverser une nouvelle fois le film de résine. Finalement, on peut s'apercevoir que

seule une très faible portion de l'énergie totale est déposée dans le film de PMMA. Cependant c'est bien la répartition du dépôt d'énergie dans la résine qui nous intéresse.

3.3.1. Modélisation

L'utilisation d'un faisceau gaussien supposé dénué d'astigmatisme permet de réduire grâce à la symétrie l'information 3D du dépôt d'énergie à une information radiale à une cote donnée. Les PSF sont donc généralement limitées à l'information radiale à une cote donnée du dépôt d'énergie dans la résine par rapport au point d'impact du faisceau. La figure I.26.b représente une PSF simulée (énergie 50 keV, de largeur à mi-hauteur du faisceau de 24 nm et 1 million d'électrons simulés) avec une échelle log-log. Dans la première partie de la courbe proche de la zone d'impact du faisceau (faibles distances radiales) on dépose une grande quantité d'énergie, cette première partie est caractérisée par le dépôt d'énergie des électrons incidents essentiellement. La seconde partie de la courbe (grandes distances radiales) montre que l'énergie déposée est inférieure de plusieurs ordres de grandeurs.

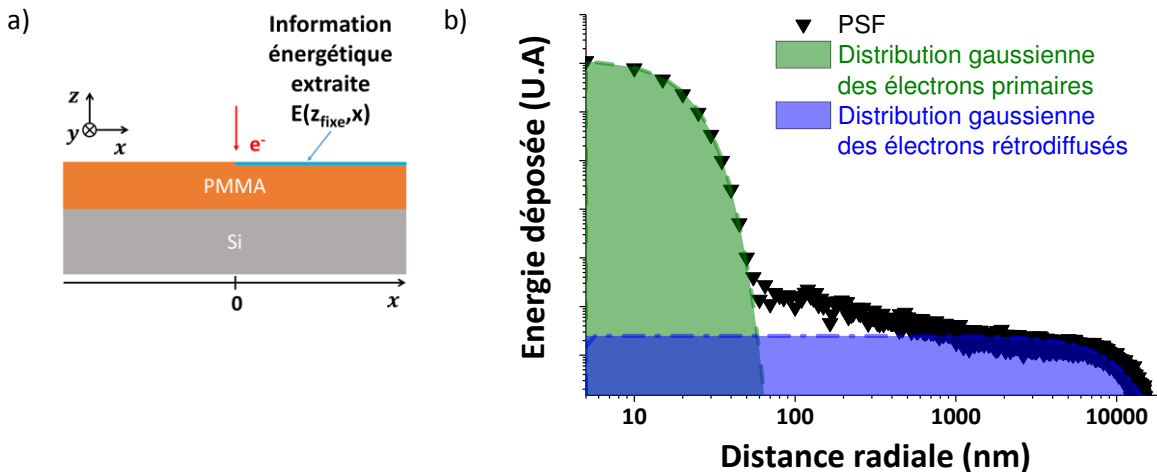


Fig. I.26 : (a) représentation schématique de la zone où l'information d'énergie est extraite. (b) PSF simulée (énergie 50keV, de largeur à mi-hauteur du faisceau de 24nm et 1 million d'électrons simulés) en représentation log-log, la distance radiale 0 (non affichée) correspond au point d'impact du centre du faisceau

Ce que l'on recherche à travers les PSF est l'information relative d'énergie en fonction du rayon et non la valeur absolue. Elle servira par ailleurs à la correction des effets de proximité (abordés au chapitre III).

On trouve largement dans la littérature une approximation des PSF (expérimentales ou simulées) comme une somme de deux gaussiennes 2D. Cela permet lors du calcul de la correction des effets de proximité d'alléger la charge de calcul en évitant de réaliser une résolution totalement numérique. On peut alors décrire le dépôt radial d'énergie déposée par :

$$E(r) = \frac{1}{\pi(1+\eta)} \left(\frac{1}{\alpha^2} e^{\frac{-r^2}{2\alpha^2}} + \frac{\eta}{\beta^2} e^{\frac{-r^2}{2\beta^2}} \right) \quad (\text{eq I.17})$$

Où :

- r est la distance radiale depuis le point d'impact
- α est l'écart type de la distribution gaussienne relative aux électrons diffusés (primaires)
- β est l'écart-type de la distribution gaussienne relative aux électrons rétrodiffusés

- η est le rapport entre la dose déposée par les électrons rétrodiffusés et les électrons primaires

La figure I.26.b rend compte de l'ajustement analytique réalisable avec deux gaussiennes, on peut remarquer que la zone intermédiaire aux deux fonctions gaussiennes est médiocrement ajustée.

D'autres modèles permettant un ajustement analytique plus rigoureux, notamment dans les régions de distance radiale intermédiaire, ont été développés sans qu'ils aient pour autant de signification physique expliquée ^[1.48].

3.3.2. Obtention de la PSF par simulation

Comme nous l'avons mentionné quelques sections auparavant, la connaissance des mécanismes physiques de diffusion des électrons est primordiale et a permis la création de logiciels permettant de simuler un dépôt d'énergie. Certains sont développés pour la microscopie électronique et d'autres pour la lithographie électronique. Ils permettent néanmoins l'extraction de PSF pour une énergie d'accélération des électrons et des empilements de matériaux définis par l'utilisateur (masses volumiques, compositions atomiques, épaisseurs des couches de l'empilement). Ils reposent tous sur la méthode de Monte Carlo qui permet des calculs numériques liés à des événements statistiques.

L'empilement de matériaux définis est discrétisé par les logiciels. Dans le cas de l'interaction électron-matière, ce sont des trajectoires électroniques et les pertes énergétiques dans les volumes élémentaires qui sont adressées par ces logiciels (elles sont déterminées à l'aide des modèles théoriques, avec l'équation de Bethe par exemple). Pour limiter les incertitudes statistiques dans les valeurs obtenues, il est important de sélectionner un grand nombre d'électrons pour les simulations (tout en gardant un temps raisonnable de simulation)

Les plus connus sont CASINO®, SCELETON®. Le logiciel retenu pour ces travaux de thèse est le logiciel CASINO® de par sa simplicité d'accès et d'utilisation.

En plus des paramètres cités précédemment, CASINO® doit être alimenté avec l'information du maillage sur lequel on veut obtenir l'information finale du dépôt d'énergie, mais aussi avec le diamètre et l'angle du faisceau gaussien qui servira à impacter la cible (diamètre donné à 6σ) et finalement avec l'information du nombre d'électrons à utiliser.

On peut également noter que CASINO® fournit également de nombreuses autres informations sur la cathodoluminescence, l'émission de rayonnement X, la profondeur de pénétration des électrons rétrodiffusés, etc...

Au final, on obtient une distribution volumique d'énergie pour tout l'empilement, l'utilisateur sélectionne alors l'information énergétique correspondante à l'intersection entre cette distribution volumique et une droite orthogonale à l'axe vertical, on extrait donc une information radiale d'énergie par rapport au point d'impact du faisceau à une cote définie (en général à la surface de la résine, figure I.26.a).

3.3.3. Obtention expérimentale de la PSF

Il est également possible de réaliser une détermination expérimentale de la PSF. Contrairement à la version obtenue par simulation la version expérimentale permet d'inclure des paramètres liés au procédé de lithographie électronique tels que l'élargissement du faisceau dans le

matériau cible, des effets liés à l'étape de développement, des effets de diffusion d'acide pour les résines amplifiées chimiquement et des effets liés à l'équipement (taille du faisceau, astigmatisme).

Il existe dans la littérature plusieurs techniques, plus ou moins robustes. Notamment celle développée par Stevens ^[1.49], celle de Rishton ^[1.50] et finalement celle développée dans les travaux de thèse de D.Rio ^[1.47] que j'ai retenue pour ces travaux de thèse.

La méthode développée par Rio est simple et plus facile à mettre en place que les travaux de Rishton par exemple. Elle repose sur l'exposition d'un dessin de ligne isolée à deux régimes de doses différents, un relativement proche des conditions normales d'exposition et un autre réalisé à de très fortes doses. Dans le cas de l'utilisation d'une résine négative on formera une ligne et dans le cas d'une résine positive on formera un espace.

Dans le premier régime de dose la formation du motif est essentiellement due au dépôt d'énergie par les électrons primaires et dans le second la formation du motif est due au dépôt d'énergie des électrons rétrodiffusés. Le détail de la technique développée par Rio est disponible dans son manuscrit de thèse ^[1.47].

Il faut pour obtenir les paramètres de la PSF, réaliser la mesure de la dimension critique de la ligne ou espace (selon le type de résine utilisé) pour toutes les doses d'exposition. Il suffit ensuite de tracer l'évolution du logarithme népérien de la dose en fonction du quart du carré de la dimension critique et de réaliser une régression linéaire pour chacun des domaines de dose (figure I.27).

Les droites résultantes ont pour coefficient directeur :

- Dans le domaine des faibles doses : l'inverse du carré de l'écart-type de la distribution des électrons primaires α
- Dans le domaine des fortes doses : l'inverse du carré de l'écart-type de la distribution des électrons rétrodiffusés β

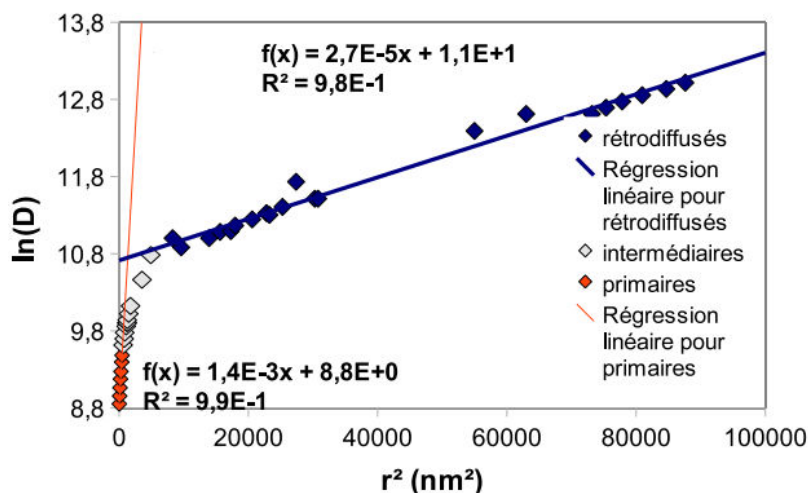


Fig. I.27 : Evolution du logarithme de la dose en fonction de r^2 (avec $r^2=CD^2/4$) et ajustements linéaires associés (reproduction de ^[1.47])

Finalement, l'utilisation des ordonnées à l'origine des deux droites de régression et quelques calculs permettent l'obtention du paramètre η .

On peut donc obtenir avec la méthode développée par Rio les 3 grandeurs caractéristiques du modèle de la PSF à deux gaussiennes, à savoir le triplet (α, β, η) . La connaissance de la PSF est

indispensable à l'expérimentateur s'il veut pouvoir comprendre et optimiser le procédé de lithographie électronique pour finalement obtenir les performances désirées. Notamment, lorsqu'il veut introduire des matériaux sous-jacents à la résine afin de répondre à d'autres besoins (évacuation des charges pour les futurs équipements à multiples faisceaux d'électrons, sélectivité de gravure plasma nécessaire au bon transfert des motifs après la lithographie).

4. Le LWR : un enjeu majeur pour la lithographie

Dans de nombreuses études ^[1.51-56], il a été constaté que la rugosité de ligne générée lors de l'étape de lithographie se transfère dans les matériaux sous-jacents lors des étapes de gravure par plasma suivantes. Ainsi, plus le LWR des motifs après lithographie est important, plus le LWR final de la grille de transistor sera grand et limitera les performances des dispositifs. Il est donc impératif de contrôler le LWR des motifs de résine après lithographie au nanomètre près. Cependant, ce contrôle n'est possible qu'en connaissant les sources de la rugosité de ligne et par une métrologie adaptée (développée au chapitre II, section 5.3.5).

4.1. Origines du LWR

Cette section décrit les sources de LWR après lithographie rapportées dans la littérature. Il a été montré que le LWR dépendait de plusieurs facteurs, certains liés à la nature du matériau, d'autre au dépôt d'énergie et à la révélation des motifs.

Facteurs liés au matériau

Une partie du LWR proviendrait du matériau de résine lui-même, les chaînes polymères sont en général en conformation de type « pelote statistique » et les chaînes polymères peuvent également s'enchevêtrer. Plus les chaînes sont longues moins il sera aisé d'avoir de l'ordre et donc un bord de motif « lisse ». De plus, le bord d'un motif est composé dans le cas d'une résine positive (notre cas d'étude) d'un mélange de chaînes polymères avec des portions déprotégées et d'autres protégées comme le précisent certains auteurs ^[1.67-69].

Une deuxième composante du LWR liée au matériau a été rapportée dans la littérature ^[1.66], celle-ci proviendrait de la variabilité de concentration locale des constituants de la résine comme le PAG et la base.

Finalement, la longueur de diffusion de l'acide a été également suggérée comme contributrice à la valeur de LWR ^[1.59-62]. En effet, chaque acide créé va diffuser et déprotégera une quantité finie de fonctions de la chaîne polymère de la résine, cela signifie que chaque acide a un volume d'interaction fini avec les chaînes polymères de la résine. Ce volume est dépendant de la longueur de diffusion de l'acide et puisque la distribution des acides est aléatoire dans la résine, une grande longueur de diffusion d'acide permettra de lisser la distribution aléatoire de ces derniers et réduira le LWR. Cependant la longueur de diffusion de l'acide ne peut pas être trop augmentée sans impacter négativement les capacités de résolution de la résine.

Bruit grenaille

Le LWR étant l'écart-type à 3σ de la dimension critique, tout phénomène induisant une variation significative de la dose à une échelle nanométrique doit probablement conduire à une variabilité de dimension critique et impacter le LWR.

Il existe un tel phénomène appelé bruit grenaille (ou shot-noise) auquel les expositions en lithographie électronique sont sujettes. Le bruit grenaille représente l'incertitude sur le nombre de porteurs émis par la source électronique ou déposés dans le matériau. Une dose correspondant à un nombre fini d'électrons N suit d'après la littérature une loi statistique de Poisson (loi qui s'applique aux évènements de faibles occurrences et constants) et son écart-type vaut alors \sqrt{N} . Il a été reporté de nombreuses fois dans la littérature que le bruit grenaille avait une influence négative sur le LWR [1.57-58].

Il en découle directement qu'une résine sensible qui requiert une faible dose d'exposition sera plus affectée par le phénomène de bruit grenaille qu'une résine peu sensible. De même, exposer à basse énergie rendra le procédé de lithographie plus sensible au bruit grenaille qu'à forte énergie.

Facteur lié au procédé de développement

Le procédé de développement qui permet de retirer sélectivement les zones exposées ou non, repose sur la solubilisation dans le bain de développement de chaînes polymères plus ou moins modifiées par l'exposition aux électrons. Les travaux de simulation de Flanagin *et al.* suggèrent qu'une faible rugosité de surface des flancs de résine (et donc de LWR) est obtenue lorsque le taux de dissolution du polymère dans le bain de développement est élevé. Un taux de développement élevé est favorisé par un poids moléculaire de la résine peu élevé, une polymolécularité faible et un volume libre important [1.70].

D'autres contributeurs à cette problématique précisent que des phénomènes de séparation de phase peuvent pendant le dépôt du film de résine (dépôt par centrifugation d'une solution solvant-polymère) induire des hétérogénéités dans le film de résine. Ainsi, au cours du développement, les zones plutôt riches en polymère se comporteraient plutôt comme un solide qu'un polymère en solution ce qui induirait des hétérogénéités de développement et la formation d'agrégats. Ils ont également précisé que si le volume des lignes à déprotéger était faible en comparaison au rayon de giration des chaînes polymères, cela pouvait augmenter localement la viscosité du polymère et limiter le taux de développement. Ils préconisent un développement dynamique afin de limiter ces phénomènes et donc limiter le LWR [1.71].

Finalement, Yamaguchi et Namatsu suggèrent dans leur étude [1.72] que la distribution des volumes inter-chaîne de la résine, la taille des molécules de solvant du développeur et donc l'accès des molécules de solvant dans ces vides jouent un rôle sur la formation de la rugosité de surface d'un flanc de résine (et donc du LWR après lithographie).

Qualité de l'image aérienne

La qualité de l'image aérienne repose sur deux paramètres caractérisant le dépôt d'énergie dans un motif considéré. Pour présenter d'une manière claire les deux grandeurs liées à la qualité de l'image aérienne, considérons un cas où le dépôt d'énergie varie selon l'axe x d'un motif et reste invariant selon l'axe y (un exemple de dépôt d'énergie pour un motif L/S est donné en figure I.28, les considérations et approximations relatives à son obtention dans le cas de ces travaux de thèse sont décrites dans le chapitre III).

Le premier de ces paramètres est le contraste en énergie que l'on notera C qui s'exprime d'une manière analogue au contraste d'intensité lumineuse en optique photonique, ce dernier s'écrit de la manière suivante :

$$C = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} + E_{min}} \quad (\text{eq I.18})$$

où E_{max} est le maximum d'énergie déposée et E_{min} est le minimum d'énergie déposée. On peut utiliser une définition du contraste sur l'ensemble du motif où localement, on utilise alors respectivement les maximums et minimums globaux ou locaux.

Néanmoins, la définition du contraste est limitée et ne rend compte que partiellement de la qualité de l'image aérienne. Aucune information dans les zones intermédiaires aux maximums et minimums n'est obtenue. Afin d'avoir une définition de la qualité du bord de l'image aérienne, on utilise le facteur de mérite appelé logarithme de la pente de l'image aérienne ou ILS (pour Image Log Slope) :

$$ILS = \frac{1}{E_{bord}} * \left. \frac{\partial E(x)}{\partial x} \right|_{bord} \quad (\text{eq 1.19})$$

où E_{bord} est l'énergie au niveau du bord de motif, x la position dans le motif et $E(x)$ l'énergie déposée à la position x . L'ILS est à un coefficient multiplicatif près égal à la pente de l'énergie déposée dans le motif selon l'axe d'intérêt.

On utilise en général la version normalisée, notée NILS :

$$NILS = CD * \frac{1}{E_{bord}} * \left. \frac{\partial E(x)}{\partial x} \right|_{bord} \quad (\text{eq 1.20})$$

où CD est la dimension critique du motif à réaliser.

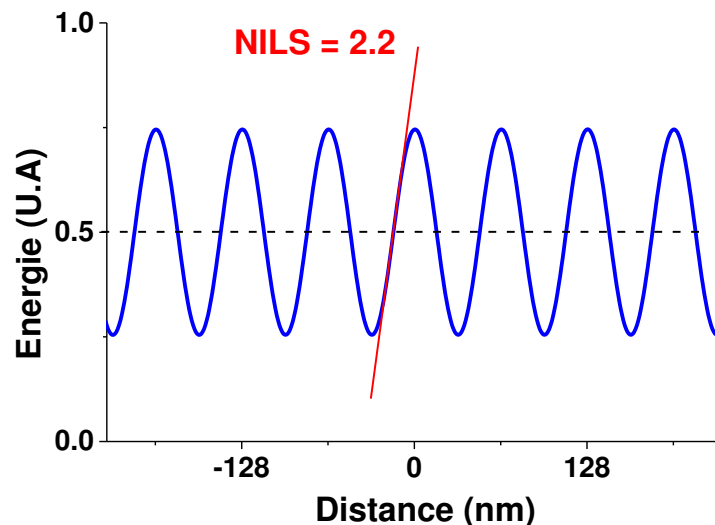


Fig. 1.28 : Dépôt d'énergie tronqué selon l'axe x résultant de l'exposition d'un motif de L/S , les minimums correspondent aux zones non directement exposées par le faisceau d'électrons mais ont reçu une énergie supérieure à 0 à cause du phénomène de rétrodiffusion. La valeur de contraste obtenue dans cet exemple est de valeur 0.65. Le NILS, lié à la pente de la tangente, vaut ici 2.2.

Plus le NILS est fort plus la pente est grande, on a alors un dépôt d'énergie plus conforme au motif original. Le NILS est donc un outil pratique d'appréciation de la qualité du dépôt d'énergie. Il a de plus été reporté que plus le NILS (ou ILS) est faible plus le LWR était fort après lithographie [1.63-65]. Cet effet du NILS sur le LWR des lignes de résine est directement lié au caractère à seuil non idéal des matériaux de résine (contraste non-infini).

Facteur lié aux vibrations mécaniques

Puisque l'on cherche aujourd'hui à réaliser des motifs décanométriques, les vibrations mécaniques qui peuvent exister au niveau du porte-échantillon, même de l'ordre du nanomètre, ont nécessairement une influence sur la qualité de la lithographie et impactent négativement la qualité de

l'image aérienne. C'est un paramètre dépendant de l'environnement de l'équipement et des éléments constitutifs de ce dernier.

Facteur lié aux raccords de champs

La lithographie électronique présente une autre source de rugosité qui provient de la façon d'écrire les motifs, c'est-à-dire une écriture point par point. La précision de placement du faisceau d'électrons est limitée et engendre des dépôts d'énergie à des endroits légèrement éloignés de la zone prévue par le dessin du motif. Une image de ce type de défaut est présentée au chapitre II section 1.1.3.2. C'est un facteur dépendant de l'équipement de lithographie et des réglages de ce dernier (présentés au chapitre II section 1.1.2)

Expression de la variance de LWR :

On peut, en première approximation, supposer que la variance de LWR ou LER s'écrit comme la somme quadratique des facteurs cités précédemment :

$$\sigma_{LWR} = \sqrt{\sigma_{pel}^2 + \sigma_{conc}^2 + \sigma_{acid}^2 + \sigma_{gren}^2 + \sigma_{dev}^2 + \sigma_{NILS}^2 + \sigma_{vibr}^2 + \sigma_{racc}^2}$$

(eq. I.21)

où σ_{pel} est la contribution statistique de la conformation des chaînes polymère, σ_{conc} est la contribution de la variabilité de concentration locale du PAG et de la base, σ_{acid} est la contribution liée à la longueur de diffusion d'acide, σ_{gren} est la contribution du bruit grenaille, σ_{dev} est la contribution du procédé de développement, σ_{NILS} la contribution liée à la qualité de l'image aérienne, σ_{vibr} est la contribution des vibrations mécaniques du porte-échantillon et σ_{racc} est la contribution des raccords de champs. On vient de voir dans cette section que le LWR est une grandeur complexe du procédé de lithographie et qu'il dépend de nombreux paramètres.

4.2. Objectifs de la thèse

La lithographie à faisceaux d'électrons multiples est un candidat potentiel pour réaliser les lithographies des nœuds technologiques actuels et futurs. Le CEA LETI s'est associé avec l'entreprise Mapper Lithography afin d'aider au développement d'une solution de lithographie électronique multifaisceaux qui mise sur une stratégie basse énergie.

A mon arrivée dans le laboratoire, une thèse avait déjà été réalisée par D. Rio afin de mettre en évidence des différences fondamentales qui existent entre les lithographies électroniques à haute énergie (50 keV) et basse énergie (5 keV). Les travaux de D. Rio montrent expérimentalement que pour un film de résine donné, réduire l'énergie des électrons de 50 keV à 5 keV permet de réduire la dose d'exposition d'un facteur de 6 à 7 (ce qui est explicable théoriquement avec l'équation de Bethe, des électrons moins énergétiques libèrent plus d'énergie que des électrons fortement accélérés). De plus, cette réduction de l'énergie d'accélération n'implique pas de changements significatifs des performances des résines utilisées en matière de contraste de ces dernières. Ses travaux expérimentaux soulignent également que la quantité d'électrons rétrodiffusés est indépendante de la tension d'accélération des électrons mais que l'écart-type de la distribution spatiale de l'énergie déposée par rétrodiffusion diminuait considérablement avec la baisse de l'énergie des électrons (les écart-types des distributions des électrons rétrodiffusés à 5 keV et 50 keV sont respectivement

d'environ 200 nm et 10 μm , expositions réalisées avec la résine directement déposée sur un substrat de silicium).

Ainsi puisque les valeurs de LWR après lithographie sont à l'heure actuelle trop importantes et ne respectent pas les critères de l'ITRS, mes travaux de thèse sont plutôt orientés à l'étude et la compréhension de la rugosité de ligne obtenue avec deux équipements de lithographie électronique très différents. Le premier est un outil conventionnel à faisceau unique formé Vistec SB3054DW d'énergie d'accélération 50 keV et le second le prototype Asterix de Mapper Lithography qui possède 110 faisceaux gaussiens d'énergie 5 keV (ces équipements seront présentés dans le chapitre II).

Ils visent le développement et l'optimisation de procédés pouvant contribuer à réduire le LWR de motifs de lignes/espaces (L/S) 32/32nm pour des lithographies multifaisceaux basse énergie mais pas seulement. La majeure partie du travail a été faite en amont avec le Vistec SB3054DW. Le chapitre III porte sur la modification de l'image aérienne de la lithographie électronique et les effets de cette modification sur performances lithographiques. On y présentera dans une première section un modèle de simulation de dépôt d'énergie. Les sections suivantes relatent de l'utilisation d'une stratégie d'écriture alternative sur les performances lithographiques aux énergies d'accélération de 50 keV et 5 keV.

Finalement, le chapitre IV traite de l'utilisation de procédés complémentaires (recuits et traitements plasmas) pour modifier le LWR des motifs de résine si ce dernier n'est toujours pas, après lithographie, en adéquation avec les objectifs fixés par l'ITRS.

Bibliographie du chapitre I

- [I.1]: <http://www.economist.com/blogs/economist-explains/2015/04/economist-explains-17>
- [I.2]: Stefan Landis (dir.), Technologies de base en lithographie, Paris, Hermès Science Publications, coll. « Electronique et microélectronique », (2010)
- [I.3]: C. Mack, Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication, John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-01893-4, (2007)
- [I.4]: H. J. Levinson, Principles of Lithography – 3rd ed, SPIE PRESS, ISBN 978-0-8194-8324-9 (2011)
- [I.5]: John H. Bruning, Optical Lithography ... 40 years and holding, Proc. of SPIE Vol. 6520 (2007)
- [I.6]: http://www.nikon.com/news/2014/02_nsr-s630d_01.htm
- [I.7]: www.itrs.net
- [I.8]: H. Yaegashi *et al.*, Recent progress on Multiple-Patterning process, Proc. of SPIE Vol. 9051 (2014)
- [I.9]: H. Yaehashi *et al.*, Overview; Continuous evolution on Double-patterning process, Proc. of SPIE 8325 (2012)
- [I.10]: K.Oyama *et al.*, Extended scalability with self-aligned multiple patterning, MNC2013 (2013)
- [I.11]: <http://www.asml.com/asml/show.do?ctx=5869&rid=51578>
- [I.12]: M. W. MATSEN and M. SCHICK, Stable and unstable phases of a diblock copolymer melt, Phys. Rev. Lett., 72(16), 2660, (1994)
- [I.13]: M. Li *et al.*, Patternable Block Copolymers, Adv Polym Sci 190: 183–226, (2005)
- [I.14]: M. J. Maher *et al.*, Directed Self-Assembly of Silicon-Containing Block Copolymer Thin Films, ACS Appl. Mater. Interfaces, 7, 3323–3328, (2015)
- [I.15]: S. Landis, Nano-lithography, p 94, John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-1-84821-211-4, (2011)
- [I.16]: Z Li *et al.*, Hybrid nanoimprint-soft lithography with sub-15 nm resolution, Nano Lett., Vol. 9, No. 6, (2009)
- [I.17]: L. Jay Guo, Nanoimprint Lithography: Methods and Material Requirements, Adv. Mater., 19, 495–513, (2007)
- [I.18]: S. Landis, Nano-lithography, p100, 2011 John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-1-84821-211-4, (2011)
- [I.19]: S. Landis, Nano-lithography, 2011 John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-1-84821-211-4, (2011)
- [I.20]: L Jay Guo, Recent progress in nanoimprint technology and its applications, J. Phys. D: Appl. Phys. 37 R123–R141, (2004)
- [I.21]: V. R. Manfrinato *et al.*, Resolution Limits of Electron-Beam Lithography toward the Atomic Scale, Nano Lett., 13 (4), pp 1555–1558, (2013)
- [I.22]: B. Mortini, « Etude des résines photolithographiques positives 193nm à amplification chimique et mise au point de leurs conditions de procédé », Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier - Grenoble 1, (2001).
- [I.23]: A. Jouve, « Limitations des résines à amplification chimique destinées à la réalisation du nœud technologique 32 nm », p36, Thèse de doctorat de l'Université de Grenoble, (2006)
- [I.24]: L. Azarnouche, « Défis liés à la réduction de la rugosité des motifs de résine photosensible 193 nm », p23, Thèse de doctorat de l'Université de Grenoble, (2012)
- [I.25]: P.Rai-Choudhury, Handbook of Microlithography, Micromachining, and Microfabrication - Volume 1: Microlithography, SPIE Press, (1997)

- [I.26]: E. REICHMANIS and L. F. THOMPSON, Polymer materials for microlithography, Chem. Rev., 89 (6), pp 1273–1289, (1989)
- [I.27]: G. P. Patsis *et al.*, Integrated simulation of Line Edge Roughness (LER) effects on sub-65 nm transistor operation: from lithography simulation, to LER metrology, to device operation, Proc. of SPIE 6151, 61 513J (2006)
- [I.28]: V. Constantoudis and E. Gogolides, Fractal dimension of Line Width Roughness and its effects on transistor performance, Proceedings of SPIE 6922, 692 223, (2008)
- [I.29]: V. Constantoudis *et al.*, Line width roughness effects on device performance : the role of the gate width design, Proc. 27th International conference on microelectronics, p 265, (2010)
- [I.30]: P. Oldiges *et al.*, Modeling line edge roughness effects in sub 100 nanometer gate length devices, IEEE page 131, (2000)
- [I.31]: H.-W. Kim *et al.*, Experimental investigation of the impact of LWR on sub-100-nm device performance, IEEE Transactions on Electron Devices 51, 1984, (2004)
- [I.32]: J.-Y. Lee *et al.*, Effect of line edge Roughness (LER) and line width roughness (LWR) on sub-100 nm device performance, Proceedings of SPIE 5376, 426, (2004)
- [I.33]: M. Chandhok *et al.*, Impact of line width roughness on Intel's 65 nm process devices, Proc. of SPIE 6519, 65 191A (2007)
- [I.34]: C. H. Díaz *et al.*, An experimentally validated analytical model for gate line-edge roughness (LER) effects on technology scaling, IEEE Electron Device Letters 22, 287 (2001)
- [I.35]: H. C. Pfeiffer, Journal of Vacuum Science & Technology 12, 1170 (1975)
- [I.36]: Z. Cui, Nanofabrication Principles, Capabilities and Limits, p.86, (2008) (ISBN 978-0-387-75577-9)
- [I.37]: H. Paqueton and J. Ruste, Microscopie électronique à balayage – Principe et équipement. Techniques de l'Ingénieur, (2010)
- [I.38]: E. Rutherford. LXXIX. The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom. *Philosophical Magazine Series 6*, 21(125) : 669-688, (1911)
- [I.39]: N. Mott, La diffusion des électrons par les atomes d'un gaz. *Annales de l'institut Henri Poincaré*, 4 no. 2, p. 221-236, (1933)
- [I.40]: G.R. Brewer, Electron beam technology in microelectronic fabrication. Academic Press (1980)
- [I.41]: HANDBUCH DER PHYSIK, KORPUSKELN UND STRAHLUNG IN MATERIE II, p62, Springer, ISBN-13: 978-3-642-45900-9, (1958)
- [I.42]: M. J. BERGER and M. SELTZERS, Stopping power and ranges of electrons and positrons, NBS Report NBSIR 82-2550-A (2^e Edition), (1983)
- [I.43]: T. E. Everhart, Simple Theory Concerning the Reflection of Electrons from Solids, Journal of Applied Physics 31, 1483 (1960)
- [I.44]: T. Abe *et al.*, Resist heating effect in direct electron beam writing, Journal Of Vacuum Science Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 6: 853, (1988)
- [I.45]: T. Groves, Theory of beam-induced substrate heating, Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 14:3839, (1996)
- [I.46]: E. Kratschmer and T. Groves, Resist heating effects in 25 and 50 kV e-beam lithography on glass masks, Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 8:1898, (1990)
- [I.47]: D. Rio, « Lithographie électronique basse énergie : application aux multifaisceaux », Thèse de doctorat de l'université de Grenoble, (2010)
- [I.48]: S. Aya *et al.*, Validity of Double and Triple Gaussian Functions for Proximity Effect Correction in X-ray Mask Writing, Jpn. J. Appl. Phys. 35 1929, (1996)

- [I.49]: L. Stevens *et al.*, Determination of the proximity parameters in electron beam lithography using doughnut-structures. *Microelectronic Engineering*, 5(1-4) : 141-150, (1986)
- [I.50]: S. Rishton and D. Kern, Point exposure distribution measurements for proximity correction in electron beam lithography on a sub-100nm scale. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 5:135, (1987)
- [I.51]: E. Pargon *et al.*, Linewidth roughness transfer measured by critical dimension atomic force microscopy during plasma patterning of polysilicon gate transistors, *Journal of Vacuum Science & Technology B* 26, 1011 (2008)
- [I.52]: P. Mahorowala *et al.*, Impact of Thin Resist Processes on Post-Etch LER, *Proceedings of SPIE Vol. 5039* (2003)
- [I.53]: A. R. Pawloski *et al.*, The Transfer of Photoresist LER Through Etch Proc. of SPIE Vol. 6153, 615318, (2006)
- [I.54]: T. Wallow *et al.*, Line Edge Roughness in 193nm Resists: Lithographic Aspects and Etch Transfer, *Proc. of SPIE Vol. 6519*, 651919, (2007)
- [I.55]: D. L. Goldfarb *et al.*, Effect of thin-film imaging on line edge roughness transfer to underlayers during etch processes, *Journal of Vacuum Science & Technology B* 22, 647 (2004)
- [I.56]: H. Namatsu *et al.*, Influence of edge roughness in resist patterns on etched patterns, *Journal of Vacuum Science & Technology B* 16, 3315 (1998)
- [I.57]: R. L. Brainard *et al.*, Shot noise, LER and quantum efficiency of EUV photoresists, *Proceedings of SPIE* 5374, 74 (2004)
- [I.58]: N. Rau *et al.*, Shot-noise and edge roughness effects in resists patterned at 10 nm exposure, *J. Vac. Sci. Technol. B* 16, 3784 (1998)
- [I.59]: M. Yoshizawa and S. Moriya, Study of the acid-diffusion effect on line edge roughness using the edge roughness evaluation method, *J. Vac. Sci. Technol. B* 20, 1342 (2002)
- [I.60]: G. M. Gallatin, Resist blur and line edge roughness, *Proceedings of SPIE* 5754, 38 (2005)
- [I.61]: G. M. Gallatin *et al.*, Resolution, LER and sensitivity limitations of photoresist, *Proceedings of SPIE* 6921 (2008)
- [I.62]: J. Foucher *et al.*, Impact of acid diffusion length on resist LER and LWR measured by CD-AFM and CD SEM, *Proceedings of SPIE* 6518, 65 181Q (2007)
- [I.63]: A. R. Pawloski, *et al.*, Characterization of line edge roughness in photoresist using an image fading technique, *Proceedings of SPIE* 5376, 414 (2004)
- [I.64]: J. Shin *et al.*, Resist line edge roughness and aerial image contrast, *J. Vac. Sci. Technol. B* 19, 2890 (2001)
- [I.65]: H. P. Koh *et al.*, Effect of process parameters on pattern edge roughness of chemically-amplified resists, *Proc. of SPIE* 399, 240 (2000)
- [I.66]: C. A. Mack, Line-Edge Roughness and the Ultimate Limits of Lithography, *Proc. of SPIE Vol. 7639*, (2010)
- [I.67]: Q. Lin *et al.*, *SPIE* 3999, 230 (2000)
- [I.68]: J. M. Roberts *et al.*, *Proc. SPIE*6153, 61533U (2006)
- [I.69]: T. H. Fedynyshyn *et al.*, *Proc. SPIE* 6153, 615315 (2006)
- [I.70]: L. W. Flanagan *et al.*, Surface roughness development during photoresist dissolution, *J. Vac. Sci. Technol. B* 17, 1371 (1999)
- [I.71]: D. G. Hasko *et al.*, Influence of developer and development conditions on the behavior of high molecular weight electron beam resists, *J. Vac. Sci. Technol. B* 18, 3441 (2000)
- [I.72]: T. Yamaguchi and H. Namatsu, Effect of developer molecular size on roughness of dissolution front in electron-beam resist, *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 22, No. 3, May/June (2004)
- [I.73]: H. Ito, Chemical amplification resists: History and development within IBM, *IBM J. RES. DEVELOP. VOL. 44 NO.1/2 JANUARY/MARCH* (2000)

Chapitre II.

Moyens et techniques mis en œuvre

Ce deuxième chapitre est dédié à la description des outils utilisés dans le cadre de cette thèse. Une première partie décrit les outils de lithographie électronique de manière générale et ceux qui ont permis de réaliser les structures d'intérêt de cette thèse, c'est-à-dire des motifs denses de lignes/espaces (L/S). Une seconde partie présente les outils et conditions utilisés pour réaliser les étapes du procédé lithographique, à savoir la préparation des substrats et leur traitement après l'étape de lithographie. La troisième partie quant à elle dépeint la technique et les mécanismes de gravure plasma, permettant de transférer les motifs initialement imprimés dans le film de résine dans les matériaux sous-jacents. Les parties 4 et 5 exposent respectivement les techniques de caractérisation des films minces de résine et les techniques de caractérisation dimensionnelle des motifs.

1. Outils d'exposition en lithographie électronique

L'idée d'utiliser les électrons comme moyen pour générer des structures de petites dimensions est apparue vers la fin des années 1950, et cela grâce à une utilisation détournée de la microscopie électronique à balayage. La croissance de films polymères par polymérisation radicalaire, provoquée par l'exposition à un faisceau d'électrons de molécules d'hydrocarbures ou de siloxanes à l'état gazeux, dans les chambres de microscopie à faisceau d'électrons était un phénomène connu, le plus souvent non désiré. Dès 1958, Buck *et al.*^[II.1] décidèrent d'utiliser ce phénomène à leur avantage pour créer un masque de protection à base de polysiloxane (silicone) pour leurs gravures de molybdène par voie gazeuse, leur objectif étant d'obtenir des structures de dimension critique de 100nm, bien en deçà des capacités de résolution de l'époque avec les autres techniques de lithographie disponibles.

1.1. Principe général

La lithographie électronique est largement utilisée dans les laboratoires et les universités du fait de sa flexibilité, de ses capacités de résolution, de son encombrement et son coût réduits. On peut exposer des échantillons de tailles diverses, allant du coupon jusqu'à des plaquettes de plusieurs centaines de millimètres de diamètre. Dans cette section, les différents éléments constituant un outil d'exposition électronique vont être décrits brièvement mais pour plus de détails, le lecteur pourra se référer aux références ^[II.2 à II.17].

1.1.1. Eléments constitutifs d'un équipement de lithographie électronique

Il existe plusieurs types d'outils de lithographie électronique. Quels qu'ils soient, ils reposent tous sur un même principe de fonctionnement, une source d'électron est associée à une colonne dite électronique qui contient diverses lentilles qui permettent notamment de focaliser le faisceau d'électrons. Ce faisceau est balayé en surface du matériau à modifier, aux endroits requis. L'extension spatiale de ce faisceau d'électrons est intimement liée aux capacités de résolution de l'équipement de lithographie. La capacité de résolution ultime d'un équipement est proportionnelle à la taille du faisceau.

Une représentation schématique de la source, de la colonne et de la chambre est donnée en figure II.1.

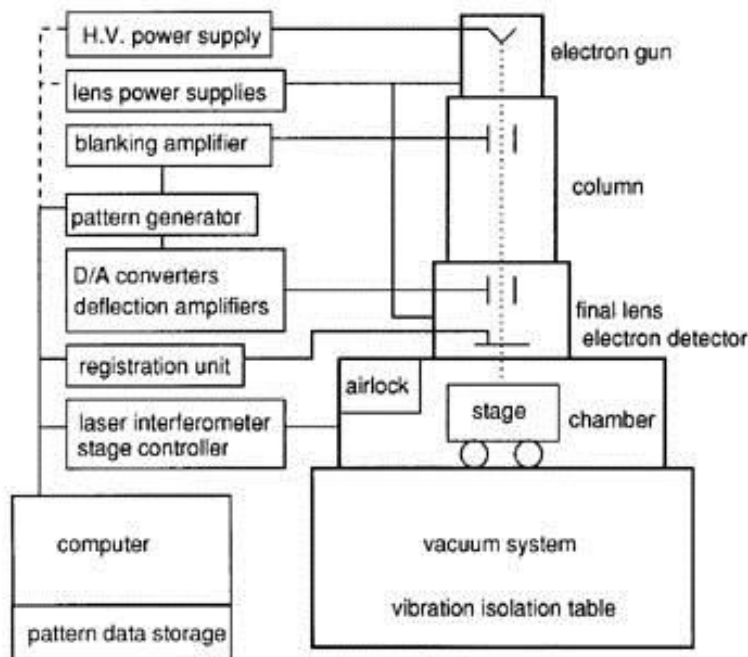


Fig. II.1 : Représentation schématique de l'ensemble source, colonne, chambre d'exposition (reproduction de [11.2])

De manière générale, on trouvera un système permettant la mesure de la hauteur de l'échantillon puisque ces derniers ne sont en général pas parfaitement plan (pour une plaque de silicium de 300mm de diamètre les variations de hauteur de la surface peuvent aller jusqu'à 50µm). Il faut donc cartographier l'échantillon en hauteur afin de s'assurer que le plan focal du faisceau sera bien réalisé à la même côte dans le matériau à exposer.

Les outils de lithographie électronique sont alimentés en données par le biais d'ordinateurs, qui réalisent au préalable la fracturation des géométries à exposer en une composition de géométries élémentaires dont la forme est dépendante du type de faisceau d'écriture (cf. section 1.1.3), on attribue en général à ces géométries élémentaires une dose.

1.1.1.1. La source d'électrons

Il existe différents types de sources ponctuelles électroniques. Les plus connues sont les sources thermo-ioniques telles que les sources à filament de tungstène (W) et à cristal d'hexaborure de lanthane (LaB₆), les pointes froides à effet de champ (notées C-FEG) et les pointes Schottky à effet

de champ (notées S-FEG) [II.3]. Selon le type de source, le vide nécessaire à l'extraction des électrons doit être plus ou moins prononcé, respectivement 10^{-4} , 10^{-6} , 10^{-9} à 10^{-11} et 10^{-8} à 10^{-9} Pa.

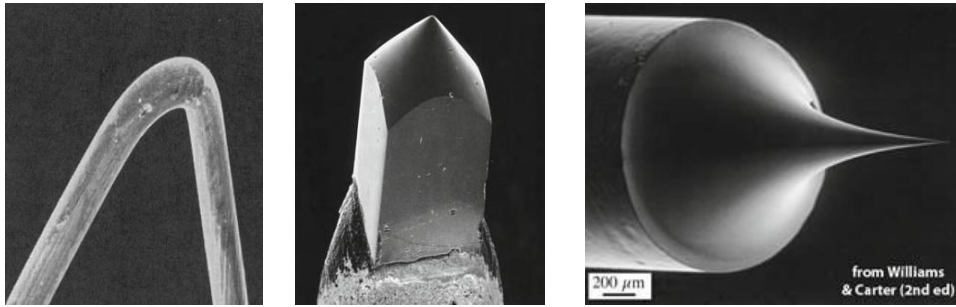


Fig. II.2 : De gauche à droite, filament de tungstène, cristal de LaB₆ et pointe à effet de champ [II.4]

Les sources électroniques listées précédemment sont en général caractérisées par 3 grandes valeurs :

- la brillance (respectivement 10^6 , 10^7 , 10^9 et 10^8 - 10^9 en $A.cm^{-2}.sr^{-1}$)
- la dispersion en énergie des électrons (respectivement 1-3, 1-1.5, 0.2-0.3 et 0.3-1.0 en eV)
- la taille de la source virtuelle (respectivement $>10^4$, $>10^3$, 3-5 et 15-25 en nm) [II.3]

Ces trois valeurs sont très importantes pour la microscopie électronique (notamment en transmission), mais pas suffisantes pour la lithographie électronique. En effet, il est important de considérer le courant total émis par la source et sa stabilité dans le temps. Un fort courant permet de réduire le temps d'exposition, la stabilité dans le temps impacte la qualité du contrôle de la dose d'exposition.

Les pointes à effet de champ présentent une plus forte brillance, une plus faible dispersion en énergie et une source virtuelle plus petite que leurs consœurs thermo-ioniques mais ne permettent pas d'obtenir de fort courants et présentent des instabilités de courant sur des courtes périodes (ces instabilités sont dues à l'adsorption de molécule en surface des pointes). On trouvera soit des sources thermo-ioniques (type LaB₆), soit des sources à effet de champ (type Schottky) selon le type d'outil de lithographie électronique. Le développement récent d'outils de lithographie électronique multifaisceaux requiert une attention particulière concernant la source électronique, il existe en effet plusieurs façons d'obtenir plusieurs faisceaux, nous y reviendrons dans la section 1.1.3.4.

1.1.1.2. La colonne électronique

Les colonnes électroniques servent entre autres à accélérer les électrons jusqu'à l'énergie pour laquelle l'outil de lithographie a été conçu (les électrons en sortie de source sont en général peu accélérés). Ces dernières contiennent des diaphragmes qui permettent la mise en forme du faisceau. Mais aussi de nombreuses lentilles nécessaires par exemple à la collimation, au grossissement, à la focalisation et à la déflexion du faisceau. Il est également important de corriger les aberrations (géométriques et chromatiques), et l'astigmatisme du faisceau afin de bien contrôler son extension spatiale au niveau du plan focal du matériau à exposer.

La déflexion du faisceau permet de déposer de l'énergie à différents endroits sans dépendre uniquement du mouvement du porte-échantillon. Il est important de noter que les bobines de déflexions présentent des aberrations et sont donc limitées en deçà de leur capacité maximale de déflexion pour limiter les aberrations qui peuvent nuire à la qualité de la lithographie. C'est pour cela

que l'on a souvent plusieurs bobines de déflexion au sein d'un même outil de lithographie électronique, chacune ayant une gamme de distance de déflexion qui lui est propre.

Le faisceau est très régulièrement interrompu par déflexion lorsque l'on ne veut pas déposer d'énergie sur la cible, dans ce cas le faisceau est défléchi de façon électrostatique dans la colonne avec un dispositif nommé *blanker*.

1.1.1.3. La chambre d'exposition

On peut trouver dans la chambre d'exposition le porte-échantillon auquel est associé un système de déplacement mécanique, qui autorise des mouvements en général dans deux directions orthogonales (bien qu'il existe des équipements de lithographie électronique à porteurs rotatifs utilisés pour la production de medias de stockage magnétique ^[11.5]). Ce système de déplacement est associé à des dispositifs de mesure de position par interférométrie laser afin d'assurer un positionnement de précision décanométrique. Ce déplacement mécanique est en général assez lent (de l'ordre du dixième de seconde).

On pourra également noter la présence d'un système d'amortissement des vibrations mécaniques, système sur lequel le porte échantillon réside. Il est en effet crucial d'avoir un minimum de vibrations au niveau de l'échantillon, les vibrations mécaniques détériorant la précision du dépôt d'énergie lors du balayage du faisceau.

Les outils de lithographie électronique ont le plus souvent un blindage électromagnétique et sont isolés le plus possible d'autres équipements qui pourraient être des sources de rayonnement électromagnétique, tout cela pour limiter au plus la déviation des électrons de leur trajectoire durant leur trajet de la source au substrat.

1.1.2. Paramètres d'exposition

Dans ce paragraphe, les principaux paramètres contrôlant l'exposition par lithographie électronique vont être définis.

1.1.2.1. Les stratégies d'exposition

Il existe 2 stratégies principales d'exposition en lithographie électronique, chacune présentant ses avantages et ses inconvénients. On parle de Raster Scan et Vector Scan.

La stratégie d'écriture Raster (fig. II.3), consiste à balayer l'intégralité de la surface de l'échantillon, pixel par pixel, le faisceau électronique étant défléchi ou non afin d'exposer uniquement les zones d'intérêt. C'est une stratégie relativement simple à mettre en place, mais elle présente un inconvénient puisque le temps d'exposition sera donc indépendant de la densité des motifs à réaliser.

La stratégie d'écriture Vector (fig. II.3), quant à elle, consiste à se déplacer d'une zone à exposer à une autre en omettant les zones de non-intérêt. Elle gagne en intérêt comparée à la stratégie Raster pour l'écriture de motifs peu denses. La plupart du temps, à l'intérieur des zones d'exposition l'utilisation du mode Vector est associée avec une écriture boustrophédon pour limiter les imprécisions de placement, bien que ce mode d'écriture interne puisse être modifié (cela dépend des outils de

lithographie). Dans les cas de motifs denses la différence en temps d'exposition entre les deux stratégies est très faible. La précision de placement devient plus critique avec la stratégie Vector.

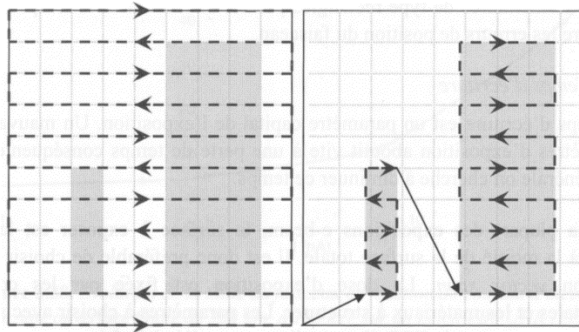


Fig. II.3 : Stratégies d'expositions. Raster à gauche, Vector à droite [II.6]

Selon la stratégie d'écriture envisagée, le support de substrat peut être mobile ou non pendant l'exposition. Les modes d'écriture Raster ou Vector sont souvent choisis par le constructeur de l'outil de lithographie et ne sont que rarement interchangeables.

1.1.2.2. Le pas d'écriture

On définit en général une unité élémentaire de découpe d'un motif appelée pixel et souvent carré. A partir de ce pixel on définit la plus petite unité d'exposition comme étant le pas entre deux impacts électroniques successifs, on parle de beam step size (BSS) homogène à une distance. Cette définition est souvent adoptée pour les équipements de type gaussien (voir partie 1.1.3.1). Plus ce pas est grand, plus la dose déposée par tir électronique (shot) doit être augmentée afin de compenser la diminution du nombre de points d'écriture.

Celui-ci doit être adapté à la taille du faisceau d'écriture. Notamment pour des considérations de modulation en dose, mais également pour lisser les déformations induites au niveau des zones de raccord. Un pas d'écriture très fin impactera négativement le temps total d'exposition, mais lissera les déformations au niveau des zones de raccord et permettra de moduler la dose plus finement et vice versa [II.7].

1.1.2.3. La dose d'exposition

La dose d'exposition correspond à la quantité d'électrons qui ont été délivrés par le faisceau dans le substrat par unité de surface (donnée le plus souvent en $\mu\text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$, allant de quelques unités à plusieurs milliers). Cette dernière est donc directement proportionnelle au courant du faisceau et au temps pendant lequel réside le faisceau au même endroit. Le calcul de la dose est donné par la relation suivante :

$$Dose = \frac{I}{BSS^2 * F} \text{ (eq. II.1)}$$

Où I est le courant du faisceau et F est la fréquence de balayage du faisceau

En général il existe un temps minimum de résidence du faisceau à un endroit donné. Ce qui se traduit plus généralement par une fréquence maximale de balayage du faisceau (allant jusqu'à 100MHz pour les outils VB300 les plus récents de Vistec Gaussian Beam Lithography). Cette fréquence

de balayage du faisceau est une limite au débit de l'équipement et provient, entre autres, de la fréquence de commutation des déflexions. Cette fréquence de commutation dépend de l'énergie d'accélération et il est difficile de trouver des électroniques rapides qui fonctionnent à 100kV (le plus souvent 50Mhz au maximum). Alors qu'on peut commuter à quelques GHz pour des basses tensions.

Il est possible de calculer un courant optimal pour diminuer le temps d'exposition en connaissant la dose à appliquer, la fréquence maximale et le BSS. Cependant, un trop fort courant entrainera un élargissement du faisceau par répulsion coulombienne entre les électrons du faisceau. Au final les courants vont généralement de quelques dizaines de pA à 100 nA, le choix final de la valeur et donc les performances lithographiques considérées optimales dépendent d'un étalonnage réalisé par l'expérimentateur (un exemple de l'effet combiné du courant et choix du BSS est présenté dans [II.7]).

1.1.2.4. Les champs d'exposition

Dans la partie 1.1.1.3, on a pu voir que le déplacement mécanique de la table a une précision de l'ordre de la dizaine de nanomètres et qu'il est, de plus, lent. C'est évidemment beaucoup trop imprécis pour réaliser rapidement des lithographies de motifs décananométriques, il existe donc dans les outils de lithographie électronique des bobines dédiées à la déflexion du faisceau qui, elles, permettront un placement rapide et sub-nanométrique du faisceau.

Ce sont ces dernières et plus précisément leurs gammes de déflexion qui permettent de définir les champs d'exposition. Il existe en général plusieurs types de champs, on parle alors de champs principaux et de sous-champs. Un champ principal contient un nombre fini de sous-champs, lui-même multiple du BSS. Les gammes de déflexions sont variantes d'un équipement à un autre, de quelques microns (MAPPER) au millimètre (Vistec- Raith).

1.1.2.5. Focus

Dans un équipement de lithographie électronique on peut également régler un paramètre nommé focus, ce dernier détermine la cote du plan parallèle au substrat dans lequel on veut créer l'image du point source. Compte-tenu des aberrations présentes dans les systèmes de lithographie électronique (chapitre I, section 3.1.2), l'image du point source est altérée et on obtient un disque. Avant de procéder aux expositions des motifs d'intérêt, on réalise de manière générale des expositions à différents réglages de focus pour trouver la taille de faisceau la plus faible possible à l'aide des PSF expérimentales.

Remarque : Contrairement à la photolithographie où la profondeur de champ est dépendante de la longueur d'onde, dans le cas de la lithographie électronique, on trouve des profondeurs de champ supérieures à plusieurs microns.

1.1.3. Les différentes approches

Il existe aujourd'hui 4 catégories d'équipements lithographiques qui se différencient principalement par le type de faisceau électronique utilisé et la manière.

1.1.3.1. Les équipements à faisceau gaussien

Les équipements de lithographie électronique les plus résolvants sont dits de type gaussien, ceci est dû à la forme du profil en énergie du faisceau (fig. II.4.a). Ce sont les équipements de lithographie électronique présentant les plus long temps d'écriture. L'écriture d'un motif est réalisée point par point selon une décomposition en une grille préétablie par l'utilisateur, le faisceau gaussien dépose alors son énergie sur les points exposés (fig. II.4.b).

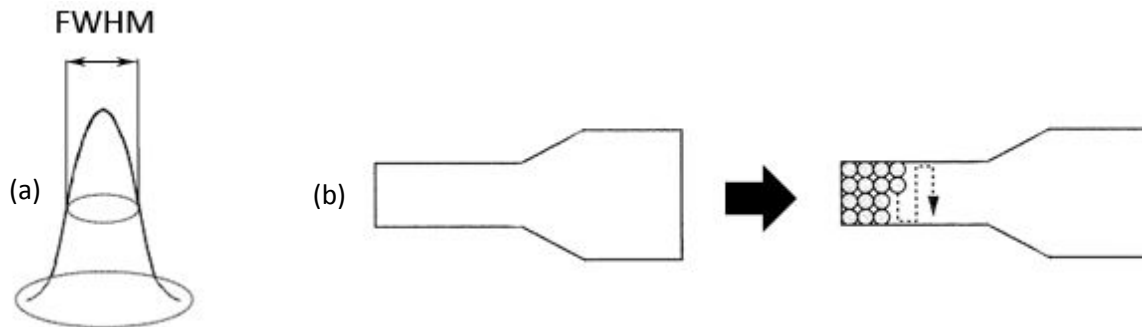


Fig. II.4 : (a) Profil en énergie de forme gaussienne et sa largeur à mi-hauteur (FWHM), distance caractéristique. (b) Représentation schématique, à gauche d'un motif à exposer et à droite l'écriture point par point avec un faisceau de type gaussien. ^[II.8]

En général, on prend la largeur à mi-hauteur (FWHM en anglais pour full-width at half maximum) de la densité énergétique comme mesure de l'extension spatiale d'un faisceau gaussien. Il est de plus conventionnellement admis que la résolution spatiale de l'équipement est proche de cette valeur. Elle est plus précisément dépendante de la somme quadratique de la taille de l'image de la source, des aberrations chromatiques, sphériques et de la limite de diffraction ^{[II.9],[II.10]} (les faisceaux gaussiens utilisés en lithographie électronique ont une extension spatiale allant de quelques nanomètres à plusieurs dizaines).

1.1.3.2. Les équipements à faisceau formé

Afin de profiter des capacités de résolution de la lithographie électronique, mais augmenter sa production horaire, l'entreprise IBM a démontré le concept de faisceau formé dès 1975 ^[II.9]. L'utilisation d'un faisceau formé repose sur le balayage du faisceau comme tout système de lithographie électronique mais également sur de la projection. Pour ce faire, il est rajouté dans la colonne électronique une plaque perforée, qui va « tronquer » le faisceau. On obtiendra alors une densité énergétique de forme similaire à celle de l'ouverture dans la plaque (à un coefficient de grandissement inférieur à 1 près).

L'utilisation d'une telle méthode, a permis non seulement la simplification de la préparation des données, le nombre de pixels étant réduit, mais a permis de réduire considérablement le temps d'exposition (fig. II.5).

Les systèmes à faisceau formé requièrent une correction dynamique des aberrations. Dans le cas contraire, le profil énergétique se déforme avec la déflexion du faisceau ^[II.9].

Dès 1977, le concept est amélioré et les outils de lithographie à faisceaux formés variables apparaissent. Ces derniers utilisent un jeu de deux ouvertures carrées, la projection de l'une sur l'autre dans la colonne électronique permet la formation de formes géométriques simples, telles que des carrés et des rectangles de différentes tailles (fig. II.6).

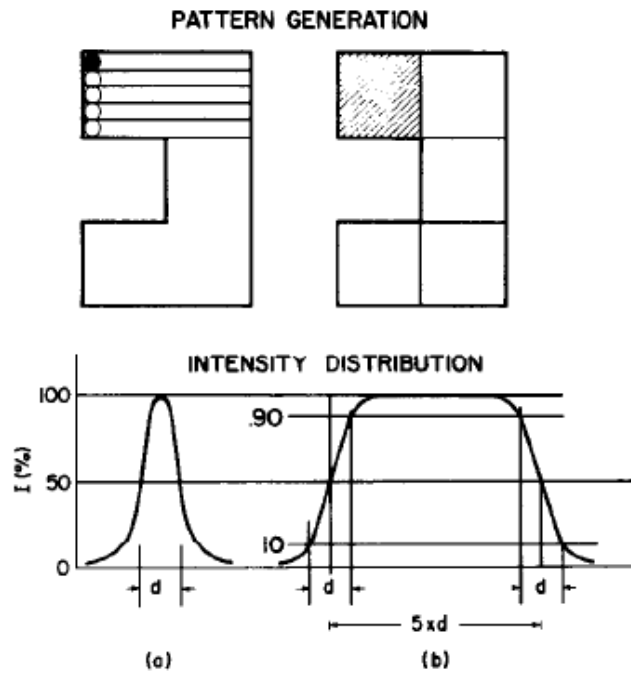


Fig. II.5 : Faisceaux gaussien (a) et formé rectangulaire (b) ; d représente la résolution spatiale des deux techniques [II.9]

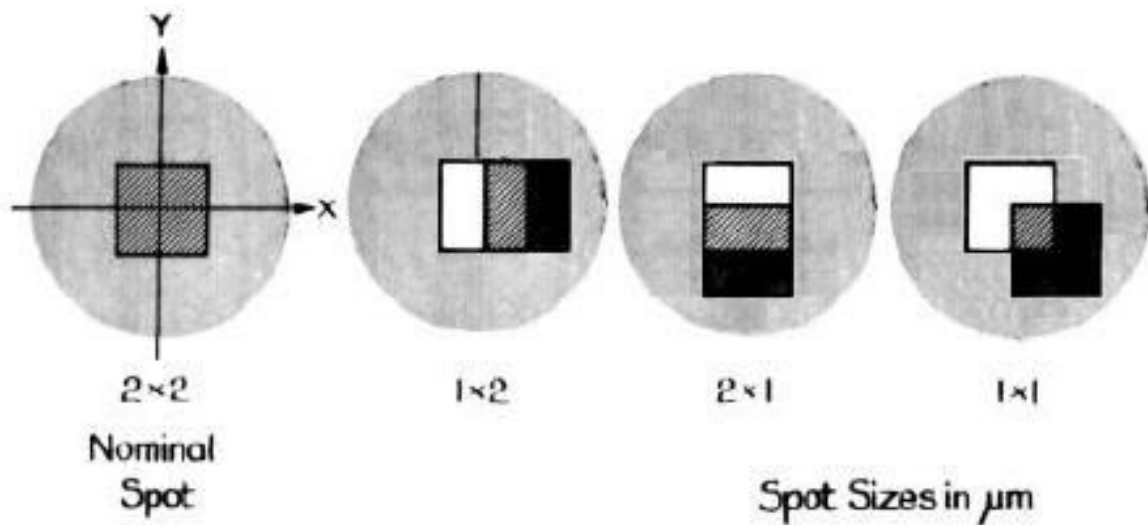


Fig. II.6 : Variations de formes possibles du premier concept de faisceau formé variable à l'aide de deux ouvertures [II.11]. La zone en gris hachurée représente la forme géométrique finalement projetée dans la résine après le passage du faisceau d'électrons à travers les deux ouvertures

Pour des expositions à l'aide de faisceaux formés, les erreurs de positionnement du faisceau deviennent critiques. En effet, l'unité d'exposition devient de même taille que la « grille » de décomposition du motif et des défauts apparaissent au niveau des zones de raccords. On parle de défauts de raccords de champs ou shot-stitching / shot-butting en anglais (figure II.7). Ces derniers sont d'autant plus prononcés sur des structures de tailles proches de la limite de résolution de l'équipement.

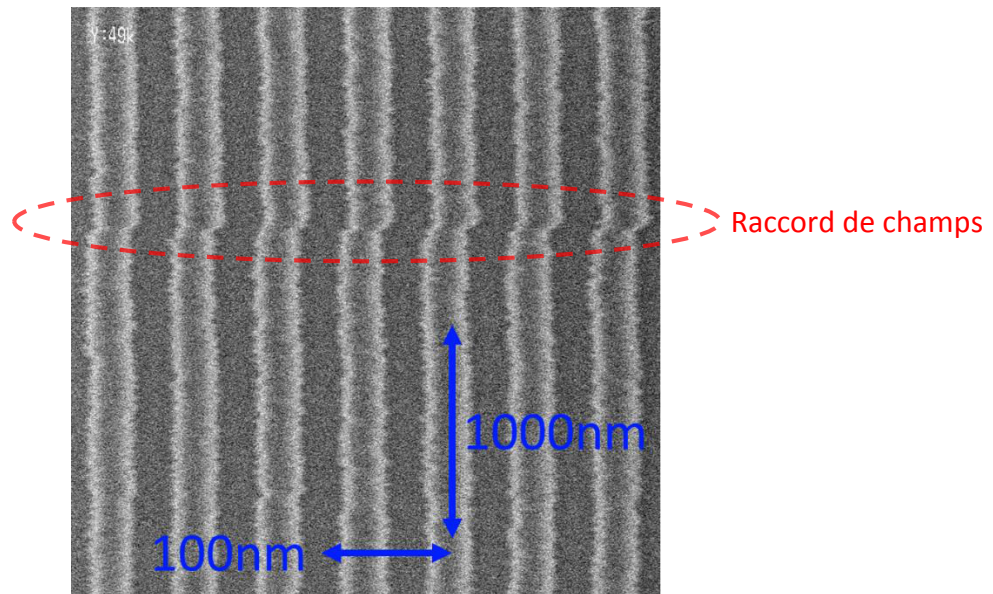


Fig. II.7 : Problème de raccord en lithographie électronique à faisceau formé dans un motif de lignes/espaces de résine (grossissement 300000 horizontalement et 49000 verticalement)

Remarque : Il est souvent requis pour réaliser des expositions de qualité de procéder à des expositions dites multiples (multiple-pass exposures en anglais). Ceci consiste en la réalisation du dépôt d'énergie aux endroits donnés en plusieurs fois avec des motifs qui peuvent être différents en taille et ou en positionnement. Ceci a l'avantage de lisser les contributions de l'équipement qui apparaissent normalement dans les structures, mais allonge largement le temps d'exposition. C'est ce genre de stratégie qui est utilisé pour la réalisation des masques de photolithographie.

1.1.3.3. Les équipements à projection de cellule

Il existe également une extension du concept de faisceau formé qui s'appelle la lithographie électronique à projection de cellules. Sur le même principe, on utilise cette fois des formes complexes directement présentes sur une plaque dans la colonne électronique. Bien que la complexité des formes projetées dans le cas de la lithographie électronique à projection de cellule soit moindre que celles présentes sur un masque de photolithographie, il en résulte de la même manière un coût accru pour cette technique en comparaison aux techniques citées précédemment. En effet, il faut pouvoir produire le masque en amont, l'inspecter et corriger ses défauts.

Cette technique utilise en général des courants 10 fois supérieurs à ceux rencontrés en lithographie électronique à faisceau formé [III.12]. Ce choix est bien évidemment fait pour assurer une production horaire notable, mais peut avoir une conséquence négative sur les capacités de résolution de la technique. En effet, un fort courant va induire une augmentation de l'effet de charge d'espace et ainsi entraîner un élargissement du faisceau. Il est également probable que les autres aberrations soient plus difficile à corriger avec des motifs contenant de petites géométries.

1.1.3.4. Les solutions multifaisceaux

Les développements technologiques depuis la création des outils à faisceau gaussien vers les faisceaux formés ont toujours été réalisés dans l'objectif d'augmenter le débit de production de la

lithographie électronique. Bien que la projection de formes simples variables ou de formes plus complexes permette de gagner largement en débit, les prérequis en termes de débit pour faire passer la lithographie électronique du marché de niche ou du prototypage à la production de haut volume pour les nœuds technologiques avancés ne sont toujours pas atteints. Augmenter le débit en lithographie électronique nécessite d'augmenter la dose déposée dans le matériau cible par unité de temps. Pour ce faire, deux voies sont envisageables. La première consiste à augmenter le courant du faisceau (ou la fréquence de balayage), mais cette stratégie a une limite. En effet, un trop fort courant impacte négativement les capacités de résolution par effet de charge d'espace et d'aberration. La seconde quant à elle consiste en l'utilisation de multiples faisceaux électroniques.

Il existe plusieurs façons d'obtenir plusieurs faisceaux dans un même système, la plus évidente est l'utilisation de plusieurs sources électroniques. Cela répond aisément à la problématique de la quantité de courant puisqu'il suffirait de multiplier les sources jusqu'à obtenir la production horaire requise. Le problème avec cette méthode est d'avoir une bonne uniformité de faisceau à faisceau. Une autre façon de produire plusieurs faisceaux réside en la séparation d'un faisceau initial, en provenance d'une unique source, en plusieurs sous-faisceaux. Le problème d'uniformité faisceau à faisceau se traduit alors en un problème d'uniformité en surface de la source ^[II.13]. Il faut alors trouver une source fournissant assez de courant pour alimenter tous les sous-faisceaux pour répondre au critère de débit. **C'est la seconde stratégie qui est utilisée par MAPPER lithography pour ses équipements.**

1.2. Outils d'exposition électronique à disposition

Dans le cadre de ces travaux de thèse, j'ai principalement utilisé deux équipements de lithographie électronique disponibles dans la salle blanche du CEA-LETI, ces derniers sont décrits ci-après.

1.2.1. Vistec SB3054DW

Le Vistec SB3054DW est un outil de lithographie électronique à simple faisceau formé variable développé par l'entreprise Vistec Electron Beam ^[II.14]. Il utilise une source LaB₆ et fonctionne avec une tension d'accélération de 50kV. Le focus est réglé par l'équipementier et non modifiable. Le SB3054DW utilise une stratégie d'exposition Vector et a été initialement conçu pour répondre aux besoins du nœud technologique 45nm. Dans son fonctionnement normal, il est capable d'atteindre une résolution 28nmhp pour des réseaux denses de L/S. C'est un outil mature capable d'exposer des plaques de silicium (ou d'autres matériaux faisant office de substrat) de 200mm ou 300mm de diamètre. Avant les expositions, les plaques subissent un pré-alignement, de plus ce dernier réalise la mesure de position du support de plaque grâce à deux systèmes interférométriques, ce qui assure que l'exposition se fera bien aux coordonnées attendues.

Deux catégories de jeux d'ouvertures existent dans la machine. La première catégorie permet d'avoir un faisceau de forme fixe carrée de 2.4µm de côté (utilisées uniquement pour l'exposition de larges zones). La seconde catégorie permet la formation de formes géométriques simples variables, résultantes de la projection d'un carré de 1.6µm de côté sur un autre de même dimension. Cet outil peut exposer des carrés, rectangles et triangles de différentes tailles (allant de quelques nanomètres à 1.6 µm, la distance maximale). Lorsque le faisceau impacte la surface de l'échantillon, la table (ou support échantillon) est totalement immobile. Selon la disposition des zones à exposer, le SB3054DW

réalisera différentes opérations afin d'exposer la zone requise. Pour cela, il faut se reporter à « l'organisation » des données à exposer représentée en figure II.8.

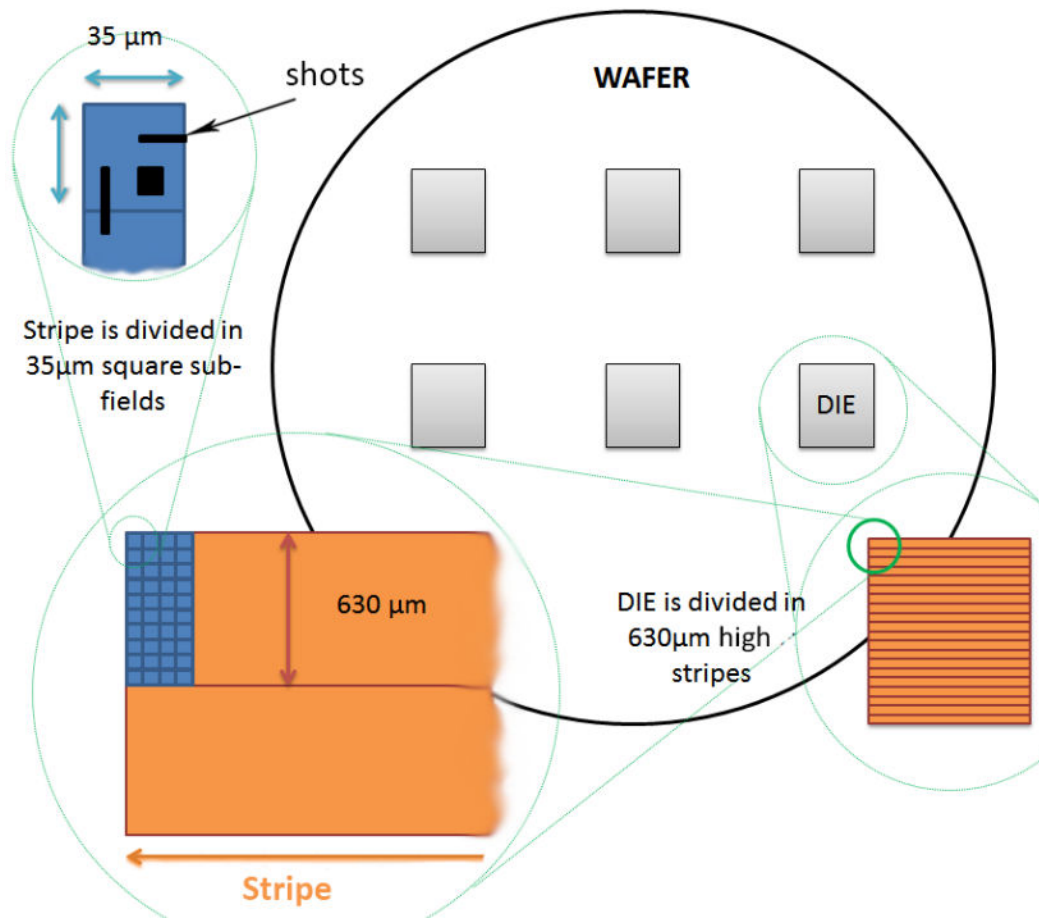


Fig. II.8 : Représentation de la hiérarchie de groupe des données à exposer. La plaque de silicium contient des puces (dies), ces dernières sont divisées en bandes horizontales (stripes) de 630μm de haut, ces bandes sont alors subdivisées en sous-champs (sub-fields) carrés de 35 μm de côté.

Ces dimensions choisies pour les bandes et les sous-champs proviennent des capacités de déflexions de deux lentilles, la lentille de macro-déflexion (défléchissant jusqu'à 630μm) et la lentille de micro-déflexion (défléchissant jusqu'à 35μm). En effet, l'exposition commence dans un sous-champ et pour tout déplacement inférieur à 35μm, seule la lentille de micro-déflexion sera utilisée. Si ce déplacement est supérieur à 35μm, le réglage de la lentille de macro-déflexion change, un nouveau sous-champ est défini et l'écriture reprend en ne réalisant des déflexions qu'avec la lentille de micro-déflexion. Toute distance supérieure à 630μm sera opérée par un déplacement mécanique de la table. Le processus est ainsi répété pour limiter au maximum l'utilisation du déplacement mécanique. Les motifs présents dans un sous-champ sont alors définis par le faisceau formé dont la géométrie est régie par des algorithmes dits de fracturation (décomposition en formes géométriques simples). L'utilisateur peut décider de figer une des dimensions des shots avant la fracturation.

Une calibration entre le déplacement mécanique et les lentilles de déflexions est nécessaire afin de limiter l'amplitude des défauts de raccord entre les différentes zones.

Pour toutes les expositions de motifs de lignes/espaces réalisées durant ces travaux de thèse, une longueur de shot de 1.25μm a été choisie (le maximum étant 1.6μm), la largeur de ce dernier sera

dépendante du motif à exposer. Ce choix de $1.25\mu\text{m}$ permet d'avoir un nombre entier de shots au sein d'un sous-champ de $35\mu\text{m}$ de côté.

On peut donc voir se dessiner trois types de défauts de raccord. À la jonction de 2 bandes (i.e. tous les $630\mu\text{m}$), à la jonction de 2 sous-champs (i.e. tous les $35\mu\text{m}$) et dans un sous-champ à la jonction de 2 shots (i.e. tous les $1.25\mu\text{m}$). Les défauts les plus nombreux sont du dernier type. Ces derniers proviennent notamment de la précision de placement du shot (plus ou moins 2nm dans les deux directions d'écriture) et d'un facteur de grandissement de l'image du shot dans la colonne. Ce facteur de grandissement est régulièrement réajusté par l'équipementier. Ces défauts bien que minimisés ont néanmoins un effet sur la rugosité de ligne de résine mesurée sur des expositions SB3054DW, nous y reviendront dans la partie 5.3.5 de ce chapitre.

1.2.2. Mapper ASTERIX

L'ASTERIX présent au CEA-LETI depuis 2009 est un des démonstrateurs de l'entreprise Mapper Lithography ^[II.15]. **C'est un prototype qui a pour but de démontrer la faisabilité d'une lithographie électronique basse énergie à faisceaux multiples.** Il utilise une source thermoionique de type BaO utilisée dans les tubes cathodiques et produite par Mapper. Le faisceau primaire est collimaté et subdivisé en 110 faisceaux gaussiens d'une tension d'accélération de 5kV , de courant environ 0.02nA et d'extension spatiale 25nm (FWHM).

Dans la version présente au CEA-LETI, aucun des 110 faisceaux ne possède de zone de recouvrement d'écriture avec un voisin. On peut utiliser une stratégie d'écriture type Vector ou Raster au choix. Avec une écriture de type Vector chacun des 110 faisceaux écrit la même chose et la table est immobile, l'adressage des points d'exposition se fait par déflexion. Dans le cas d'une écriture de type Raster la table bouge et chaque faisceau est piloté individuellement. **Une stratégie de type Vector a été utilisée pour les travaux de thèse de ce manuscrit.**

Il est important de noter que la machine ne possède pas de pré-aligneur et que la table possède une précision de placement très limitée (plusieurs centaines de nanomètres).

Seule une zone de 1.4mm par 1.5mm est exposée sur une plaque de silicium de 300mm . Cette zone est divisée en 110 sous-zones de $130\mu\text{m}$ par $150\mu\text{m}$ correspondant à la zone d'exposition d'un unique faisceau. Chacun de ces faisceaux peut écrire jusqu'à 252 champs de $3\mu\text{m}$ par $3\mu\text{m}$, ces champs pouvant être différents en terme de motif, dose, et focus (dans notre cas le focus n'a pas été modifié)^[II.16].

Pour ces travaux de thèse, chaque motif à exposer avec l'ASTERIX a été décomposé en une grille de pixels de 4nm par 4nm (modifiable). Pour éviter l'utilisation d'une fonctionnalité appelée dithering lors de la préparation des données, seuls des motifs L/S dont l'espace et la ligne sont des multiples de la grille d'exposition ont été réalisés. Cette fonctionnalité, décrite dans la partie 1.2.3., pourrait impacter dans une mesure non connue la rugosité de ligne.

Les capacités de résolution de l'ASTERIX ont été assez variées au cours des travaux de thèse, mais ont toujours permis de réaliser des motifs de L/S dense de 32nmhp (spécification de résolution attendue pour le futur outil Matrix, dans ses meilleures conditions l'outil a permis de réaliser des L/S 18nmhp).

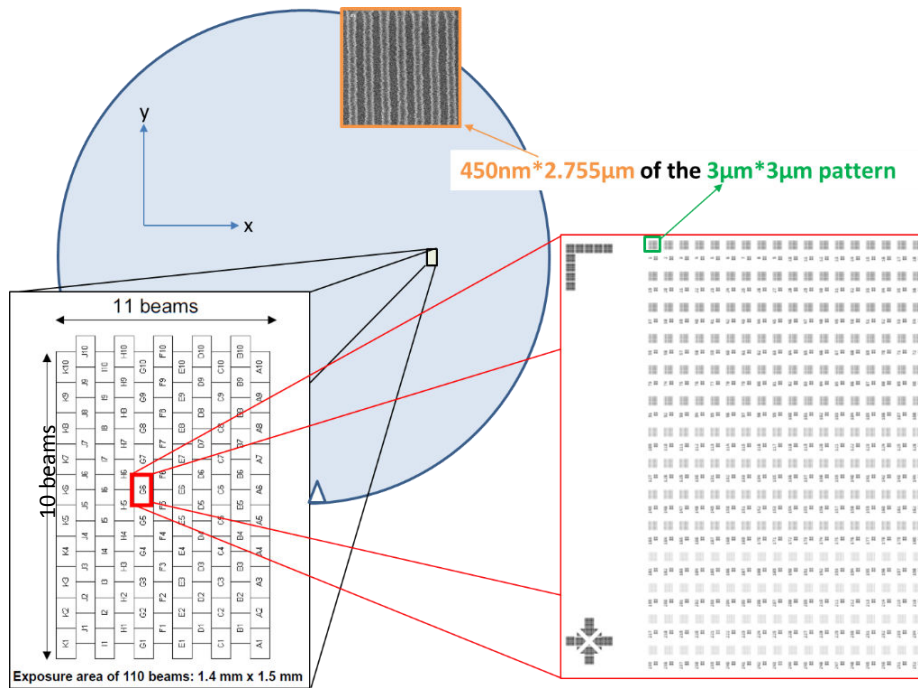


Fig. II.9 : Représentation de la disposition d’une exposition avec le mapper ASTERIX. Encadré en noir la zone d’exposition globale de 1.4mm*1.5mm^[II.16], en rouge la zone d’écriture de 130μm par 150μm d’un des 110 faisceaux qui contient 252 motifs de 3μm par 3μm (en vert) dont une portion (en orange) a été imagée en microscopie électronique à balayage par vue de dessus.

1.2.3. Mapper Matrix

Le futur équipement de production de Mapper Lithography, MATRIX, arrivé au début 2014 et bien que n’ayant pas été utilisé pour ces travaux de thèse, mérite une description quant à sa stratégie d’écriture.

La version finale du MATRIX dénotée 10.1 aura 13260 faisceaux (de courant 12.8 nA) qui sont ensuite divisés en 49 sous-faisceaux d’extension spatiale 25nm (FWHM) (de courant 0.3nA environ). Ces sous-faisceaux ont une tension d’accélération de 5kV. La plaque est mobile pendant l’exposition et il utilise une stratégie d’écriture Raster. La déflexion des sous-faisceaux pendant l’écriture se fait de façon groupée, c’est-à-dire tous les sous-faisceaux subissent une même déflexion (uniquement selon l’axe x, perpendiculaire à la direction du déplacement mécanique ou scan, fig. II.10). Les sous-faisceaux peuvent être bloqués indépendamment les uns des autres pour ne pas arriver jusqu’au substrat. Cette opération de blocage est réalisée de façon électrostatique. Le système de déflexion est actionné par l’activation de photodiodes (activées par des lasers, 649740 au total). On parle de « blanker » dynamique et ce dernier est alimenté en données avec une bande passante de 3.5Gb/s.

Une plaque de 300mm est décomposée en champs de 26 mm par 33mm, ces derniers décomposés en bandes (stripes) de 2.2μm de large avec un pas de répétition de 2.0μm. Chaque bande est écrite par un seul faisceau, une région de 0.2μm est allouée pour la réalisation des raccords entre faisceaux (stitching). Ces bandes sont composées de « lignes de scan » (scanline) de même largeur que la bande et de hauteur 3.5nm (taille du pixel). Une ligne de scan est écrite par un seul sous-faisceau et réalisée par déflexion. Trois passages entrelacés permettent de couvrir entièrement une zone (fig. II.10).

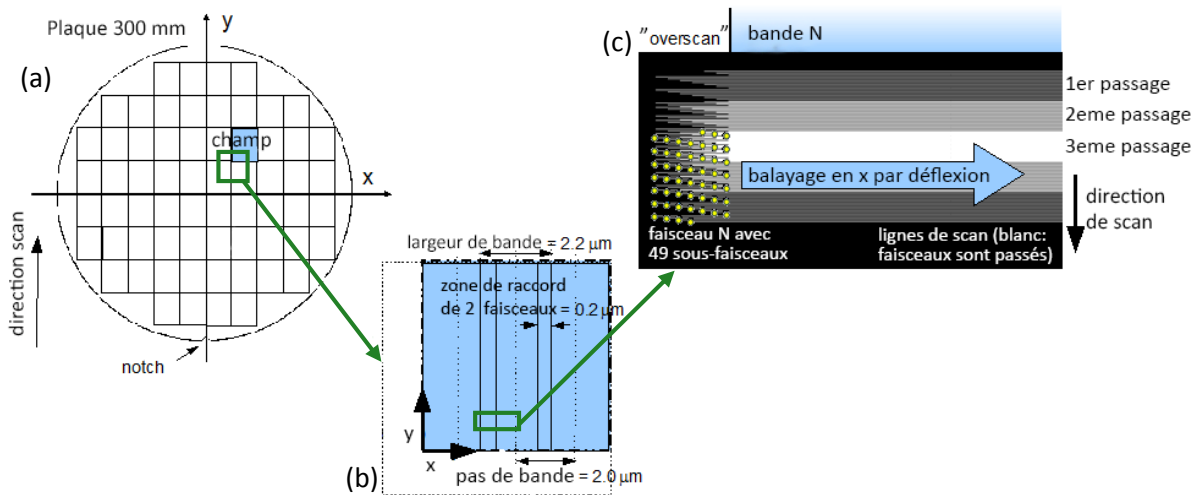


Fig. II.10 : Agencement d'une exposition pour l'équipement MATRIX, montrant (a) la division en champs, (b) la division de ces champs en bandes possédant des zones de raccord entre elles. (c) Décomposition d'une bande en lignes de scan et agencement des sous-faisceaux pour en réaliser l'écriture [II.17].

La dose déposée par chaque faisceau est fixe (courant et fréquence de balayage fixes). En conséquence la modulation de la dose est réalisée en déposant ou non de la dose sur les pixels de la grille d'exposition. On parle de pixels ON ou OFF (fig. II.11). Ceci est réalisable car la grille d'exposition est très largement inférieure en taille (3.5nm en Y et variable en X pour ajuster la dose d'exposition) comparée à la dimension des sous-faisceaux (25nm FWHM).

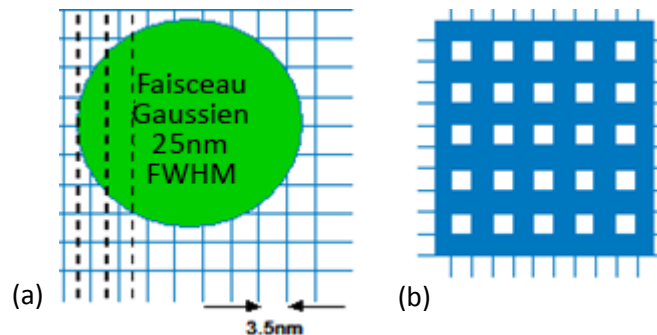


Fig. II.11 : (a) Représentation du faisceau électronique (25nm FWHM) et de la grille d'exposition de pas 3.5nm. (b) Représentation d'une réduction de la dose d'exposition de 25% par des pixels ON en bleu et OFF en blanc [II.17].

Lorsque les dimensions des zones à exposer ne sont pas des multiples du pas de la grille ou que l'on souhaite réaliser la correction des effets de proximité, le « dithering » (ou tramage) va être employé lors de la préparation des données. La simulation du dépôt de dose selon la grille d'exposition choisie est comparée au dépôt de dose attendu. Les erreurs de dose sont ensuite propagées aux pixels voisins (pour le cas de tramage utilisé par MAPPER). Une représentation schématique est donnée en figure II.12.



Fig. II.12 : A gauche, motif dans son format initial et à droite, son rendu après dithering (format lisible par la machine) [II.17]

De nombreuses considérations ont été omises afin de présenter brièvement le principe de fonctionnement du MATRIX, le système est en réalité plus complexe. Plus de détails sur la stratégie de modulation de la dose, les raccords de champ d'écriture faisceau à faisceau et les estimations de contrôle du procédé lithographique par simulation sont décrits par Belledent *et al.* [11.17]

2. Procédé lithographique

Le procédé lithographique englobe l'étape de lithographie électronique et le procédé résine. Le procédé résine concerne la préparation des substrats de films de résine et leur traitements après l'étape de lithographie.

2.1. Procédé résine

La plupart des étapes du procédé résine ont été réalisées à l'aide d'équipement que l'on nomme piste (ou track en anglais). La quasi intégralité des étapes du procédé résine ont été réalisées sur les pistes SOKUDO RF3 et SOKUDO DUO présentes au CEA-LETI.

2.2. Le traitement de surface du substrat

On doit déposer notre film de résine sur notre substrat, mais on doit préalablement à l'étalement, de manière générale utiliser un promoteur d'adhérence afin de rendre les substrats de silicium moins hydrophiles et de renforcer les interactions avec la résine.

L'oxyde natif du silicium présente des fonctions hydroxydes en surface. On peut réaliser la silylation de ces fonctions hydroxydes pendantes à l'aide d'HMDS (hexaméthylidisilazane). Cette réaction est en général opérée avec du HMDS sous forme gazeuse à 115°C dans les pistes au CEA-LETI. Le schéma réactionnel représentant la fonctionnalisation des fonctions hydroxydes en surface de l'oxyde de silicium est donné ci-après :

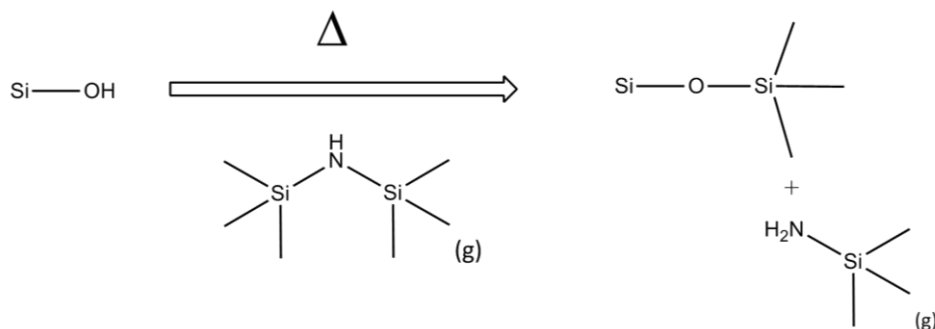


Fig. II.13 : Réaction de silylation des fonctions silanols présentes en surface des substrats de silicium à l'aide d'HMDS à l'état gazeux et à la température de 115°C.

Il est possible de réaliser la silylation de groupements présentant un H mobile autres que Si-OH (fonctions alcool, phénol, ...).

2.3. L'étalement par centrifugation

Le procédé d'étalement des matériaux en solution est en général divisé en 5 parties ^[II.18] :

1. Mouillage de la surface du substrat avec un solvant typique des résines, l'acétate de 2-méthoxy-1-méthyléthyle (ou PGMEA), avec substrat en rotation
2. Dispense de quelques millilitres de la résine en solution, suivi d'une forte montée de la vitesse de rotation
3. Mise à l'épaisseur.

L'épaisseur atteinte est donnée par la relation empirique simplifiée ^[II.19]:

$$\text{épaisseur} = \frac{A}{\omega^a} \quad (\text{eq. II.2})$$

où A est une constante qui dépend de la concentration de la solution en chaînes polymères, de la viscosité intrinsèque de la solution et d'une constante de calibration. ω est la vitesse de rotation en (tr.min⁻¹) et l'exposant a est souvent de valeur proche de 0.5

Les courbes d'épaisseur en fonction de la vitesse de rotation sont appelées spin-curves. Les épaisseurs sont mesurées à l'aide d'ellipsomètres.

4. On réalise en général un détournage au solvant des bords de plaques à l'aide d'une buse spécifique qui solubilise le dépôt de résine sur les quelques millimètres proches du pourtour de la plaque (afin d'éviter toute contamination organique lors de la manipulation des plaques par les robots)
5. Séchage de la résine par centrifugation

2.4. Le recuit après couchage (ou Post-Applied Bake, PAB)

Le rôle de ce recuit est double, il permet à la fois de densifier la matrice polymère de la résine en évaporant le solvant résiduel et à relaxer les contraintes des chaînes polymères induites par centrifugation. Pour ce faire, la température de PAB est en général proche ou supérieure à la température de transition vitreuse (T_g) du polymère. Une fois le temps de recuit atteint, la plaque est envoyée vers une plaque froide (cool plate) avant d'être utilisable.

Il est à noter que des variations du temps ou de la température de ce recuit peuvent avoir une influence sur la dose d'exposition. En effet les modifications de la densité de la matrice polymère (et donc du volume libre) avant exposition peuvent changer la constante de diffusion des acides générés pendant l'exposition.

2.5. L'étape de lithographie

L'étape de lithographie réalisée dans notre cas dans les équipements décrits en section 1.2 est en général opérée peu de temps après le PAB. L'ajustement de la dose d'exposition permettra d'ajuster la dimension critique des structures après lithographie.

2.6. Le recuit après exposition (ou Post Exposure Bake, PEB)

A ce stade le dépôt d'énergie a été réalisée mais les motifs ne sont pas encore présents, seule une image latente existe dans la résine. Il est important de garder la plaque fraîchement exposée sous vide afin d'éviter la migration prématurée des acides qui viennent d'être générés. On parle de delay-time. Celui-ci est en général à minimiser pour des raisons de reproductibilité, bien qu'il existe des plateformes de résines peu sensibles à ce paramètre.

Il est nécessaire de procéder à un recuit pour activer la réaction catalytique de déprotection par les acides des fonctions ester des résines positives amplifiées chimiquement (les esters sont transformés en acides carboxyliques). Les dimensions des structures obtenues seront en général dépendantes de la température et la durée de ce recuit.

2.7. Le développement

L'étape finale de développement consiste à révéler les motifs. Cette dernière est réalisée dans notre cas avec une solution aqueuse basique d'hydroxyde de tétraméthylammonium (TMAH) de concentration massique 2.38%. Ce développeur à cette concentration est très couramment utilisé pour les résines positives à amplification chimique. Le procédé de développement consiste au dépôt de la solution de développement en surface de la résine, la plaque étant immobile ou en rotation (on parle de développement statique ou dynamique respectivement). Au bout d'une certaine durée (typiquement 30 secondes), la solution est progressivement diluée avec de l'eau déionisée et pendant ce temps la plaque est en rotation afin d'éjecter la solution partiellement diluée. Une fois suffisamment rincée, on peut réaliser le séchage de la résine par centrifugation.

Il est important de contrôler la température de la solution de développeur. En effet, le pH et les cinétiques de solubilisation des chaînes déprotégées peuvent être affectées par ces variations. On peut également jouer sur sa durée et sa concentration.

On peut rajouter avant l'étape finale de séchage du développement, une étape de rinçage progressif supplémentaire à l'aide de solution de surfactants afin de diminuer la tension de surface du liquide. Ces surfactants sont en général utilisés pour diminuer les forces de capillarité qui sont appliquées aux motifs lors de l'étape de séchage par centrifugation et donc de limiter le phénomène de d'effondrement des motifs (ou pattern collapse, PC).

On peut également noter que pour des raisons environnementales et économiques l'étape de développement est de plus en plus réalisée de façon dynamique. Cela permet de réduire le volume de solution utilisé pour la révélation des motifs et de limiter les hétérogénéités de développement entre les zones d'expositions denses et les zones peu denses.

2.8. La résine d'exposition

2.8.1. Le choix de l'épaisseur de résine

Avant de procéder au choix de la résine d'exposition, il est important de choisir son épaisseur. En effet, la dose sera augmentée avec un film de résine épais et inversement. Ceci est lié à la quantité de modifications chimiques à réaliser, qui augmente avec l'épaisseur du film de résine. De plus, en lithographie électronique l'épaisseur du film de résine est directement liée aux capacités de résolution de l'équipement. En effet, on a vu dans le chapitre I, section 3.2.2, que le nombre d'évènements collisionnels élastiques que subissent les électrons est proportionnel à l'épaisseur de la résine et

inversement proportionnel à l'énergie des électrons. De plus, l'élargissement du faisceau d'électrons, qui limite la résolution, est lié au nombre d'évènements élastiques subis par les électrons. Ce phénomène est d'autant plus prononcé que la tension d'accélération des électrons est faible (eq. I.14).

De plus, le dépôt d'énergie est supérieur dans le bas de la résine que dans la partie haute, ce qui entraîne une variation de dimension critique entre le haut et le bas du motif si l'épaisseur initiale du film de résine est trop importante (figure II.14). La variation de CD entre le haut et le bas du film de résine dépend de l'énergie du faisceau incident. À 5 keV il faut travailler avec des films idéalement inférieurs à 50 nm alors qu'à 100 keV on peut exposer des films d'épaisseur 1 μm .

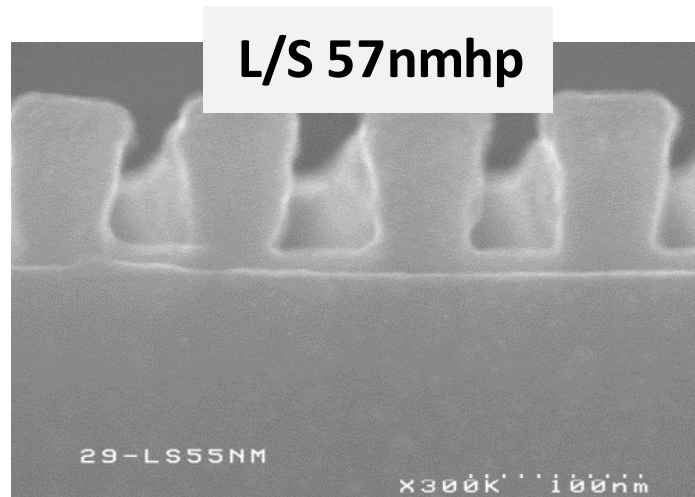


Fig. II.14 : Illustration du phénomène combiné de dépôt d'énergie accru au pied des motifs et d'élargissement du faisceau conduisant à une variation du CD entre le haut et le bas des motifs de résine. Exemple réalisé dans un film de résine positive d'épaisseur 130nm.

Finalement, des travaux réalisés au laboratoire de lithographie avant le démarrage de ces travaux de thèse ont permis de convenir d'une épaisseur de film initiale de film de résine de 37 nm pour laquelle on ne voyait pas de variation du CD de ligne entre le bas et le haut du motif. Une épaisseur plus importante serait en effet intéressante pour la gravure plasma mais entraînerait la génération d'une pente dans les motifs lithographiés et rendrait le procédé sensible à l'effondrement des motifs (ou pattern-collapse).

2.8.2. Le choix de la résine

Au démarrage des travaux de thèse, deux résines de tonalité positive, initialement destinées à la lithographie EUV mais réadaptées (augmentation de la quantité de base) pour la lithographie électronique basse énergie (notées A et B) étaient disponibles au laboratoire. Afin de déterminer la résine de choix pour le reste des travaux de thèse, leurs performances pour réaliser des motifs de L/S ont été testées avec le Vistec SB3054DW. Pour cela des matrices dites expo-dose ont été réalisées avec différents motifs de L/S allant de 50nmhp à 28nmhp dans chacune des résines couchées directement sur silicium. Les mesures de CD de ligne de ces résines ont été réalisées à chaque dose d'exposition par CDSEM (technique décrite au paragraphe 5.3.1).

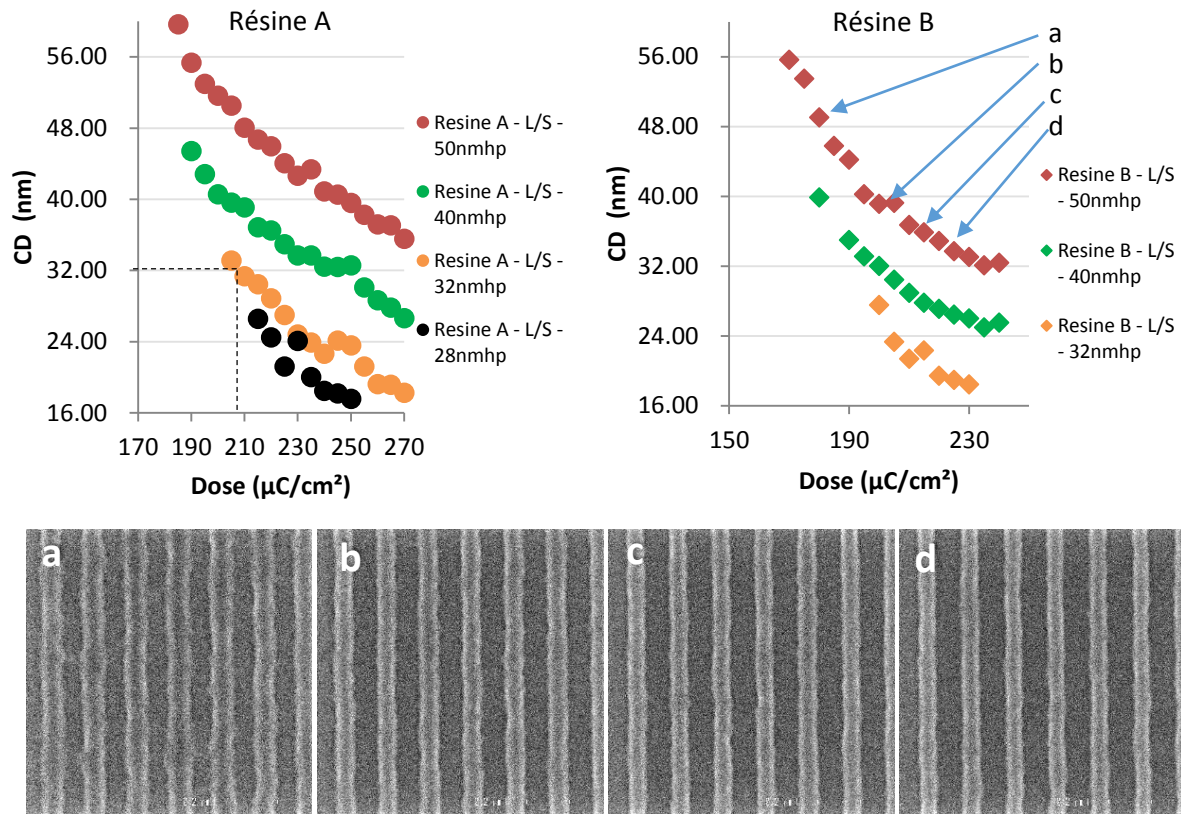


Fig. II.15 : Courbes de CD de ligne en fonction de la dose, pour les résines A et B, pour 4 dimensions de motifs (50nmhp à 28nmhp), acquisition des images (800V, 32frames et 1024*1024 pixels, grossissement 200 000). Images CDSEM associées au cas 50nmhp de la résine B

Pour les résines A et B, on peut voir la diminution de la dimension critique de ligne avec la dose d'exposition pour les 4 cas étudiés. Cette évolution est cohérente puisque l'on déprotègera un plus grand volume du matériau avec des doses plus fortes. Il est important de signaler que lorsque l'évolution du CD avec la dose est linéaire, les motifs sont bien résolus et on peut avoir une fenêtre de procédé acceptable. Lorsque l'évolution du CD n'est pas linéaire avec la dose, par exemple à des doses trop faibles on a une « dose to clear » non atteinte dans les tranchées et on peut voir des résidus entre les lignes. Lorsque la dose devient trop forte, on perd également en épaisseur au niveau des lignes.

Les structures réalisées dans la résine B avec les motifs 28nmhp ont systématiquement présenté des défauts, en conséquence aucune mesure n'est donc présente pour ce cas-ci. On peut déjà observer que la résine B est moins résolvente que la résine A. La résine A permet de faire un motif de L/S 32nmhp avec le CD visé de 32nm pour une dose de 208 $\mu\text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$ environ, quand la résine B ne permet pas d'atteindre le CD visé de 32nm.

Pour la suite des études, c'est la résine A qui sera retenue, afin de ne pas être limité dans la suite des travaux en termes de résolution de résine.

Il est important de noter que cette résine ne sera pas le facteur limitant des travaux de thèse en termes de résolution. En effet des expositions en lithographie électronique avec un outil de haute résolution gaussien de tension d'accélération 100kV, présent au laboratoire mais non utilisé au cours de cette thèse, ont permis la réalisation de motifs de L/S de 16nmhp avec la résine A (Fig. II.16)

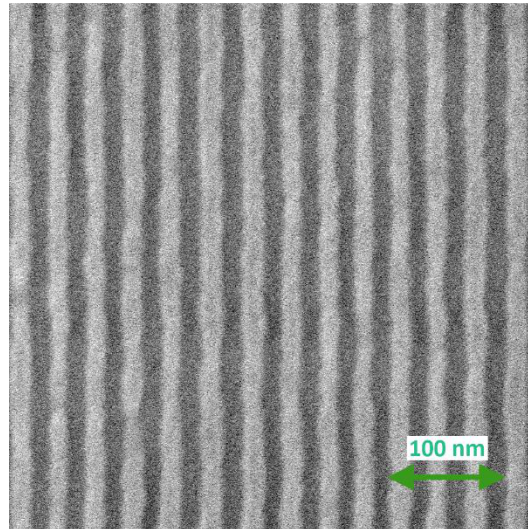


Fig. II.16 : Motifs de L/S 16nmhp de résine A réalisés avec un VB6HR de tension d'accélération de 100kV.
(acquisition 500V, 32frames et 1024*1024pixels, grossissement 300 000)

Pour ces travaux de thèse, les températures de PAB et PEB recommandées par les producteurs de résine ont été utilisées (pour la résine A respectivement 130°C pendant 60s et 110°C pendant 60s). Il en est de même pour la réalisation du développement des résines dans les modules de développement statique de la SOKUDO RF3, le temps de développement recommandé par le producteur de résine a été utilisé (pour la résine A 30s).

3. Traitement des motifs par plasma

Après les étapes du procédé lithographique qui ont permis la réalisation d'un masque de résine plusieurs opérations sont possibles, des dépôts, de l'implantation ionique, ou bien de la gravure humide ou sèche. Dans cette partie, nous traiterons uniquement du rôle de la gravure sèche ou plasma, qui est de transférer les structures réalisées dans la résine dans les matériaux sous-jacents. Le maintien des dimensions critiques et des profils des structures à travers les différents matériaux de l'empilement est primordial, il permet de garantir les performances des dispositifs.

3.1. Le plasma

Les plasmas sont des gaz partiellement ou totalement ionisés mais ne présentent pas de charge électrique dans leur globalité (on parle de quasineutralité). Ils sont constitués de différentes espèces chimiques, neutres (molécules, radicaux libres et atomes) ou chargées (ions), mais également d'électrons et de photons. Dans le cadre de la gravure plasma, les espèces en phase gazeuse sont soumises à un champ électrique en fréquence (à 13.56 MHz), c'est cette perturbation qui va générer les premiers électrons en les arrachant aux atomes ou molécules du plasma. Il s'en suit une cascade de phénomènes collisionnels élastiques et inélastiques avec le gaz en présence. Les collisions inélastiques produisent les espèces les plus importantes nécessaires au procédé de gravure. Les collisions élastiques quant à elles permettent la diffusion d'espèces neutres dans le plasma par marche aléatoire.

3.2. Principe

Les espèces du plasma bombardant les surfaces n'ont pas la même distribution angulaire. Typiquement, les neutres et les électrons arrivent sur les surfaces avec une distribution isotrope, alors que les ions positifs présentent une répartition anisotrope, normale aux surfaces du fait de la formation de gaine électrostatique. De plus, les ions sont généralement accélérés selon la normale au substrat lorsque celui-ci est polarisé par l'application d'une puissance au générateur dit de bias.

La gravure par plasma est basée sur une synergie ions/neutres. Ainsi elle combine les avantages de deux types de gravure tout en minimisant leurs inconvénients : la gravure chimique isotrope et sélective pilotée par les espèces radicalaires du plasma et la gravure physique anisotrope et non sélective pilotée par le bombardement ionique. Ainsi, les vitesses de gravure obtenues par gravure plasma peuvent être 10 à 30 fois supérieures aux vitesses obtenues par une gravure chimique ou physique séparément, d'où l'intérêt d'utiliser le plasma pour structurer la matière.

La gravure anisotrope du matériau est possible car les ions sont accélérés quasi perpendiculairement au substrat (grâce aux gaines électrostatiques). Cependant, lorsque l'on souhaite structurer la matière par gravure plasma, la composante latérale de la gravure pilotée essentiellement par le flux isotrope de neutres réactifs peut induire des distorsions dans les profils de gravure. Cette composante latérale de la gravure peut néanmoins être minimisée en jouant sur la chimie du plasma.

En effet, en plus des ions et des neutres chimiquement réactifs avec le matériau à graver, le plasma peut aussi produire des molécules dites inhibitrices qui présentent un fort taux de « collage » sur les surfaces. Ces molécules peuvent s'adsorber sur les flancs des motifs en cours de gravure pour former une couche mince de passivation sur les flancs du matériau à graver et ainsi bloquer la gravure latérale. La vitesse de gravure latérale est donc la résultante de deux composantes : la gravure latérale des flancs des motifs pilotée par les radicaux réactifs du plasma et la formation d'une couche de passivation protectrice sur les flancs pilotée par des espèces à fort taux de collage. Les mécanismes de gravure par plasma impliqués dans le transfert anisotrope d'un motif sont résumés sur la figure II.17.

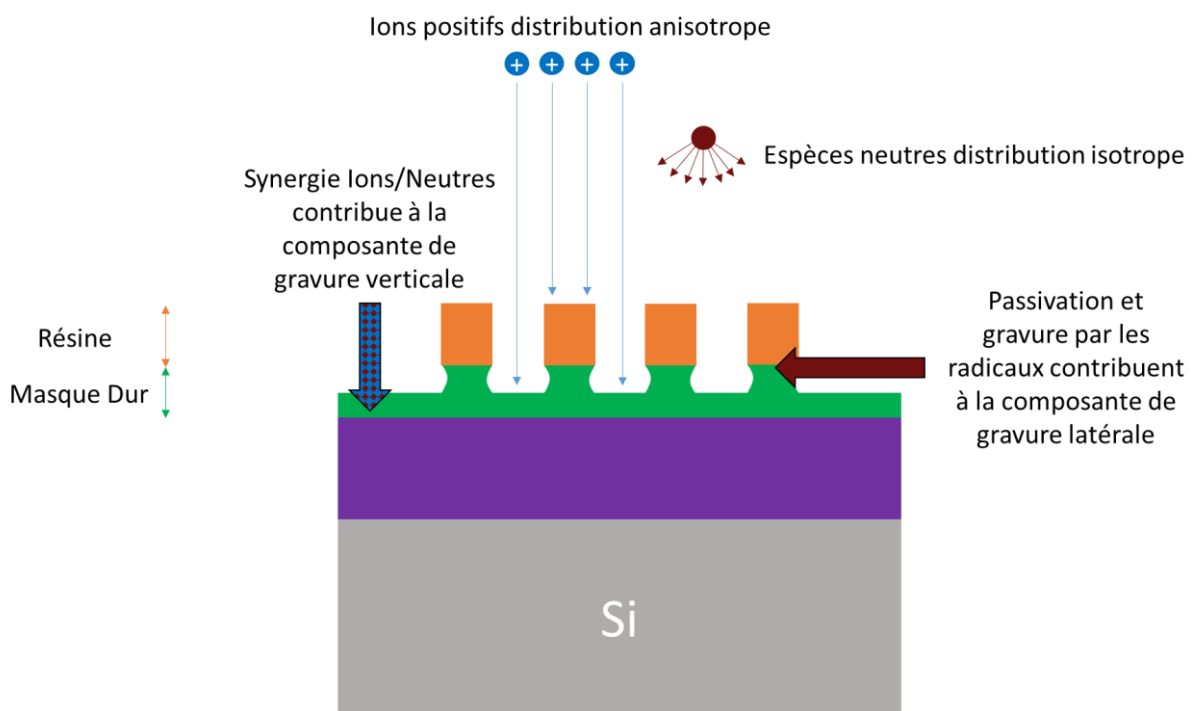


Fig. II.17 : Schéma représentatif des processus impliqués lors de gravure par plasma

Dans le cadre de ces travaux de thèse, les plasmas n'ont pas été utilisés pour transférer les motifs de résine dans les matériaux sous-jacents mais plutôt pour modifier les propriétés physicochimiques des motifs de ligne de résine à l'aide de plasmas sans puissance de polarisation (pas d'accélération des ions).

3.3. Réacteur de gravure

L'intégralité des expériences réalisées avec des plasmas (gravures ou prétraitements) de ces travaux de thèse a été effectuée dans un réacteur de gravure industriel à couplage inductif (ICP) Advantage™ DPS (Decoupled Plasma Source) commercialisé par la société Applied Material (fig. II.18) acceptant des plaques de diamètre 300mm.

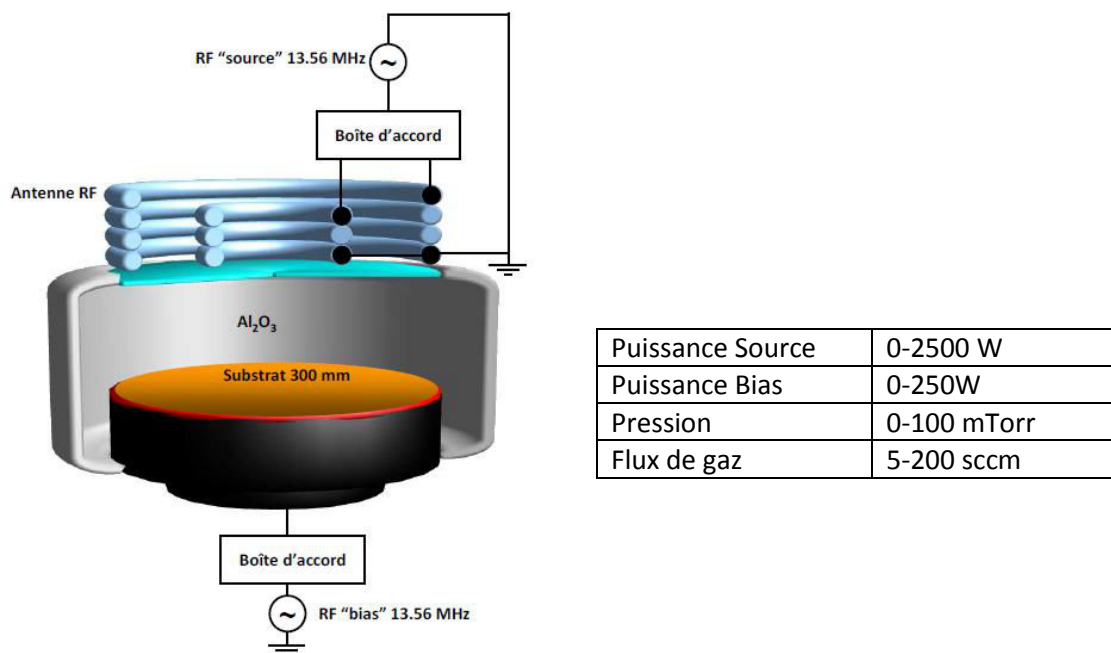


Fig. II.18: Représentation de la DPS du CNRS LTM^[II.21] et les plages de fonctionnement des principaux paramètres accessibles à l'utilisateur

Les paramètres machine disponible sur la DPS300 pour contrôler le procédé de gravure sont : la pression au sein du réacteur de gravure (0-100mT), la composition des gaz et leurs débits (modifient le temps de résidence dans l'enceinte des espèces), la puissance que le générateur source délivre au gaz dans l'enceinte (modifie le taux de dissociation et de ionisation du plasma), et la puissance délivrée par le générateur de bias (modifie l'énergie des ions).

4. Caractérisation des films minces de résine

Ce paragraphe consiste à présenter l'éventail de techniques utilisées pour caractériser les résines avant et après exposition lithographique et également après des traitements plasma.

4.1. Caractérisations physico-chimiques

4.1.1. Spectroscopie d'absorption infrarouge par transmission

La spectroscopie d'absorption infrarouge (IR), dans l'infrarouge moyen (4000 cm^{-1} à 400 cm^{-1}), est très largement utilisée pour obtenir des informations sur la nature des liaisons covalentes présentes dans un matériau, gaz, liquide ou solide. C'est une technique très répandue pour caractériser rapidement des molécules.

La méthode repose sur l'absorption du rayonnement infrarouge par le matériau à analyser, les photons IR absorbés vont permettre la transition de l'état fondamental vibrationnel de la molécule vers un état excité vibrationnel. Les liaisons covalentes possèdent des fréquences caractéristiques vibrationnelles pour lesquelles elles vibrent ou tournent. Des structures complexes fourniront des spectres avec plus de bandes d'absorptions. Cette technique permet néanmoins de remonter à beaucoup d'informations sur le matériau analysé, notamment en termes de fonctions chimiques (fonctions ester, cétones, amines, etc...)

Dans notre cas, on a pu utiliser un spectromètre IR par transmission QS3300 de la société ACCENT qui permet d'analyser des plaques de 200 ou 300mm de diamètre, la zone à analyser doit être supérieure à 5 mm de diamètre, le détecteur présent dans cette machine est composé de sulfate de triglycine deutérée (DTGS). La résolution des acquisitions est de 4 cm^{-1} et l'on réalise 192 scans.

Pour l'acquisition des spectres infrarouge de notre résine, nous avons augmenté l'épaisseur initiale de notre film de résine à 60 nm afin d'obtenir assez de signal, en effet après divers traitements l'épaisseur du film peut diminuer. Le regroupement du spectre d'absorbance IR de notre résine d'étude avec un spectre d'absorbance IR de résine de génération KrF 248nm (basée sur le poly(4-hydroxystyrène), souvent abrégé en PHS) montré en fig II.19 (a) et (b), permet de donner des pistes sur la structure du polymère de notre résine d'étude.

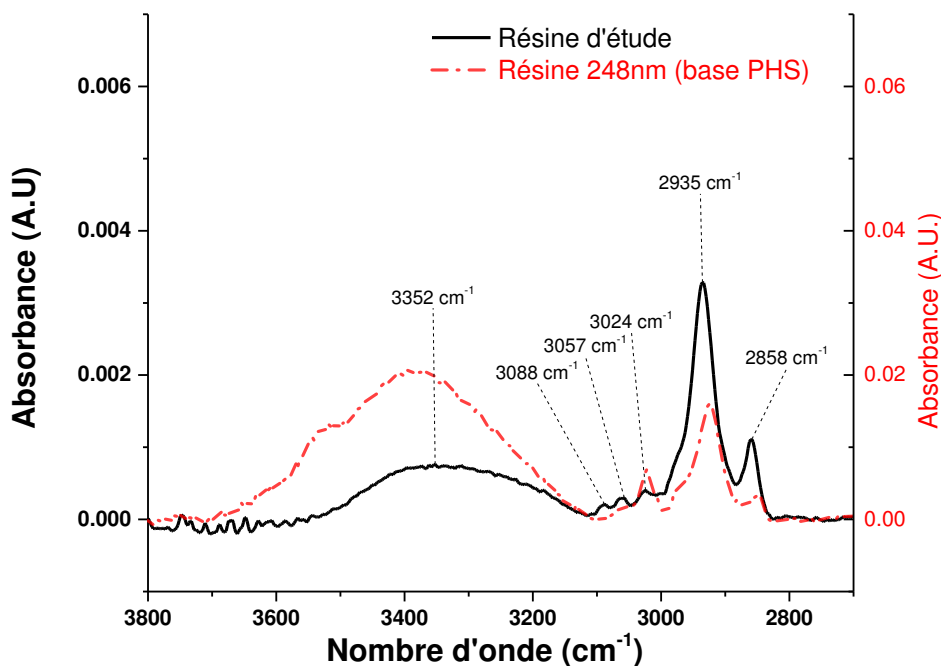


Fig. II.19 (a) Spectre IR en absorbance de la résine d'étude pour la gamme de nombre d'onde 3800cm^{-1} à 2700cm^{-1} comparé au spectre d'une résine de plateforme 248nm dont la structure est dérivée du PHS.

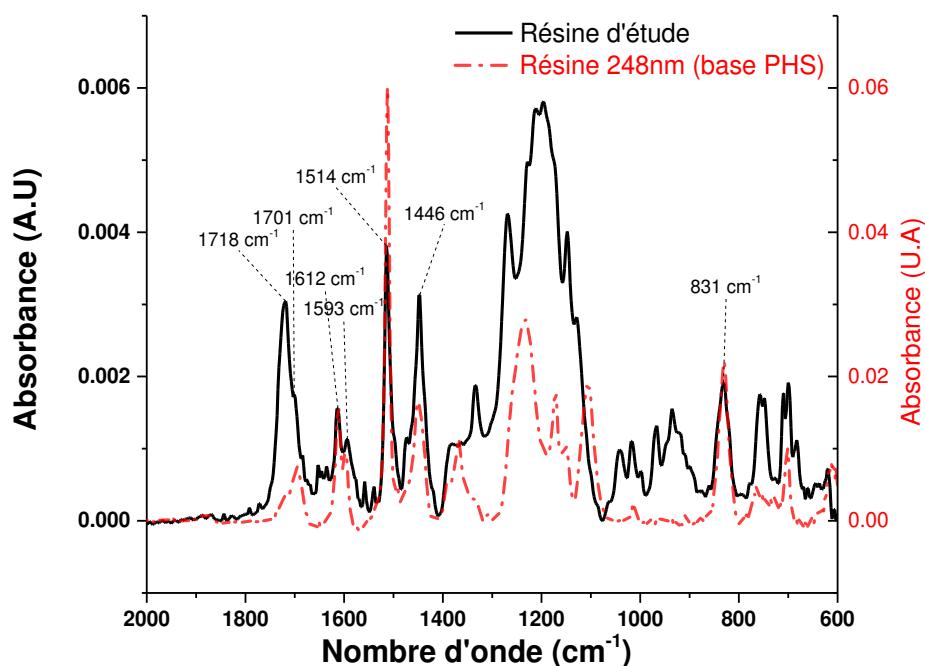


Fig. II.19 (b) Spectre IR en absorbance de la résine d'étude pour la gamme de nombre d'onde 2000cm⁻¹ à 600cm⁻¹ comparé au spectre d'une résine de plateforme 248nm dont la structure est dérivée du PHS.

La résine d'étude comme la résine type KrF possède des bandes caractéristiques de la présence de cycles aromatiques, notamment :

- Entre 3100-3000 cm⁻¹, on peut trouver 2 à 3 bandes caractéristiques de l'élongation de liaisons C-H aromatiques
- Entre 1625-1590 cm⁻¹, 1525-1470 cm⁻¹ et 1465-1430 cm⁻¹, on peut trouver 3 bandes d'intensité variable caractéristiques de l'élongation de doubles liaisons C=C aromatiques
- Entre 860-780 cm⁻¹, on peut trouver un pic intense caractéristique de la déformation hors plan de liaisons C-H aromatiques pour des cycles benzéniques 1-4-disubstitués^[II.22]

Pour ces deux résines la présence d'une large bande d'élongation entre 3800-3100 cm⁻¹ permet de prédire la présence de fonction hydroxyde O-H. On peut donc admettre que la résine d'étude possède parmi ses comonomères un parahydroxystyrène.

On peut également remarquer pour le spectre de la résine d'étude, que les bandes relatives à l'élongation des liaisons C-H d'hybridation sp³ (entre 3000-2800 cm⁻¹), les bandes relatives à l'élongation de liaisons carbonyles C=O de type ester (entre 1730-1715 cm⁻¹) et les bandes relatives à l'élongation des liaisons simples C-O (entre 1300-1100 cm⁻¹) ont une forte intensité en comparaison aux bandes relatives au parahydroxystyrène. Cela laisse à penser que la proportion de comonomère parahydroxystyrène est limitée et que les autres comonomères qui possèdent très certainement les fonctions esters sont prépondérants.

Il est probable que le fournisseur de la résine ait ajouté, à une formulation de résine type 193nm acrylique ayant de bonnes performances lithographiques, une « portion » de parahydroxystyrène utilisé avec les plateformes de résine plus anciennes type 248nm afin

d'augmenter sa résistance à la gravure plasma. En effet avec les nœuds technologiques qui diminuent, les épaisseurs de résine également et la résistance à la gravure devient critique.

On peut alors supposer que le polymère de notre résine a la structure approximative suivante (information confirmée par la suite par le producteur de la résine) :

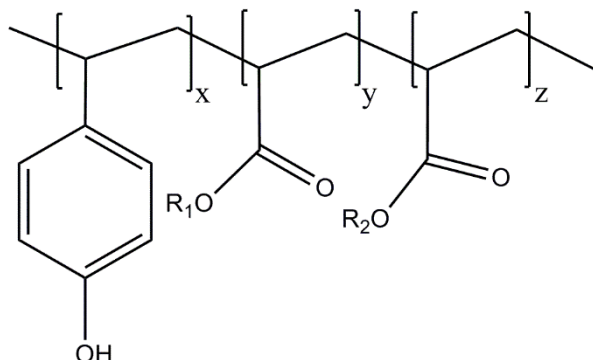


Fig. II.20 : Structure hypothétique de la résine d'étude où R₁ et R₂ sont des groupements alkyles destinés à l'ajustement des propriétés de solubilité du polymère dans son solvant et des propriétés lithographiques.

4.1.2. Spectroscopie Raman

La spectroscopie Raman consiste à envoyer une lumière monochromatique sur l'échantillon et à analyser la lumière diffusée. Cette technique de spectroscopie complémentaire à la spectroscopie infrarouge permet également l'identification de liaisons chimiques présentes dans un matériau. Certains modes vibrationnels des liaisons moléculaires sont actifs en spectroscopie Raman et inactifs en spectroscopie IR et inversement, ceci provient de considérations de symétrie [II.23]. Dans cette étude, les spectres Raman sont recueillis à l'aide d'un spectromètre Jobin- Yvon LabRam équipé d'un capteur CCD (Charged-Coupled Device). Un laser He/Ne dont la raie est située à 632.8 nm est utilisé.

4.2. Analyses thermiques

4.2.1. Analyse thermogravimétrique

L'analyse thermogravimétrique (ou ATG, TGA en anglais), est une technique d'analyse thermique, qui permet de mesurer la perte de masse d'un échantillon en fonction de la température sous un flux de gaz. Ce flux de gaz peut-être composé typiquement de diazote (N₂) où d'un mélange diazote-dioxygène (N₂/O₂) selon les besoins d'analyse. Cette technique permet de remonter à diverses informations selon le domaine d'application : le degré d'hydratation de sels, la température de dégradation de matériaux polymères, la tenue en température pour des isothermes données et dans notre cas à la température de déprotection thermique de notre résine de lithographie.

Pour analyser nos matériaux polymères il est nécessaire d'obtenir ceux-ci sous forme de poudre, pour obtenir la résine en poudre on gratte le film nanométrique de polymère déposé sur la plaque de silicium à l'aide d'un morceau de silicium coupé proprement selon les directions des plans cristallins.

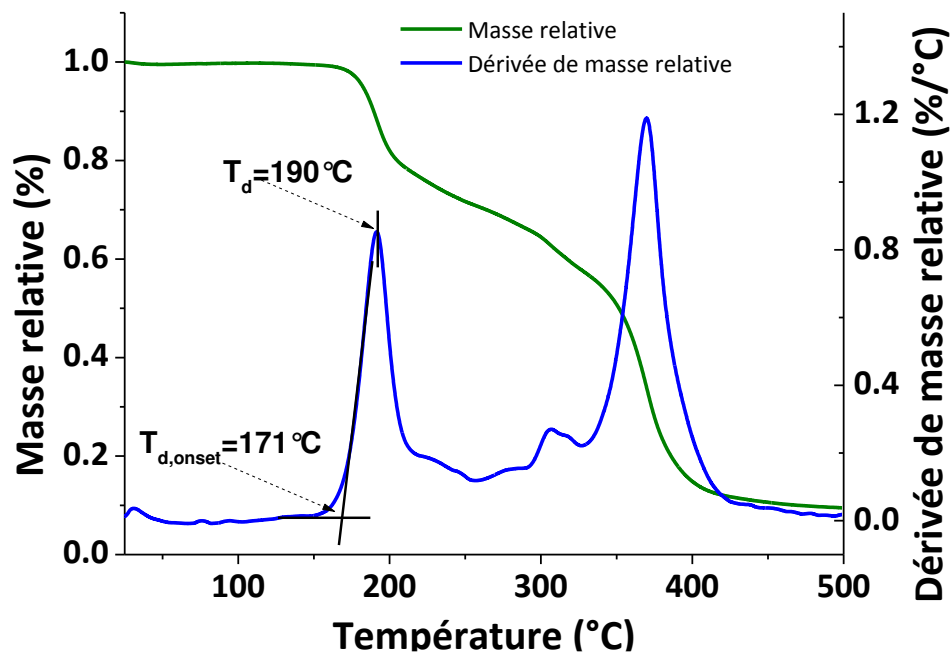


Fig. II.21 : Analyse thermogravimétrique (25 à 500°C, rampe 10°C/min) de notre résine d'étude. En vert l'évolution de masse relative en fonction de la température, en bleu la dérivée du signal précédent par rapport à la température.

Lorsque beaucoup d'espèce dégazent du matériau, la dérivée du signal de masse présente un pic. On donne en général soit la valeur de température au pic soit celle au démarrage du pic (on parle d'onset). Le premier pic à 190°C correspond à la déprotection thermique de la résine. Le second grand pic (vers 360°C) lui correspond au dégazage de la plupart des autres groupements de la résine. A 500°C il n'est pas étonnant de n'avoir qu'une petite fraction de la masse initiale pour un matériau polymère non développé pour la tenue à haute température.

On peut voir également que notre résine a une bonne tenue en température entre 25°C et « l'onset » de la déprotection thermique à 171°C, c'est-à-dire quasiment aucune perte de masse. A noter que cette analyse est réalisée sur le matériau en poudre, il est possible que le comportement en film fin soit différent.

C'est une analyse préalable à toute autre analyse thermique car elle permet de voir à quelle température notre matériau commence à se dégrader. On choisit, pour les analyses dans d'autres appareils d'analyses thermiques, une température maximale de fonctionnement inférieure à la température repérée comme étant la limite acceptable de perte de masse, afin d'éviter de polluer l'instrumentation.

4.2.2. Analyse calorimétrique différentielle

L'analyse calorimétrique différentielle (Differential Scanning Calorimetry en anglais ou DSC), permet de repérer différents événements thermiques associés au refroidissement ou à la chauffe d'un matériau. On peut récupérer grâce à cette technique des informations sur les températures et enthalpies de transformation de composés ainsi que les températures caractéristiques de transformation dans les matériaux polymères notamment la température de transition vitreuse (abrégiée en T_g).

Dans le cadre d'analyse de polymères, on peut remonter au taux de cristallinité des polymères semi-cristallins. Il est à noter que les résines de lithographie sont des polymères amorphes, l'existence de zones cristallines induirait des hétérogénéités de propriétés.

Cette technique a été utilisée dans ces travaux de thèse afin de trouver la température de transition vitreuse de nos matériaux polymères sous forme de poudre. Pour ce faire, on utilise le mode de DSC modulée en température de l'appareil (DSC Q200 de TA). Cette méthode permet de séparer les différents types d'évènements thermiques sur deux signaux, le flux dit réversible et le flux non-réversible. Une vitesse de chauffe élevée permet d'augmenter la sensibilité de la technique mais diminue la résolution et inversement. La T_g se situe au niveau du point d'inflexion de la courbe de flux réversible (fig. II.22).

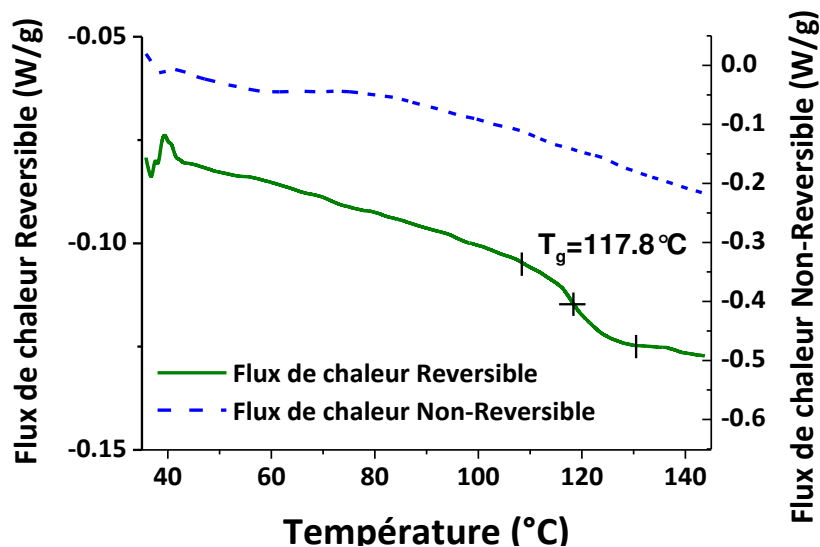


Fig. II.22: Exemple d'analyse calorimétrique différentielle de la résine d'étude sous forme de poudre, réalisée avec un balayage à $3^\circ\text{C}/\text{min}$ de 35°C à 150°C avec une modulation en température de $\pm 1^\circ\text{C}/\text{min}$.

La valeur de notre T_g de résine sous forme de poudre est contenue dans l'intervalle $115\text{-}118^\circ\text{C}$ (obtenue avec une vitesse de balayage de $3^\circ\text{C}/\text{min}$ et avec une modulation de température de $\pm 1^\circ\text{C}/\text{min}$).

4.2.3. Analyse mécanique dynamique

L'analyse mécanique dynamique (DMA) est également une méthode d'analyse de propriétés mécaniques de matériaux viscoélastiques. Elle permet de mesurer les modules d'Young (E) et de Coulomb (G), la viscosité complexe (η), le facteur d'amortissement appelé tangente delta ($\tan \delta$) et les température de transition des polymères (T_g et autres transitions secondaires). C'est une méthode plus sensible que la DSC. Lors d'une DMA l'échantillon est soumis pendant la mesure soit à une déformation oscillatoire soit à une contrainte.

Une méthode de mesure de T_g de film fin a été mise en place au sein du CEA-LETI, c'est une méthode non-conventionnelle d'analyse mécanique dynamique (DMA) qui consiste à placer un film fin de résine entre 2 morceaux de silicium plans (l'opération est réalisée par accolement d'un morceau de silicium vierge en face d'un morceau de silicium sur lequel 60nm résine avait été déposée). Le fonctionnement de la méthode est décrit dans les travaux de thèse de L. Azarnouche ^[II.36]. La rampe de température est de $3^\circ\text{C}/\text{min}$ et la gamme de température envisagée pour la mesure va de 25°C à 160°C .

Idéalement on aurait pu prendre 150°C comme température maximale pour l'analyse pour être sûr que la résine ne subisse pas une éventuelle déprotection thermique d'après la mesure d'ATG présentée dans en section 4.2.1 de chapitre, cependant l'utilisation de 150°C comme température maximale fournissait une mesure incomplète (pic de tangente delta pas totalement formé) et ne permettait pas l'obtention de la donnée d'intérêt. Un exemple de thermogramme DMA est présenté en figure II.23.

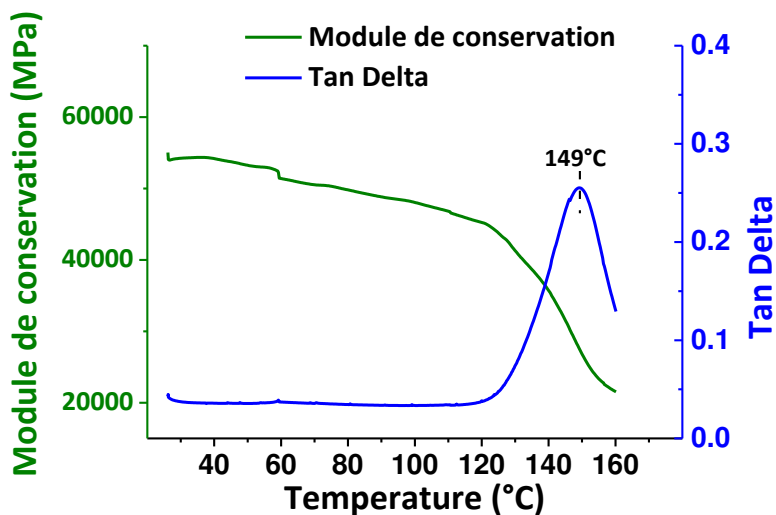


Fig II.23 : Exemple de thermogramme DMA obtenu avec la méthode développée au CEA-LETI. Ce thermogramme donne une température de $T_{g_{film}}$ de 149°C.

Au final, les mesures de DMA donnent une valeur moyenne de $T_{g_{film}}$ de $145^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ pour une rampe de $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Cette mesure particulière de DMA est sujette à discussion puisque la T_g de notre film de 60nm de résine pourrait éventuellement être influencée non pas par les interactions polymère-substrat avec un substrat (cas standard sur plaque) mais par 2 substrats lors de la mesure DMA. De plus, une fois analysé en DMA, l'échantillon (« sandwich » silicium-résine-silicium) est ensuite soudé et il est très difficile de dissocier les morceaux de silicium. Quand cela arrive, on peut trouver de la résine sur la face qui n'avait initialement pas de polymère déposé par centrifugation, suggérant que l'analyse ne consiste pas dans notre cas à une simple transformation réversible de transition vitreuse mais probablement de plusieurs phénomènes physicochimiques.

4.3. Ellipsométrie

L'ellipsométrie est une méthode couramment utilisée en microélectronique. Elle permet de réaliser une mesure indirecte d'indice optique et d'épaisseur dans le cas de films plans, à l'aide du changement de polarisation de la lumière après réflexion sur l'échantillon d'étude.

Plusieurs techniques de mesure de polarisation de la lumière après réflexion existent. Elles possèdent toutes, les éléments de base suivants : une source, un polariseur, un analyseur et un détecteur.

Pour ces travaux de thèse deux ellipsomètres ont été utilisés. Un premier, ALERIS de la société KLA Tencor, permettant d'avoir une précision de placement micrométrique sur une plaque de silicium de 200 ou 300mm, qui a servi à réaliser les courbes de contraste de lithographie électronique. Un second, UVEL de la société Jobin Yvon Horiba, a permis essentiellement la mesure d'épaisseur de

films de résine avant et après traitement plasma afin de normaliser à l'épaisseur l'absorbance des spectres infrarouge de résine.

5. Caractérisation dimensionnelle des motifs

L'obtention des profils, dimension critique et rugosité de ligne de ces travaux de thèse a reposée sur l'utilisation de microscopie électronique à balayage (MEB), en coupe (pour les profils) et avec un MEB de contrôle dimensionnel (CDSEM en anglais) qui est un MEB basse énergie et à faible courants qui produit des images en vue de dessus des structures. Même si la plupart des structures étudiées dans ces travaux de thèse sont réalisées dans des matériaux polymères (isolants électriques et sensibles aux électrons), l'imagerie par faisceau d'électrons bien que destructive reste un élément de choix.

5.1. Principe de la microscopie électronique à balayage (MEB)

Le fondement de la technique repose sur l'interaction électron matière que nous avons pu voir au chapitre I, partie 3. De façon similaire à la lithographie électronique, les instruments de microscopie électronique possèdent une source, une colonne et un porte-échantillon. L'imagerie se réalise essentiellement grâce des détecteurs d'électrons secondaires. L'émission d'électrons secondaires récupérés par les détecteurs se réalise dans les premiers nanomètres sous la surface de l'échantillon bombardé par la sonde électronique. Il existe bien d'autres détecteurs dans les microscopes actuels, qui permettent par exemple de réaliser une analyse élémentaire de l'échantillon.

5.2. Obtention des profils de motifs par vue en coupe

Pour réaliser des vues en coupe, on utilise un MEB avec un portoir spécifique qui permet de faire tourner l'échantillon, localisé au bout d'une canne introduite dans la chambre du microscope.

Le MEB utilisé est un S5500 de la société Hitachi. Le S5500 en mode coupe permet de monter des échantillons de 2mm de profondeur par 6mm de largeur sur la canne, l'épaisseur est ajustée à l'aide de cales métalliques fabriquées dans un matériau qui ne présente pas de propriétés magnétiques afin de ne pas influencer la formation du faisceau d'imagerie.

Le S5500 permet de travailler avec différentes conditions de tension d'accélération allant de 1kV à 30kV, les résolutions atteignables sont respectivement de 1.4nm et 0.3nm. Il permet également d'utiliser des détecteurs d'électrons rétrodiffusés notés LA-BSE et HA-BSE (pour Low Angle Backscattered Electrons et High Angle Backscattered Electrons). Ces détecteurs permettent de réaliser une imagerie par contraste atomique, en effet les atomes de numéros atomiques élevés sont enclins à générer plus d'électrons rétrodiffusés sous bombardement électronique. Le S5500 permet de plus de combiner avec un ratio défini par l'utilisateur, le détecteur d'électron secondaires (SE) et le détecteur LA-BSE (fig. II.24).

Afin de limiter les effets de charge lors de l'observation, les échantillons subissent préalablement un dépôt de particules de platine par pulvérisation (on parle alors de métallisation des échantillons). La taille des grains de platine est d'environ 5 nanomètres. Pour limiter l'impact du

faisceau sur les motifs mais dans le souci de garder des capacités de résolution, la tension d'observation a été choisie à 5kV après quelques tests (Fig. II.24).

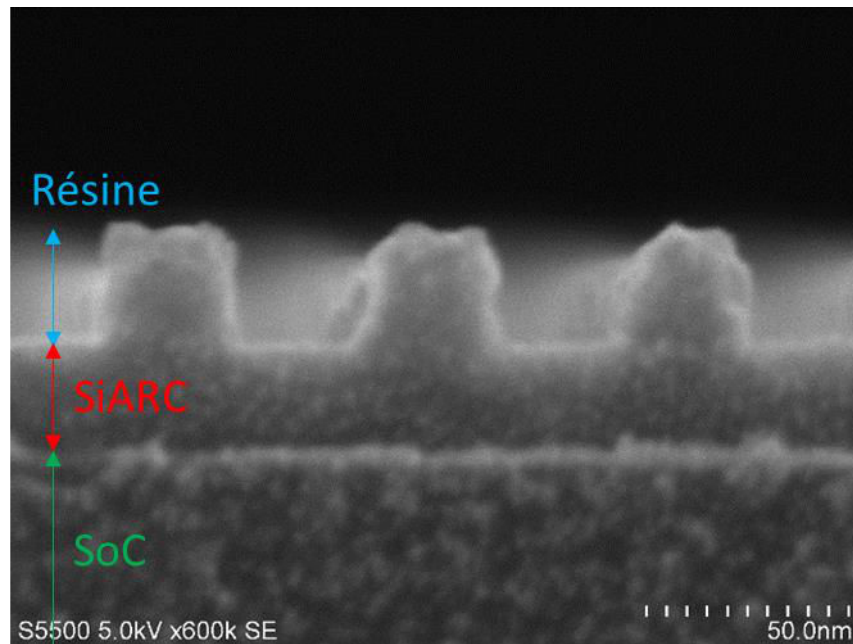


Fig. II.24 : Image en coupe de motifs de L/S 32nmhp lithographiés avec le Vistec SB3054DW (résine déposée sur SiARC/SoC).

5.3. Obtention des grandeurs caractéristiques du procédé de lithographie par CDSEM

5.3.1. Equipement

L'équipement utilisé au cours des travaux de thèse est un CG4000 de la société Hitachi, il repose uniquement sur la formation d'image à l'aide d'électrons secondaires et a la capacité d'inspecter en vue de dessus des plaques de 200 et 300mm. Il fonctionne en général à basse tension (entre 300V et 500V) et à faibles courants (6pA à 10pA) et permet la formation d'un faisceau de taille proche du nanomètre et d'avoir une mesure avec une résolution proche de cette valeur.

Il permet de se positionner avec une précision de l'ordre du micron partout sur la plaque observée avec la seule utilisation du déplacement mécanique. Il est nécessaire de réaliser un point de reconnaissance à moins de 10 μm du motif d'intérêt, afin de se déplacer uniquement avec de la déflection du faisceau et se positionner à seulement quelques nanomètres de la zone d'intérêt.

L'intérêt d'un tel outil, très usité en microélectronique, est que l'on peut réaliser des séries de clichés/mesures sur une plaque entière 300 mm sans la cliver, en ayant établi au préalable les coordonnées et conditions d'acquisition. On peut réaliser plusieurs centaines de clichés en une heure, ce qui permet de conforter les besoins de l'industrie c'est-à-dire faire de la statistique des mesures.

5.3.2. Grandeurs caractéristiques

Cette courte section présente quelques une des grandeurs caractéristiques du procédé de lithographie.

La dimension critique (CD) :

Le CD est la mesure du dimensionnel d'intérêt, on peut par exemple dans le cas d'un motif L/S mesurer la largeur d'une ligne ou de l'espace. En lithographie électronique il est plutôt coutume de mesurer le CD d'espace que l'on exprime en nanomètres, néanmoins puisque les travaux de cette thèse sont axés sur l'amélioration de la rugosité de ligne, on mesure alors le CD de ligne dans toutes les mesures présentées.

La rugosité de ligne (LWR) :

La rugosité de ligne est bien évidemment une donnée d'importance du procédé de lithographie et a été présentée au chapitre I section 2.2. Le détail sur la particularité de sa mesure sera présenté dans la section 5.3.5 de ce chapitre.

L'uniformité de la dimension critique (CDU) :

L'uniformité de la dimension critique souvent mesurée à l'échelle d'une plaque entière de motifs consiste en l'écart-type donné à (1σ ou 3σ) du CD à l'échelle de la plaque, c'est l'écart-type de la population des CD moyens par puce à une dose donnée (contrairement au LWR qui représente l'écart-type à 3σ des différentes mesures de CD sur une ligne).

Les deux grandeurs LWR et CDU sont reliées par la relation entre les écart-types dans le cas d'une ligne de longueur infinie ^[II.35].

$$\sigma_{infCD}^2 = \sigma_{LWR}^2 + \sigma_{CDU}^2 \quad (\text{eq. II.3})$$

où σ_{infCD} est l'écart-type des CD pour une ligne infinie, σ_{LWR} l'écart-type du LWR et σ_{CDU} l'écart-type du CDU.

Le CDU est une grandeur non mesurée dans ces travaux de thèse. Il est à noter cependant que le CDU permet de se rendre compte d'éventuelles influences d'autres étapes du procédé lithographique sur l'uniformité des performances. Par exemple liée au procédé de développement. Un CDU mal contrôlé implique une variabilité puce à puce, alors que le LWR mal contrôlé implique plutôt une variabilité transistor à transistor.

La latitude en énergie (EL) :

On mesure également la latitude en énergie (energy latitude ou exposure latitude), exprimée en %. Cette dernière exprime la variation relative de dose possible par rapport à la dose nominale pour réaliser les structures à la dimension critique visée à plus ou moins la marge d'erreur définie. En général, d'un point de vue du procédé on accorde des variations de l'ordre de $\pm 10\%$ de dimension critique.

La formule habituellement utilisée pour le calcul de l'EL est donnée ci-après :

$$EL (\%) = \frac{|Dose_{CD+10\%} - Dose_{CD-10\%}|}{Dose\text{-to-size}} * 100 \quad (\text{eq II.4})$$

où Dose-to-size est la dose nominale pour obtenir le CD désiré.

Plus l'EL est importante plus la réalisation des structures à la dimension visée sera aisée et faiblement impactée par d'éventuelles variations de procédé.

5.3.3. Les conditions d'acquisition

Il a fallu au début des travaux de thèse, considérer quel serait le jeu de paramètres d'acquisition qui permettrait de réaliser les images. Les conditions les moins agressives sont en général recommandées pour peu impacter la résine (phénomène dit de « shrinkage » ^{[II.24], [II.25]} particulièrement prononcé pour les résines positives). Mais il faut trouver un compromis entre l'impact sur la résine et un bon contraste d'image afin que les algorithmes de mesure fonctionnent correctement.

L'acquisition d'une image dépend de plusieurs paramètres tels que :

- La tension d'accélération (300V, 500V ou 800V)
- Le nombre de pixel par image (512*512, 1024*1024 ou 2048*2048)
- Le nombre d'intégrations (frame number)
- Type de scan (carré ou rectangulaire, grossissements respectivement identiques ou différents selon les axes)
- Grossissement de l'image

Une tension d'accélération plus importante permet d'avoir une sonde électronique plus petite et donc une meilleure résolution, mais dégrade plus la résine. Le nombre de pixels de l'image impacte également l'acquisition, en effet les dimensions en X et Y du champ d'observation sont alors divisées par le nombre de pixels de l'image en X et Y respectivement. La grille ainsi définie est la grille par-dessus laquelle le faisceau va balayer la structure pour réaliser l'acquisition. Par conséquent un fort nombre de pixel d'image déposera plus d'électrons dans le matériau à imager. Un grand nombre d'intégrations impliquera un meilleur rapport signal/bruit mais impactera la résine et donc la mesure.

On a choisi de réaliser les images avec un scan rectangulaire de grossissement 300000 en X et 49000 en Y (correspondant respectivement à un champ d'observation de 450nm et 2755nm) avec 1024*1024 pixels. Deux raisons simples permettent de justifier ces choix de grossissements. Selon l'axe X on a choisi le grossissement maximum en effet la résolution a besoin d'être la meilleure possible afin d'obtenir des mesures de CD précises. Et selon l'axe Y, il a été démontré ^[II.26] que la valeur de la rugosité était dépendante de la longueur de ligne inspectée. Si l'on inspecte au moins 2 μ m de cette ligne, la rugosité mesurée est alors représentative de l'échantillon. L'image comprenant 1024*1024 pixels, on obtient avec le grossissement retenu un pixel de taille 0.43 nm en X et 2.69nm en Y.

Pour la détermination des conditions de travail de cette thèse, nous avons étudié l'effet de la tension et du nombre d'intégrations afin de trouver un compromis entre qualité d'image et dégradation de la résine. La condition d'acquisition avec une tension d'accélération de 300V bien que la moins agressive conduit à des images présentant un contraste si faible que le logiciel de traitement d'images (Terminal PC) n'était pas capable de détecter les bords de lignes. Cette condition n'a donc pas été retenue. Des problèmes similaires ont été rencontrés avec la condition de 500V et 8 intégrations. Le résumé des effets des conditions d'acquisition (tension d'accélération et intégration frame) sur la dimension critique de la ligne de résine est montré en figure II.25 en fonction de la dose d'exposition.

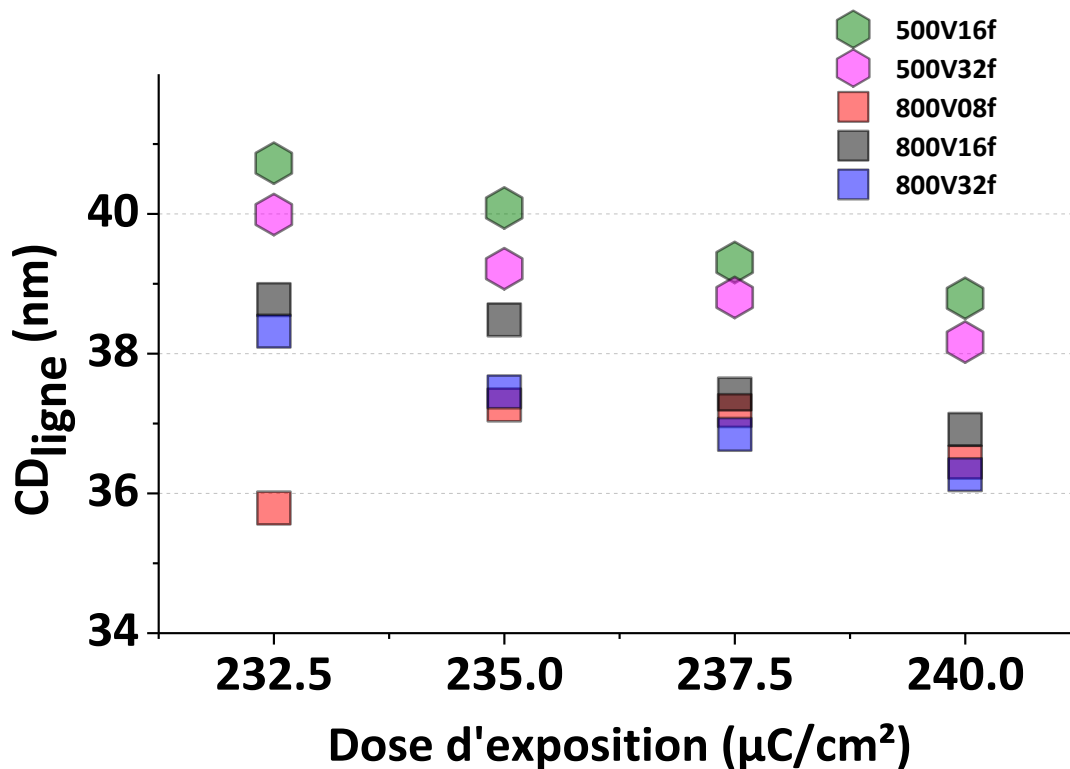


Fig. II.25 : Effet des paramètres d'acquisition d'image sur la dimension critique des lignes de résine pour des motifs de L/S 35nmhp réalisés à 4 doses avec le Vistec SB3054DW. Les mesures ont été moyennées sur plus de 100 occurrences par cas.

Comme attendu, plus la tension d'accélération est élevée et plus le nombre d'intégrations est important, plus le CD de ligne diminue et ce quel que soit la dose d'exposition initiale qui a permis la réalisation des motifs. On pourra également noter que l'impact du faisceau sur la résine résulte en la formation d'une couche superficielle inerte sur les 20 à 40 premiers nanomètres de la résine [II.24]. Ces résultats sont très probablement dépendants de la formulation de la résine et de la géométrie de la ligne (volume et forme), néanmoins on peut voir que les conditions les moins agressives pour réaliser la mesure de CD de notre ligne de résine sont 500V et 16 frames.

Pour la suite des résultats sauf précision, les images réalisées à l'aide du CDSEM auront toujours les conditions d'acquisition suivantes 500 V, 16 frames, 1024*1024 pixels, grossissement 300000 en X par 49000 en Y (correspondant à une zone d'observation de 450nm par 2.755 μm).

5.3.4. Traitement des images CD-SEM

Une fois les images acquises, elles sont traitées en dehors de salle blanche avec un logiciel disponible au laboratoire Terminal PC Measurement Software version 6 de la société Hitachi. Ce logiciel utilise un algorithme de contraste d'image pour localiser les bords de ligne et ainsi mesurer un CD. On utilise en général une méthode de mesure à seuil et on choisit de mesurer à 80 % de l'intensité maximale pour évaluer les CD (fig. II.26).

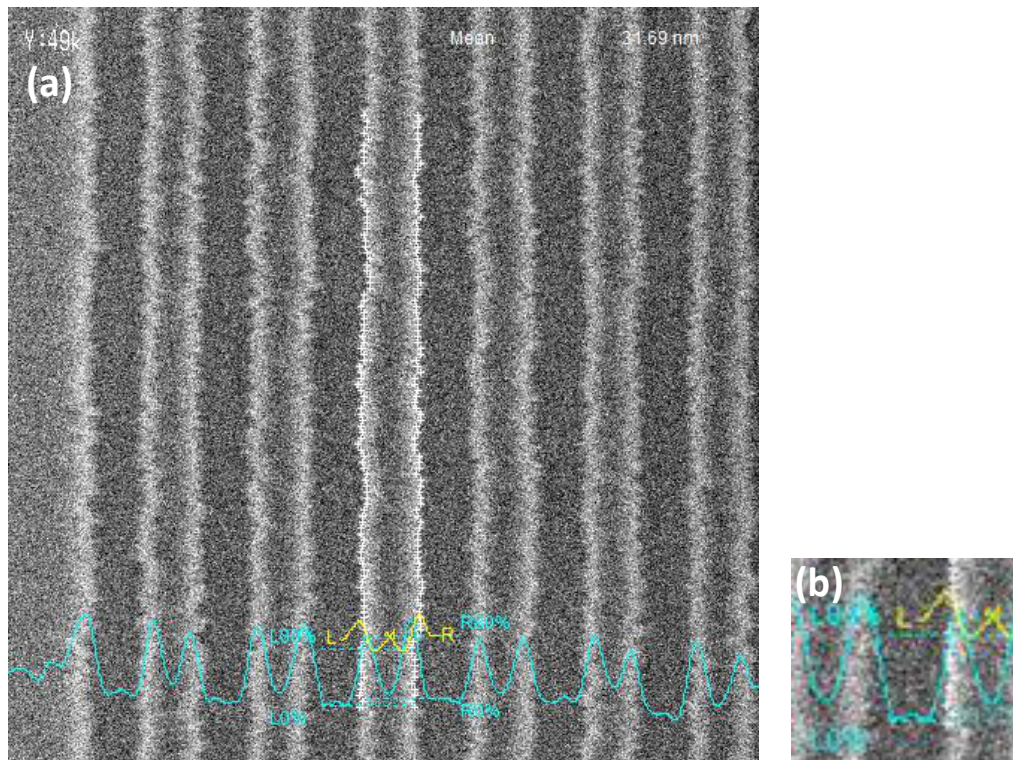


Fig. II.26 : (a) Distribution des points de mesure (croix blanches) sur les bords de la ligne pour un niveau de seuil de 80% du maximum du signal (courbe bleue continue). (b) Pour le bord gauche de la ligne mesurée, on peut voir sur le signal deux annotations L0% et L80% à côté de lignes pointillées correspondant respectivement au minimum local de signal « extérieur » et la valeur à 80% du maximum de ce pic de signal.

Pour réaliser la mesure, on définit une boîte de mesure ayant les paramètres suivants :

- La hauteur de la boîte en pixels (ou **Inspect Area, IA**) cette dernière doit être maximisée afin d'échantillonner une bonne longueur de la ligne (pour une image de 1024*1024 pixels on peut le régler jusqu'à 846 pixels, ce qui correspond à une longueur maximale de 2.27 μ m).
- Le **nombre de points de mesure** dans cette boîte, noté N de valeur maximum 400 du logiciel.
- Le **Sum Line, noté S**, qui correspond au nombre de pixel en y selon lesquels l'information est moyennée. Il permet d'améliorer le rapport signal sur bruit de la mesure, cependant plus cette valeur est importante moins on aura d'information à courte distance.
- Le smoothing, qui correspond au nombre de pixels en x selon lesquels l'information est moyennée. Il permet d'améliorer le rapport signal sur bruit de la mesure.

Ces trois paramètres sont représentés sur la figure II.27 et doivent respecter la relation ci-après pour que l'échantillonnage soit correctement réalisé:

$$IA = N * S \quad (\text{eq II.5})$$

Si le produit N par S est inférieur à IA, on parle de sous-échantillonnage. S'il est supérieur on parle alors de sur-échantillonnage.

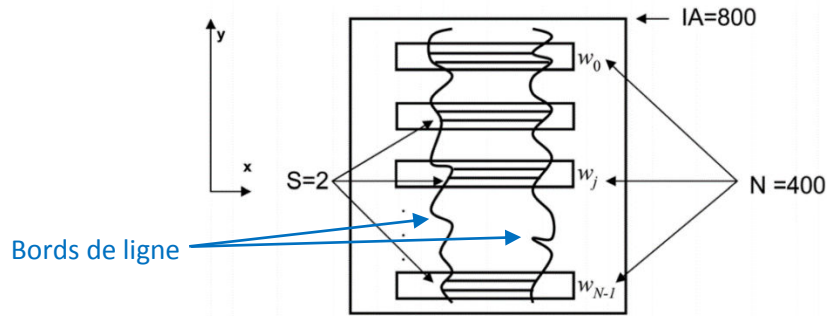


Fig II.27 : Représentation de l'échantillonnage réalisé dans une boîte de mesure pour la mesure de rugosité de ligne (IA=800, N=400 et S=2)

Pour les mesures de dimensions critiques et de rugosité de ces travaux de thèse, les réglages du quadruplet IA, N, S et Smoothing sont respectivement de (800, 100, 8, 25) et (800, 400, 2, 25).

5.3.5. Protocole de mesure de rugosité de ligne

De manière générale, tout équipement de mesure donne une valeur qui contient une composante de bruit. La variance de la mesure donnée par l'équipement et sa relation avec la variance de la mesure vraie et la variance de la composante de bruit est donnée par l'équation II.6.

$$\sigma_{mesurée}^2 = \sigma_{vraie}^2 + \sigma_{bruit}^2 \quad (\text{eq. II.6})$$

Et dans notre cas, puisque l'on veut caractériser avec précision notre rugosité il faut alors pouvoir retirer la composante due au bruit de notre valeur mesurée. On pourrait envisager d'augmenter le nombre d'intégrations pour augmenter le rapport signal sur bruit de la mesure de rugosité mais cette opération impacterait trop nos lignes de résine, comme nous avons pu le voir dans la partie V.3.2. Le protocole de mesure qui a été développé au sein du CNRS LTM par Laurent Azarnouche^{[II.21], [II.32]} permet de retirer la composante de bruit des valeurs de rugosité tout en réalisant la mesure dans des conditions qui impactent peu la résine.

Ce protocole repose sur l'ajustement analytique des densités spectrales de puissance (PSD) de la dimension critique (CD). Plus précisément, cette méthode consiste à calculer une PSD expérimentale, qui est égale au carré de la transformée de Fourier des CD mesurés le long d'une ligne sur une image CDSEM, puis d'ajuster la courbe expérimentale avec une fonction analytique.

Pour obtenir une PSD expérimentale lisse et exploitable pour l'ajustement, 50-100 mesures de ligne sont nécessaires. Pour chaque image, une PSD est calculée et la PSD expérimentale finale est la moyenne des 50-100 PSD. L'intégrale de la courbe PSD obtenue est égale à σ^2 (la rugosité de ligne est définie comme : $LWR = 3\sigma$).

De manière générale, les PSD sont la représentation de la puissance d'un signal selon les fréquences mesurées. Dans le cas de la rugosité de ligne cela se matérialise en des déformations de grande période spatiale (basses fréquences) et des déformations de plus petite période spatiale (hautes fréquences).

Les limites fréquentielles observées dans le cas de l'utilisation des PSD pour le LWR/LER sont donc dépendantes de l'extension spatiale de la mesure (valeur IA de Terminal PC associée à la taille de pixel de l'image CDSEM) et du pas d'échantillonnage (correspondant à la valeur S de Terminal PC). Afin d'échantillonner sans perdre d'information dans les hautes fréquences, on choisit le paramètre S égal

à 2. Avec un maximum de points de mesure N par boîte c'est-à-dire 400, l'Inspect Area devient alors 800 selon l'équation II.5. Pour le paramètre Smoothing, il a été montré [II.27 - 32] qu'on pouvait le définir à 25 pour diminuer le niveau de bruit de la mesure sans que cela ait trop d'impact sur la valeur de rugosité mesurée.

Ainsi on mesure la rugosité sur $2.152\mu\text{m}$ de la ligne des motifs réalisés avec une mesure tous les 5.38 nm . Un tel échantillonnage moyenné sur au moins une cinquantaine de boîtes de mesure permet de réaliser la PSD expérimentale moyenne de rugosité comme présenté dans la figure II.28.

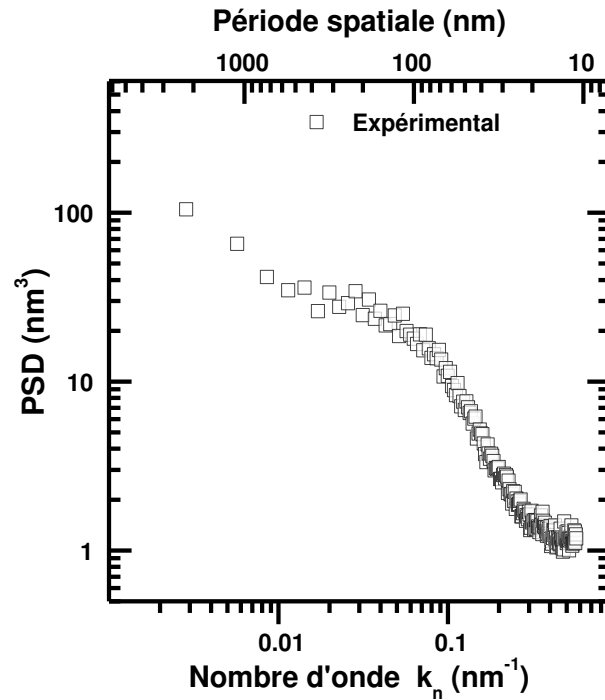


Fig. II.28 : PSD expérimentale discrète de LWR de résine réalisée avec des expositions Vistec SB3054DW

Une fois calculée, la PSD expérimentale est ajustée de façon analytique avec le modèle proposé par Azarnouche *et al.* [II.33]. La courbe de PSD est composée des points que l'on notera P_n , chacun des P_n est calculable par la relation :

$$P_n = \frac{\Delta y}{2\pi N} \left[\sum_{m=0}^{N-1} 2R_m \cos(k_n m \Delta y) (N - m) \right] \quad (\text{eq. II.7})$$

où N est notre nombre de mesures réalisées dans une boîte (400 dans notre cas), Δy est l'intervalle de mesure tel que $\Delta y = \frac{L}{N}$ (où L est la longueur de ligne inspectée, soit Δy égal 2 fois la taille d'un pixel de l'image), k_n est le nombre d'onde ($k_n = \frac{2\pi}{L} * n$, avec $n = (0, 1, \dots, N-1)$), finalement le terme R_m correspond à la fonction d'autocorrélation (ACF) décrite ci-après. De nombreux modèles d'ACF existent mais celle proposée par Azarnouche, sous forme de fonction fractale auto-affine, est plus généraliste et permet de mieux décrire la rugosité de ligne.

$$R_m = \sigma_{réel,1}^2 e^{-\left| \frac{m\Delta y}{\xi_1} \right|^{2\alpha_1}} + \sigma_{réel,2}^2 e^{-\left| \frac{m\Delta y}{\xi_2} \right|^{2\alpha_2}} + \sigma_{bruit}^2 \delta_m \quad (\text{eq. II.8})$$

La fonction d'autocorrélation R_m se compose de 3 termes, les 2 premiers sont liés à la variance réelle de rugosité et le dernier à la variance du bruit de mesure. Généralement, les PSD sont décrites avec un seul terme lié à la variance réelle de rugosité, mais le modèle à 1 terme ne permet pas de réaliser un ajustement analytique assez précis dans notre cas (cf. figure II.29 courbe d'ajustement 1 en rouge).

Pour ces travaux de thèse, il a été préférable d'utiliser un ajustement analytique avec un modèle à 2 termes (l'ajustement à 2 termes résulte de la somme des courbes rouge et bleue et est représenté en noir sur la figure II.29).

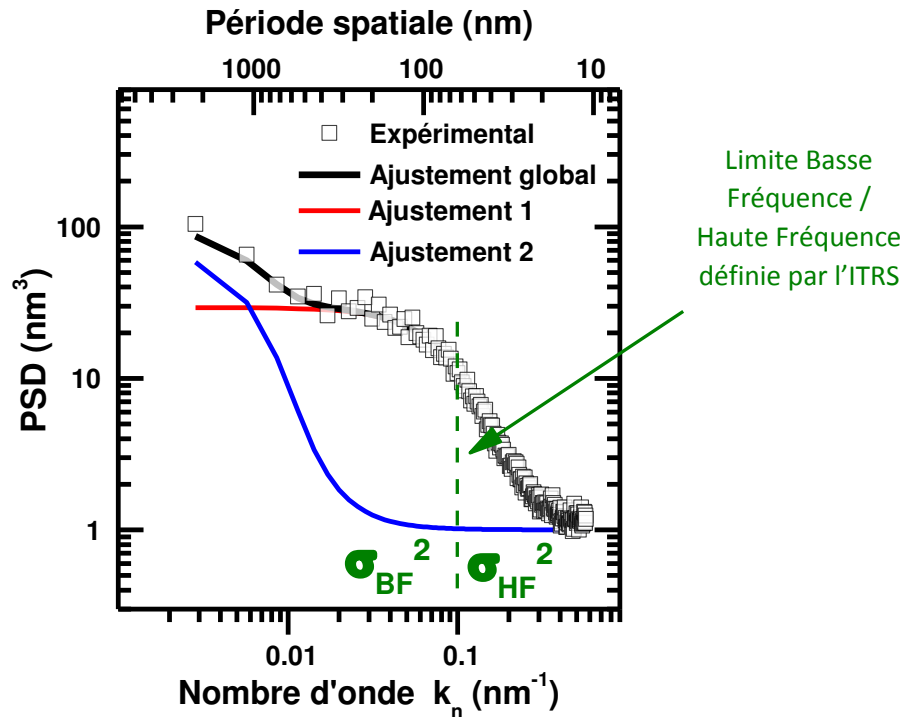


Fig. II.29 : PSD expérimentale discrète de LWR de résine réalisée avec des expositions Vistec SB3054DW et son ajustement analytique et les 2 composantes de l'ajustement. La ligne discontinue verte représente la limite Haute Fréquence – Basse Fréquence de rugosité (comme définie par l'ITRS comme étant la longueur de grille visée, c'est-à-dire la largeur de ligne pour un motif L/S dense [III.34])

Dans l'ACF on peut trouver les paramètres σ (amplitude de rugosité), α (l'exposant fractal de rugosité), et ξ (la longueur de corrélation). ξ représente la longueur à partir de laquelle on peut considérer que les points du bord de la ligne sont indépendants et α donne une indication sur le caractère plutôt lisse ou plutôt accidenté du bord de la ligne (α appartient à l'intervalle [0,1] et pour un α faible on a un aspect plutôt irrégulier du bord).

L'ajustement analytique détermine le niveau de bruit, ce bruit considéré blanc est alors soustrait aux points P_n de la PSD expérimentale et l'on calcule l'aire sous la PSD expérimentale non-bruïtée. Aire qui correspond à la variance de LWR. Après ajustement on obtient donc la valeur de LWR non-biaisée par le bruit de mesure et les coefficients (α_1 , α_2 , ξ_1 , ξ_2).

Dans la suite du manuscrit on utilisera la formule suivante qui lie la variance de LWR sur toute la gamme fréquentielle d'étude et les variances de ses composantes fréquentielles (la limite basses/hautes fréquences choisie est celle spécifiée par l'ITRS) :

$$\sigma_{LWR}^2 = \sigma_{BF}^2 + \sigma_{HF}^2 \quad (\text{eq II.9})$$

Pour plus d'informations sur l'aspect calculatoire permettant de réaliser cet ajustement le lecteur pourra se reporter aux travaux de thèse de Laurent Azarnouche ^{[II.21], [II.33]}.

Pour des soucis de représentation, toutes les PSD, expérimentales ou leurs ajustements analytiques, sont translatés vers le haut de 1 nm^3 sur les graphiques (ce qui correspond à un bruit blanc de 1). En effet, l'utilisation de l'échelle logarithmique ne permet pas de manipuler des valeurs négatives et déformerait les courbes dans la zone des hautes fréquences.

5.3.6. Adaptation du protocole de mesure aux lignes de résine réalisées avec le Vistec SB3054DW

Nous avons pu mentionner l'effet des zones de raccord avec les Vistec SB3054DW sur le LWR dans la partie 1.2.1. En voici le détail. La collection des images se réalise de manière aléatoire par rapport aux zones où ces défauts apparaissent (tous les $1.25 \mu\text{m}$). Selon les images, on a donc une à deux de ces zones qui sont mesurées à l'aide de boîtes de mesure d'Inspect Area de 800 pixels. Nous avons pu remarquer cependant que les zones de raccord de shots avaient une amplitude variée. Il a donc été important de quantifier quelle pouvait être l'influence de ces zones dans la valeur de LWR mesurée.

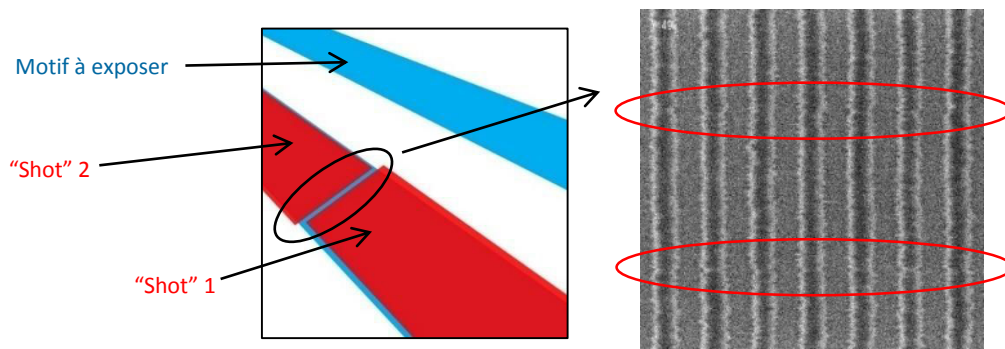


Fig. II.30 : (a) Représentation schématique des erreurs présentes au niveau des zones de raccord.
(b) Image CDSEM présentant ces défauts.

Afin de voir l'influence de la taille de la boîte et son positionnement par rapport aux défauts de la lithographie, on a réalisé des mesures LWR selon trois cas distincts (fig. II.31):

- Inspect Area 800 pixels ($2.152 \mu\text{m}$ de long) boîtes posées aléatoirement sur les lignes
- Inspect Area 400 pixels ($1.076 \mu\text{m}$ de long), boîtes posées aléatoirement sur les lignes
- Inspect Area 400 pixels ($1.076 \mu\text{m}$ de long), boîtes posées avec soin afin de ne pas mordre sur les zones de raccord

D'après la figure II.31, on peut voir que pour des boîtes positionnées aléatoirement (courbes bleue et verte) les points expérimentaux sont quasiment situés aux mêmes endroits, seul le dernier point dans les basses fréquences de la courbe bleu n'a pas de correspondant dans la courbe verte, ce qui est tout à fait cohérent. Ce point correspond à la plage spatiale non exploitée avec des boîtes de 400 pixels de haut. S'il on ne tient pas compte des zones de raccord (courbe noire) on peut voir que le signal est fortement diminué dans le domaine des basses fréquences. La comparaison du protocole standard et le cas où les boîtes de mesure sont réduites et soigneusement placées est montrée en figure II.32, on y fait figurer également les valeurs de rugosité de ligne calculée sur une même gamme spectrale (de 10.8 nm à $1.076 \mu\text{m}$).

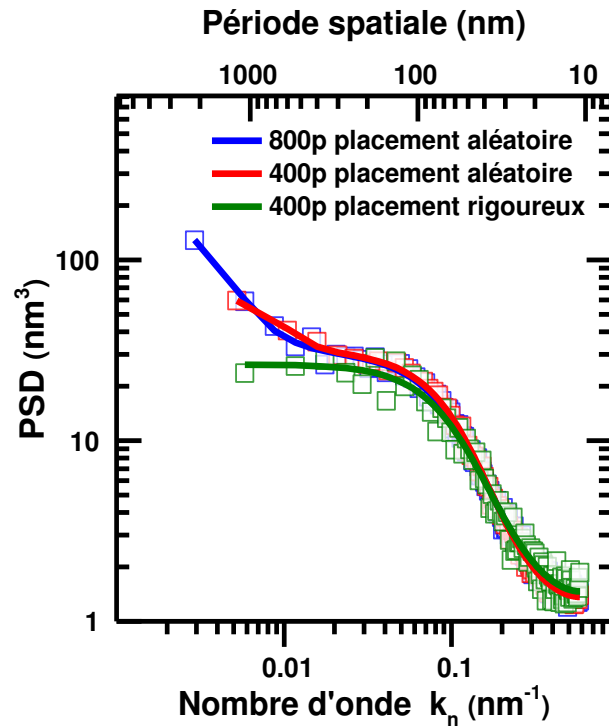


Fig. II.31 : Evolution des PSD de LWR avec la taille et le positionnement des boîtes de mesures de LWR par rapport aux défauts de raccords de shots.

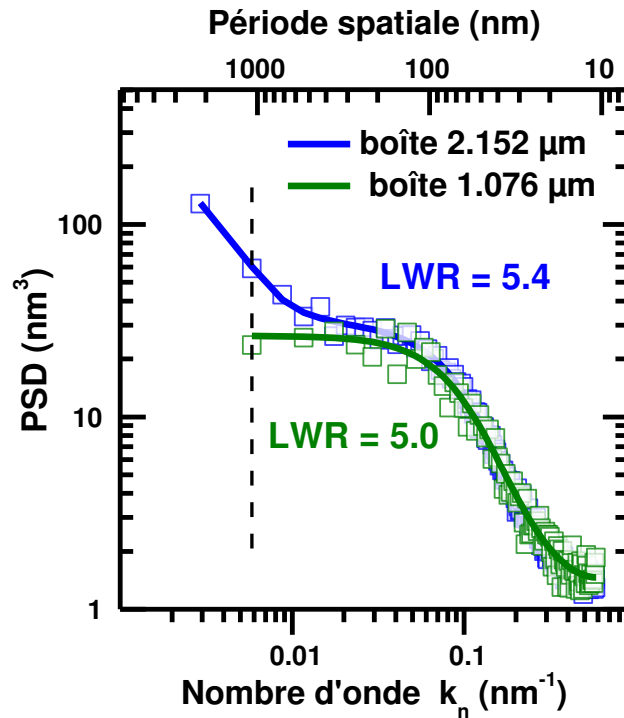


Fig. II.32 : Comparaison des valeurs de LWR et PSD dans les deux cas (800p placement aléatoire et 400p placement rigoureux), l'intégration de la valeur de LWR a été réalisée sur le domaine spectral allant de la plus petite période mesurée 10.8nm à 1.076 μm (délimité par la ligne hachurée noire).

On s'aperçoit alors que la contribution de ces défauts est d'environ 10% de la valeur initiale de LWR. Concernant la déformation induite par ces zones de raccord. On pourrait s'attendre à la présence d'un pic présent à $1.25\mu\text{m}$ de période spatiale sur la PSD de LWR puisque les défauts apparaissent tous les $1.25\mu\text{m}$. Ce n'est cependant pas le cas car la réalisation des images CDSEM n'est pas suffisamment précise en positionnement pour que ces défauts apparaissent aux mêmes pixels d'une image à une autre.

On s'est aperçu que ce phénomène variant d'une acquisition à une autre pouvait masquer les bienfaits des traitements de lissage de rugosité dans certains cas que nous verrons dans le chapitre IV. **Dans les cas où la mesure de LWR n'a été réalisée qu'avec des boîtes de mesures de $1.076\mu\text{m}$ de long, le manuscrit le précisera. Dans le cas contraire, ce sont toujours des boîtes de 800 pixels soit $2.152\mu\text{m}$ qui ont été utilisées.**

Cette influence des zones de raccord sur le LWR est intrinsèque à la méthode d'exposition et n'est pas récupérable par des traitements après-lithographie étant donné l'amplitude de ces déformations. De manière générale, en lithographie il faut garder à l'esprit que la rugosité finale dépend de l'interaction directe du faisceau avec le matériau de résine et d'une composante liée à l'équipement (erreur de positionnement du faisceau, vibrations, etc...). L'utilisation d'équipement de lithographie électronique dont la taille du shot d'exposition est équivalente à la grille selon laquelle les données ont été fracturées, rend cette composante d'autant plus importante. La grande flexibilité de la lithographie électronique permet de procéder à des expositions multiples pour limiter ces composantes liées aux équipements en une seule étape de lithographie. Les expositions multiples étant très chronophages, demandant un développement particulier et non réalisables sur l'équipement Mapper Asterix (bien que moins sensible à ce genre de défauts puisque de type gaussien), il a été décidé de ne pas réaliser ce genre d'expositions multiples avec le Vistec SB3054DW mais plutôt de mesurer sur une gamme spectrale réduite.

5.3.7. Soucis de répétabilité de LWR au cours des travaux de thèse

Au fur et à mesure que les travaux se sont poursuivis, on a pu remarquer une forte augmentation des valeurs de référence de LWR obtenues avec les deux outils d'exposition (figures II.33 et II.34). Pour chacun des cas présentés ci-après, les lithographies ont été réalisées avec l'empilement de matériaux résine(37nm)/SiARC(30nm)/SoC(95nm)/Silicium et le même développement a été utilisé.

Avec le Vistec SB3054 :

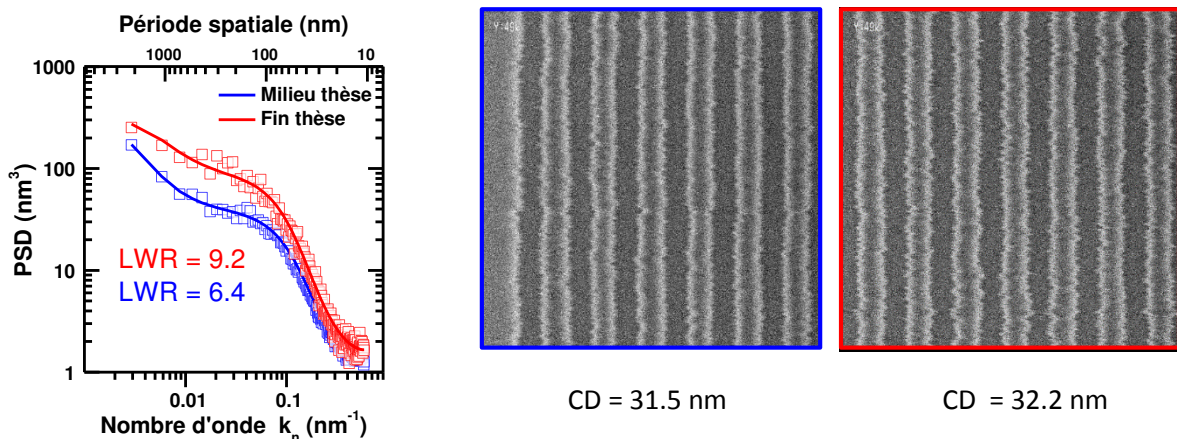


Fig. II.33 : Comparaison des valeurs de LWR et PSD au milieu et vers la fin des travaux de thèse avec l'outil Vistec SB3054 et images CDSEM associées

Pour des expositions Mapper Asterix :

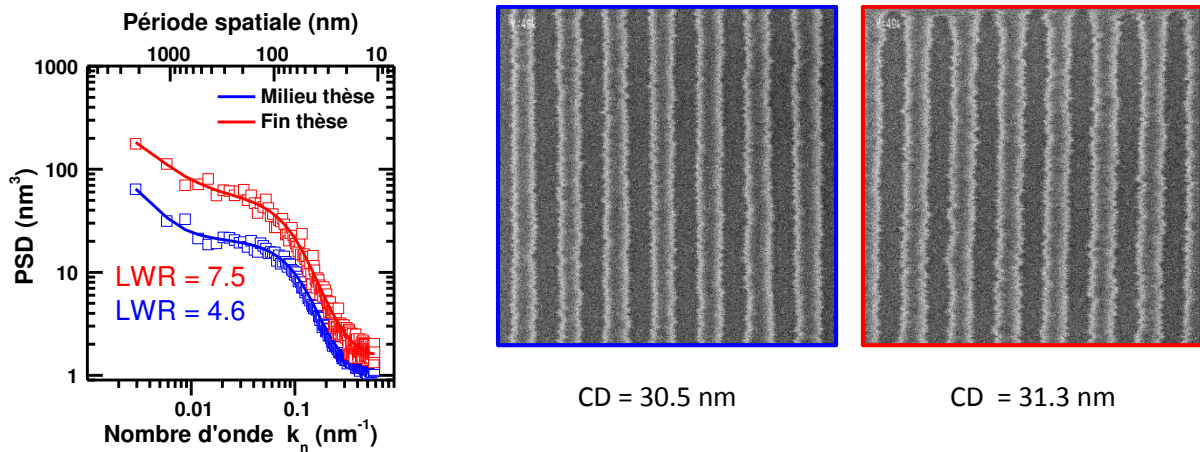


Fig. II.34 : Comparaison des valeurs de LWR et PSD au milieu et vers la fin des travaux de thèse avec l'outil Mapper Asterix et images CDSEM associées

Les faibles variations de CD n'expliquent probablement pas ces fortes augmentations. Cependant, le suivi du matériau de résine réalisé par le laboratoire a montré que les performances du matériau en terme de contraste, dose-to-clear et dark erosion avaient subies de fortes variations (>20%), ce qui peut avoir une large implication sur le LWR final (concentration en PAG changée, longueur de chaîne modifiée). Il est également probable qu'une part de l'augmentation de LWR vienne des équipements, notamment avec le MAPPER Asterix qui a vu ses optiques changées maintes fois et donc sa valeur de taille de faisceau également.

Néanmoins les différentes séries d'expérimentations de ce manuscrit présentent toutes des références ce qui permet d'évaluer de manière relative les paramètres de la lithographie au sein de chaque série.

Bibliographie du chapitre II

- [II.1]: D. A. Buck and K. R. Shoulders, Proc. Eastern Joint Computer Conf., pp. 55–59, (1959)
- [II.2]: P. Rai-Choudhury, SPIE Handbook of Microlithography, Micromachining and Microfabrication, (1997) (ISBN 9780819423788)
- [II.3]: Jon Orloff, Handbook of Charged Particle Optics, Second Edition, (2008) (ISBN-10: 1420045547)
- [II.4]: David B. Williams and C. Barry Carter, Transmission Electron Microscopy: A Textbook for Materials Science, Volume 3, (2009) (ISBN-10 0-387-76500-X)
- [II.5]: T. Miyazaki *et al.*, Potential of a rotary stage electron beam mastering system for fabricating patterned magnetic media, J. Vac. Sci. Technol. B 26, 2611 (2008)
- [II.6]: Stefan Landis (dir.), *Technologies de base en lithographie*, Paris, Hermes Science Publications, coll. « Electronique et microélectronique », p.193, (2010)
- [II.7]: Stefan Landis (dir.), *Technologies de base en lithographie*, Paris, Hermes Science Publications, coll. « Electronique et microélectronique », p. 196, (2010)
- [II.8]: Stefan Landis (dir.), *Technologies de base en lithographie*, Paris, Hermes Science Publications, coll. « Electronique et microélectronique », p. 175, (2010)
- [II.9]: H. C. Pfeiffer, New imaging and deflection concept for probe-forming microfabrication systems, Journal of Vacuum Science & Technology **12**, 1170 (1975)
- [II.10]: Zheng Cui, Nanofabrication Principles, Capabilities and Limits, p.86, (2008) (ISBN 978-0-387-75577-9)
- [II.11]: H. C. Pfeiffer, Journal of Vacuum Science & Technology **15**, 887 (1978)
- [II.12]: Zheng Cui, Nanofabrication Principles, Capabilities and Limits, p.122, (2008) (ISBN 978-0-387-75577-9)
- [II.13]: A. J. van den Brom *et al.*, Journal of Vacuum Science & Technology B **25**, 2245 (2007)
- [II.14]: <http://www.vistec-semi.com>
- [II.15]: <http://www.mapperlithography.com>
- [II.16]: M.J. Wieland *et al.*, MAPPER: High throughput maskless lithography, Proc. Of SPIE Vol. 7637 (2010)
- [II.17]: J. Belledent *et al.*, Matching of beams on the MAPPER MATRIX tool: a simulation study, Proc. Of SPIE Vol 8680 (2013)
- [II.18]: S. Middleman and A.K. Hochberg, Process Engineering Analysis in semiconductor Device Fabrication, MCGraw-Hill, New York, p.313, (1993)
- [II.19]: Dirk W. Schubert, Thomas Dunkel; Spin coating from a molecular point of view: its concentration regimes, influence of molar mass and distribution; Materials Research Innovations Vol. 7, p. 314 (2003)
- [II.20]: C. A. Mack, Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication, John Wiley & Sons, Ltd., p. 304, (2007) (ISBN: 978-0-470-01893-4)
- [II.21]: L. Azarnouche, “Défis liés à la réduction de la rugosité des motifs de résine photosensible 193 nm”, Thèse de doctorat de l’université de Grenoble, (2012)
- [II.22]: G. Socrates, Infrared and Raman Characteristic Group Frequencies: Tables and Charts, 3rd Edition, Wiley, (2004) (ISBN: 978-0-470-09307-8)
- [II.23]: M. Delhaye, J. Corset, M. Bridoux, and M.-H. Baron, Spectrométrie Raman, Techniques de l’ingénieur, P 2865
- [II.24]: T. Kudo *et al.*, J. Photopolymer. Sci. Technol. Vol. 14. p. 407-417 (2001)

- [II.25]: C. H. Wu *et al.*, Investigation on the Mechanism of the 193nm Resist Linewidth Reduction During the SEM Measurement, Proc. Of SPIE Vol. 4345 (2001)
- [II.26]: A. Vaglio Pret *et al.*, Roughness characterization in the frequency domain and LWR mitigation with post-litho processes, Proc. SPIE 7639, (2010)
- [II.27]: A. Hiraiwa and A. Nishida, Discrete power spectrum of line width roughness, J. Appl. Phys. 106, 074 905 (2009)
- [II.28]: A. Hiraiwa and A. Nishida, Spectral analysis of line edge and line-width roughness with long-range correlation, J. Appl. Phys. 108, 034 908 (2010)
- [II.29]: A. Hiraiwa and A. Nishida, Statistically accurate analysis of line width roughness based on discrete power spectrum, Proc. of SPIE 7638, 76 380N (2010).
- [II.30]: A. Hiraiwa and A. Nishida, Statistical-noise effect on discrete power spectrum of line-edge and line-width roughness, J. Vac. Sci. Technol. B 28, 1132 (2010)
- [II.31]: A. Hiraiwa and A. Nishida, Image-pixel averaging for accurate analysis of line-edge and line-width roughness, J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS 10, 023 010 (2011)
- [II.32]: A. Yamaguchi and J. Yamamoto, Influence of image processing on line-edge roughness in CD-SEM measurement, Proc. of SPIE 6922, 692 221 (2008).
- [II.33]: L. Azarnouche *et al.*, "Unbiased line width roughness measurements with critical dimension scanning electron microscopy and critical dimension atomic force microscopy", J. Appl. Phys. 111, 084318, (2012)
- [II.34]: http://www.itrs.net/Links/2013ITRS/2013Chapters/2013Litho_Summary.pdf
- [II.35]: L. Azarnouche, "Défis liés à la réduction de la rugosité des motifs de résine photosensible 193 nm", Thèse de doctorat de l'université de Grenoble, p13, (2012)
- [II.36]: L. Azarnouche, "Défis liés à la réduction de la rugosité des motifs de résine photosensible 193 nm", Thèse de doctorat de l'université de Grenoble, p41, (2012)

Chapitre III.

Impact du dépôt d'énergie sur les performances lithographiques

Ce troisième chapitre a pour but de discuter de la modification de la répartition spatiale du dépôt d'énergie qui se décrit comme nous avons pu le voir dans le chapitre I par la valeur du NILS. Plus précisément la discussion porte sur l'effet des variations du NILS sur les performances lithographiques en matière de rugosité de ligne et stabilité du procédé. En premier lieu nous présentons un modèle de simulation de dépôt d'énergie qui permet de confronter les tendances des résultats expérimentaux présentés dans les parties suivantes de ce chapitre. Ensuite, la seconde partie de ce chapitre propose d'utiliser une stratégie d'exposition alternative afin d'optimiser les performances lithographiques à l'énergie d'accélération de 50 keV notamment en matière de latitude en énergie et de LWR. La troisième partie se propose de faire la même chose à l'énergie d'accélération de 5 keV.

1. Modèle de simulation de dépôt d'énergie

Le développement d'outils de simulation est important de manière générale, car il permet de réaliser un développement intelligent et à moindre coût d'une technologie. Dans cette partie, nous allons utiliser un modèle de simulation inspiré par le modèle proposé par D. Rio dans ses travaux de thèse ^[III.1]. Nous allons donc le décrire, discuter de ses limites et soulever des interrogations quant à sa potentielle optimisation.

1.1. Présentation du modèle de simulation

Le modèle que Rio a développé pendant ses travaux de thèse est relativement simple, il permet d'obtenir une prédiction de résultat lithographique dans un plan orthogonal au sens des lignes que l'on veut réaliser (cf. figure III.1).

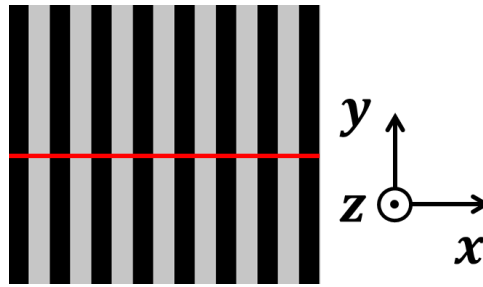


Fig. III.1 : Représentation 2D d'un motif L/S 32nmhp (motif de CD 32nm et de pas 64nm, soit un ratio 1:1 et son intersection avec le plan Oxz en rouge).

Dans un premier temps, on réalise le produit de convolution d'une PSF avec une fonction représentant l'intersection du motif de la figure III.1 avec le plan Oxz, c'est-à-dire une fonction créneau pour un motif L/S (cf. figure III.2), les calculs sont réalisés selon l'axe x, sur une grille de précision 1 nanomètre et sont limités spatialement à 1500nm (pour des raisons de temps de calcul).

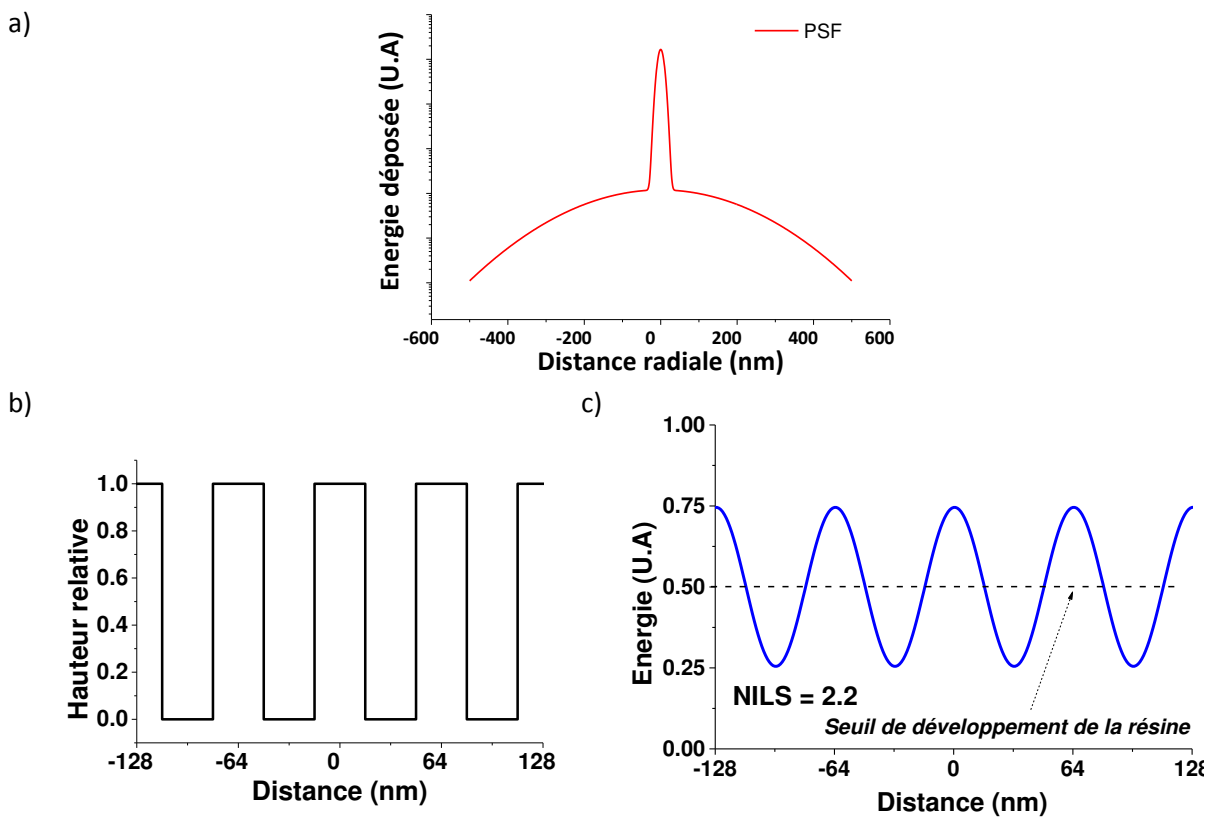


Fig. III.2 : (a) Représentation d'une PSF sous forme de double gaussienne, $\alpha=10.6\text{nm}$, $\beta=200\text{nm}$, $\eta=0.5$. (b) Représentation 1D d'une portion d'un motif de L/S 32nmhp. (c) résultat du produit de convolution et valeur de NILS associée. Le seuil de développement de la résine a été déterminé par l'obtention du CD grâce à l'utilisation de la courbe de contraste.

Pour ensuite obtenir un CD, le modèle propose de calculer pour chaque nanomètre de la grille l'épaisseur de résine restante en fonction de l'énergie déposée, ce que l'on peut obtenir grâce à la courbe de contraste de la résine (cf. chapitre I, section 2.2). Ensuite, pour une côte donnée le code permet de repérer les épaisseurs non nulles et donc de mesurer un CD. La modification de la dose en unité réelle $\mu\text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$ se fait à l'aide d'un coefficient multiplicateur de la courbe résultante de la convolution, normalisée et rapporté à l'unité de pixel de 1 nm^2 .

Les actions conjuguées du contraste de la résine, de la taille du faisceau, de la rétrodiffusion et du bruit grenaille sur l'allure des motifs obtenus avec ce modèle sont présentés dans les travaux de

thèse de D. Rio ^[III.1]. L'objectif de mes travaux de thèse concerne plutôt le LWR, ainsi plutôt que de fournir une représentation des motifs comme résultat de l'utilisation de ce code de simulation (réalisé avec le logiciel MATLAB®), il est préférable d'en tirer les informations sur la qualité du dépôt d'énergie (NILS) et sur le CD obtenu. Nous verrons par la suite que bien que limité à 2 dimensions et légèrement imprécis (grille de calcul de 1 nanomètre), ce modèle se révèle tout même fiable pour réaliser des prédictions sur les performances de la lithographie électronique.

1.2. Limites du modèle

Ce modèle repose sur de nombreuses approximations, il paraît important de les mentionner.

Premièrement, il suppose que la PSF et la quantité d'énergie déposée dans la résine sont invariantes selon la côte, ce qui n'est pas tout à fait vrai, en effet nous avons pu voir dans le chapitre II section 2.8.1 qu'un faisceau d'électrons s'élargissait en présence d'un film de résine plutôt épais, il en résulte un dépôt d'énergie plus important en bas des motifs. C'est d'ailleurs pour cela qu'il a été choisi avant le démarrage de mes travaux de thèse que le film de résine serait limité à l'épaisseur de 37nm afin d'éviter la formation d'un CD non égal entre le bas et le haut des motifs pour des lithographies à 5 keV.

Vérifions à l'aide de PSF fournies par le logiciel Casino les valeurs d'intégrales des PSF ($\iint PSF(r).r.dr.d\theta$) sur plusieurs tranches d'épaisseur du film de résine, cela nous permettra de valider ou non cette hypothèse. Pour ce faire, on réalise une simulation avec le logiciel Casino l'interaction d'un faisceau d'électrons d'énergie d'accélération 5 keV dont le diamètre est de 63.7 nm (Casino utilise une définition à 6 fois l'écart-type de la fonction gaussienne représentant le faisceau, cela correspond à une largeur à mi-hauteur de 25 nm). 300 000 électrons sont simulés et interagissent avec un empilement résine sur silicium (la résine est matérialisée par du PMMA d'épaisseur 37 nm). La grille de calcul a un pas de 4.6 nm selon l'axe z et 5.3 nm selon l'axe des distances radiales. Les PSF obtenues pour plusieurs tranches de 4.6 nm du film de PMMA et les énergies obtenues par intégration des PSF sont représentées respectivement en figure III.3.a&b.

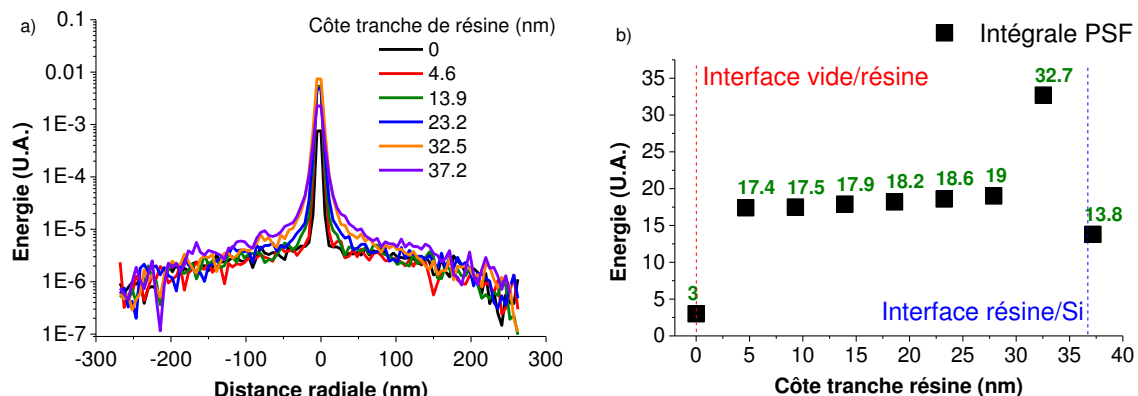


Fig. III.3 : (a) Allure des PSF pour diverses tranches du matériau de PMMA simulées à 5 keV pour 300000 électrons. (b) Energie déposée en fonction des tranches de PMMA

La figure III.3.b montre qu'outre les artefacts numériques issus de la découpe au niveau des interfaces (i.e. pour $Z=0$ et $Z>32.5$), on a une très faible croissance inférieure à 10% de l'énergie déposée dans le PMMA. On peut en conclure que dans notre cas, le choix d'un film de faible épaisseur (égale à 37 nm) convient pour une lithographie électronique à 5 keV et le dépôt d'énergie est quasi invariant selon la côte. À l'énergie d'accélération 50 keV, d'après les observations de la littérature ce phénomène devrait être a fortiori encore moins problématique pour une telle épaisseur de résine.

Deuxièmement, le dépôt d'énergie dans le cas de cette simulation ne prend pas en compte une écriture avec des tirs (shots) successifs et l'imprécision sur le placement de ces tirs, cela peut avoir une influence sur les valeurs de NILS ainsi obtenues. Dans notre cas, le produit de convolution est réalisé avec une résolution de 1 nanomètre ce qui devrait correspondre à un cas d'exposition avec un placement des tirs tous les nanomètres. Expérimentalement avec le MAPPER Asterix on dépose de l'énergie sur une grille de pas 4 nanomètres. En toute rigueur, il faudrait par le calcul confronter deux modèles de simulations, un qui fait un dépôt d'énergie par produit de convolution comme celui décrit par Rio avec une grille de calcul de 1 nm et un autre déposant de l'énergie par tirs successifs tous les 4 nm (incluant l'incertitude de placement des tirs) avec une grille de calcul de 0.1 nm. Cela n'a malheureusement pas été réalisé pendant mes travaux de thèse.

Compte tenu de la grille de calcul utilisée (1 nm) et de l'hypothèse selon laquelle on peut calculer une épaisseur résiduelle de résine pour une quantité d'énergie déposée, on est en droit de se demander si le modèle de simulation permet de rendre compte convenablement de l'évolution du dépôt d'énergie. Pour ce faire, on utilise la procédure expérimentale développée par Rio pour déterminer la PSF (cf. chapitre I, section 3.3.3) sur les résultats de simulations à de très nombreuses doses pour un motif d'espace isolé (on génère un espace isolé par insolation d'une structure isolée dans une résine positive). Pour plus de clarté, quand on discute d'un CD espace on le notera CD_s , s'il on discute d'un CD de ligne on le notera CD_l .

Dans ce cas, le modèle n'a pas besoin d'être étalonné en dose puisque l'on va regarder l'évolution du logarithme de la dose en fonction de $CD_s^2/4$ (l'étalonnage résulte en un coefficient multiplicateur). Les paramètres suivants ont été utilisés :

- PSF : $\alpha=10.6\text{nm}$ (soit une largeur à mi-hauteur de 25nm), $\beta=163\text{nm}$, $\eta=0.34$
- Doses faibles: 60, 75, 90, 105, 120, 135, 165, 180, 195 et 225 en $\mu\text{C.cm}^{-2}$
- Doses fortes: 4000, 6000, 8000, 10000, 12000, 14000, 20000 et 30000 en $\mu\text{C.cm}^{-2}$
- Motif d'espace isolé de CD 12nm.
- Extraction des CD_s au pied des motifs (à 3% de la hauteur initiale du film de résine)

Les figures III.4a&b représentent l'évolution du logarithme népérien de la dose en fonction du quart du carré de la dimension critique de l'espace (on utilise 2 graphiques d'échelles différentes pour plus de clarté).

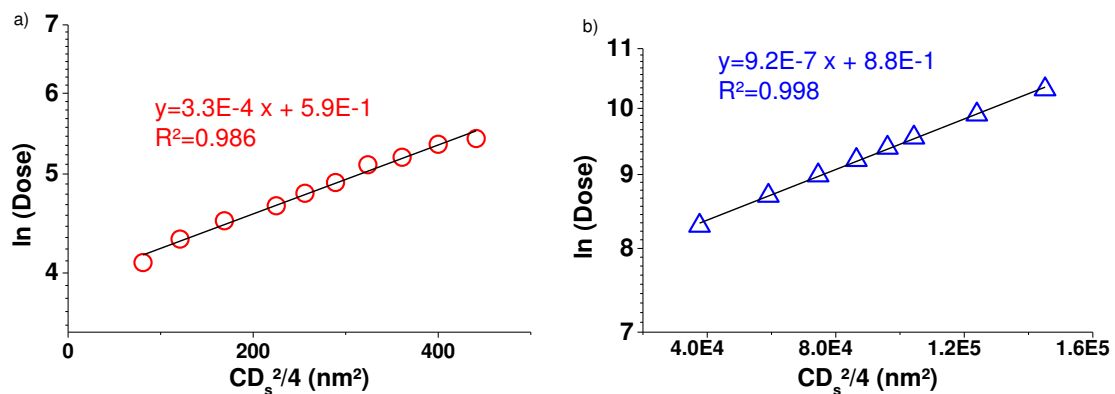


Fig. III.4 : Evolution du logarithme népérien de la dose en fonction du quart du carré de la dimension critique d'espace mesurée par simulation : a) faibles doses pour déterminer α et b) fortes doses pour déterminer β

Finalement, en utilisant les pentes et les coefficients directeurs on calcule les coefficients de la PSF et l'erreur sur leur détermination (à 99% de confiance):

- $\alpha = 11.6 \text{ nm} \pm 1.2 \text{ nm}$
- $\beta = 162.9 \text{ nm} \pm 1.5 \text{ nm}$
- $\eta = 0.334$

Les valeurs ainsi obtenues sont très proches des valeurs qui ont été fournies au code avant le calcul des CD_s , mais l'on peut remarquer que α est légèrement supérieur à la valeur initiale mais convenable si l'on tient en compte l'incertitude sur celui-ci. Ce n'est néanmoins pas étonnant que la valeur de α obtenue soit moins précise que celle de β , en effet les mesures de CD_s qui permettent la détermination de α sont de l'ordre de la dizaine de nanomètres (erreur de mesure du CD de l'ordre de 1/10) alors que celles qui permettent de calculer β sont de l'ordre de plusieurs centaines de nanomètres (erreur de mesure de CD de l'ordre de 1/100).

Troisièmement, l'utilisation directe du NILS comme seule information présentant la qualité de la lithographie n'est pas toujours adaptée, expérimentalement on utilise plutôt la latitude en énergie (EL). En effet l'EL prend en compte le dépôt d'énergie mais également les facteurs du procédé influant sur le résultat final de la lithographie (comme la courbe de contraste de la résine et son modèle, cf. figure III.5 et équation III.1).

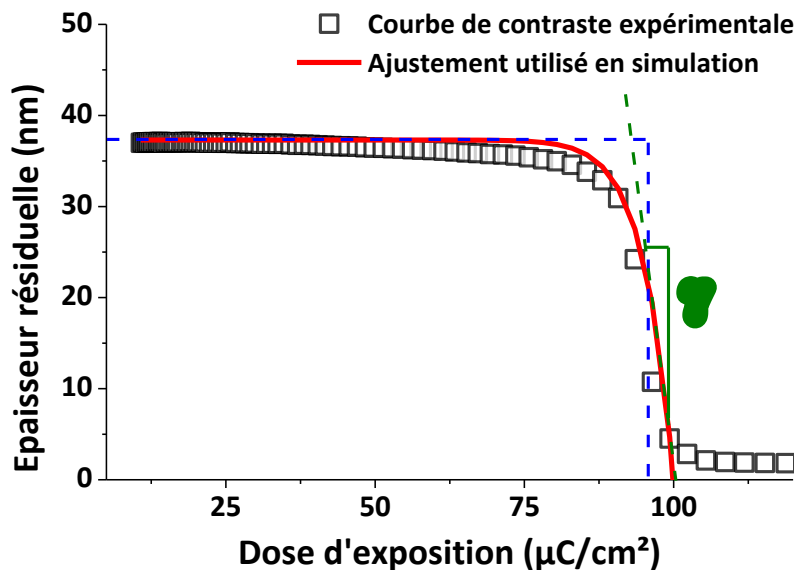


Fig. III.5 : Courbe de contraste expérimentale réalisée avec le Vistec SB3054 50 keV (pour un empilement résine d'étude sur silicium) et son ajustement analytique (en rouge) utilisé dans les simulations pour calculer les doses à la côte. La courbe de pointillés bleus correspond à une résine fictive de contraste infini de sensibilité équivalente.

$$E(D) = E_0 * \left(1 - \left(\frac{D}{D_0}\right)^\gamma\right) \quad (\text{eq III.1})$$

où D est la dose d'exposition, D_0 la dose-to-clear (dose nécessaire au retrait de la totalité de l'épaisseur de la résine) et γ le contraste de la résine (pente de la tangente à la courbe de contraste en D_0). Dans notre cas, la résine possède un fort contraste proche de 21. On a également fait figurer une courbe en pointillés bleus représentant une résine fictive de contraste infini de sensibilité équivalente.

Même si le NILS représente la « qualité » du dépôt d'énergie, s'il on veut simuler les performances lithographiques d'une résine à faible contraste (<10) il est plus adéquat de calculer un

EL par simulation que de se réduire à la seule information du NILS (il faut donc faire de nombreux calculs à différentes doses afin de calculer l'EL). Afin de rester assez précis sur la dose nécessaire à l'établissement du CD recherché par simulation, on utilise la courbe rouge de la figure III.5 (ce qui avait été précédemment cité), néanmoins afin de limiter drastiquement le nombre de simulations pour discuter de la qualité de la lithographie nous nous contenterons de confronter l'information de NILS à l'EL expérimentale obtenue (se contenter du NILS, qui est indépendant de la dose d'exposition, revient à considérer la résine comme ayant un contraste infini). Cela nous permettra par ailleurs de ne pas souffrir d'un biais dans la mesure d'EL simulée qui serait présent à chaque mesure de CD_s, à cause de la précision de la grille de calcul (1 nm), néanmoins se contenter du NILS apporte également un biais dans l'information de la courbe de contraste de la résine.

Au final, on utilise un modèle hybride de simulation, la dose à la côte simulée est assez finement déterminée à l'aide de l'ajustement analytique de la courbe de contraste expérimentale et du dépôt d'énergie. La qualité de la lithographie représentée en simulation dans notre cas par le NILS est déterminée à l'aide d'une seule simulation au lieu d'un grand nombre si l'on calculait une EL simulée. Le modèle développé par Rio permet donc de rendre compte simplement et assez rapidement des performances lithographiques. Il serait intéressant de l'affiner en améliorant la précision de la grille de calcul (au détriment du temps de calcul) ou bien de produire des résultats 3D pour des motifs simples de L/S. C'est-à-dire compléter l'information obtenue sur une tranche de motif actuellement, par l'information pour un très grand nombre de tranches de motif (selon l'axe y de la figure III.1) et en tenant compte du bruit grenaille pour au final simuler très simplement de la rugosité de ligne. Cela n'a malheureusement pas été réalisé pendant ces travaux de thèse par manque de temps.

2. Stratégie d'exposition

Le cœur du procédé de lithographie électronique est bien évidemment la capacité à pouvoir déposer l'énergie requise à l'endroit attendu avec l'extension spatiale adéquate pour former l'image latente de nos structures dans le matériau cible qui seront ensuite révélées par l'étape de développement. Il existe plusieurs manières d'obtenir des structures équivalentes en matière de dimension critique dans la résine, soit par l'utilisation de faisceau de dimension différentes soit par la modification de la géométrie des motifs.

Obtention de structures de dimension critique égale à l'aide de deux faisceaux de diamètres différents

Il est en effet possible de réaliser des structures de mêmes dimensions critiques avec différents contrastes en énergie, pour le montrer on utilise les deux PSF fictives dénotées 1 et 2 caractérisées par les triplets α , β et η suivants (10.6 nm, 200 nm et 0.5) et (21.2 nm, 200nm et 0.5) pour exposer un motif de ligne isolée par exemple dessiné à 32 nm de CD. La dose utilisée pour chacune ces simulations a été choisie afin d'obtenir un CD_s de 32nm pour un film de résine d'épaisseur initiale de 37 nm. L'allure des dépôts d'énergie est représentée en figure III.6.

On peut voir d'après la figure III.6 que l'extension spatiale du dépôt d'énergie est moindre avec l'utilisation d'un faisceau de plus petit α ce qui est cohérent. Les doses à la côte normalisées (ou dose-to-size, D2S) montrent que pour réaliser le motif au CD visé de 32nm il faut délivrer plus de dose avec la PSF2 de plus grande largeur à mi-hauteur. On peut également s'apercevoir qu'une portion non négligeable de la dose qui a été déposée grâce à la PSF2 se retrouve en périphérie de la zone à révéler, réduisant le contraste de l'image aérienne et donc le logarithme de la pente de l'image aérienne (NILS). Cela ne pose que peu de problème en matière de résolution dans le cas de l'exposition d'un espace ou

ligne isolée, mais dans le cas de motifs denses cet excès de dose en dehors de la zone d'intérêt impactera les capacités de résolution.

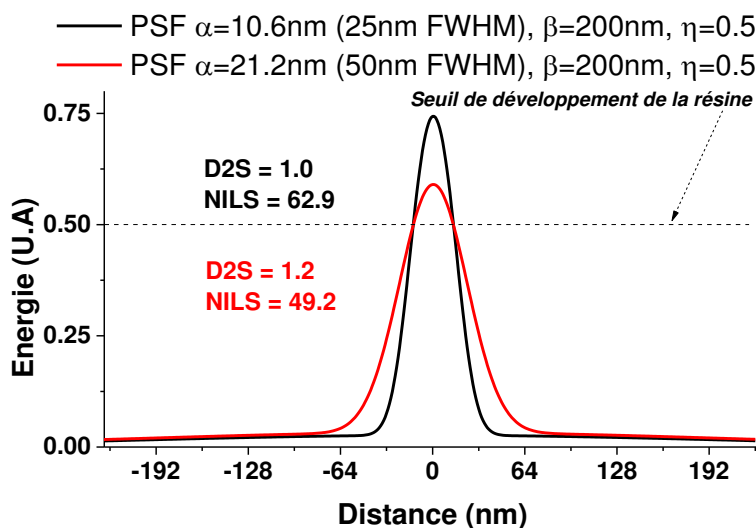


Fig. III.6 : Simulations de dépôt d'énergie pour un motif de ligne isolée avec deux PSF distinctes. Les valeurs obtenues de dose à la cote (D2S) et de NILS pour chacun des cas sont annotées. Le seuil de développement de la résine a été déterminé par l'obtention du CD grâce à l'utilisation de la courbe de contraste.

Il est de manière générale recommandé d'utiliser un faisceau dont la largeur à mi-hauteur est inférieure au CD à exposer, mais cette considération repose uniquement sur le contraste de l'image aérienne. De nombreux autres facteurs tels que les vibrations de la colonne électronique, celles du portoir et les incertitudes de positionnement du faisceau influent également de manière négative sur la qualité du dépôt d'énergie.

Obtention de structures de dimensions critiques égales à l'aide de la modification de la géométrie des motifs avec une unique PSF

Pour des motifs périodiques, on peut modifier l'extension spatiale de ces derniers mais également le rapport surfacique des zones à exposer avec les zones qui ne doivent pas l'être. Dans notre cas on garde l'extension spatiale du motif constante et on fait varier la surface des zones à exposer. La modification de la taille des zones à exposer à pas constant pour un motif donné est une technique nommée biais (on la trouve dans la littérature sous les termes anglo-saxons bias et sizing). Ce biais apporté dans les motifs peut-être positif (élargissement de la zone à exposer) ou négatif (réduction de la zone à exposer), on aura alors respectivement besoin de diminuer ou d'augmenter la dose pour obtenir la dimension critique initialement voulue. La technique de biais fait partie des techniques de correction des effets de proximité non présentés dans ces travaux, pour plus d'informations le lecteur pourra se reporter aux références [III.2-8].

Le biais est utilisé [III.6], notamment la version où l'on réduit la zone d'exposition, pour augmenter localement la stabilité ou la résolution du procédé au détriment de la vitesse d'écriture (selon l'outil d'exposition c'est plus ou moins vrai, un outil gaussien à taille de faisceau constante devra exposer moins de pixels mais à plus fortes doses ce qui a relativement peu d'impact sur le temps d'écriture alors qu'un outil à faisceau formé réduira sa taille de faisceau à nombre de pixels constants ce qui a un plus fort impact sur le temps d'écriture puisque l'on diminue la quantité d'électrons déposés par unité de temps). Cette technique repose sur la modification de l'image aérienne, un exemple de biais positif et négatif et l'effet de ces modifications géométriques sur l'image aérienne obtenue par simulation sur un motif isolé dessiné à 32 nm est présenté en figure III.7.

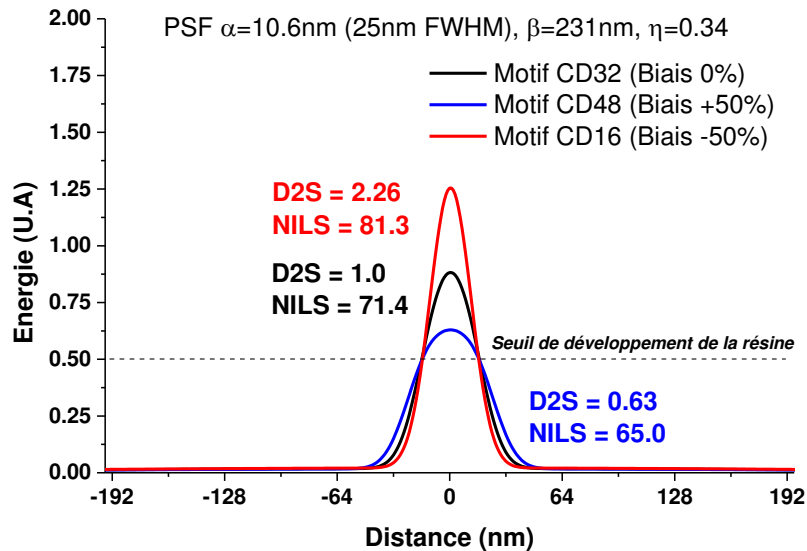


Fig. III.7 : Résultats de dépôt d'énergie simulés avec une PSF unique. Trois motifs de ligne isolée de CD32 biaisés de 0, +50 et -50 % (respectivement la zone exposée est de 32, 48 et 16nm) sont exposés tels que le CD d'espace obtenu après développement soit de 32nm dans les trois cas.

D'après la figure III.7 on peut voir qu'un biais positif entraîne à la fois une réduction de la D2S et du NILS alors qu'un biais négatif requiert une plus forte dose et présente un meilleur NILS. Un biais négatif permet de déposer moins d'énergie en dehors de la zone à révéler. Dans le cas de motifs denses le cas serait d'autant plus favorable. Ces quelques résultats de simulation montrent la dépendance du NILS et de la dose à la cote avec la taille des zones à exposer dans les motifs.

2.1. Biais négatif - Surexposition

Dans ces travaux de thèse, j'ai envisagé l'utilisation de la modulation géométrique comme stratégie d'écriture pour des motifs de ligne/espace. Plus précisément de la technique de biais négatif permettant de travailler dans un régime dit de surexposition. Les travaux préexistants relatifs à cette technique en lithographie électronique sont principalement axés sur l'amélioration de la stabilité ou de la résolution du procédé de lithographie électronique à l'aide de biais relativement modérés (retrait de quelques nm à une dizaine à la dimension critique de la zone d'exposition) et discutent peu de son effet sur la rugosité de ligne. Ici, on veut voir dans quelle mesure il est possible de diminuer la rugosité de ligne avec cette technique. D'abord d'après des simulations apportant des informations sur la qualité de l'image aérienne (NILS) puisque l'on a pu voir dans le chapitre I section 4.1 équation I.21 que la rugosité de ligne est dépendante de plusieurs paramètres notamment de la qualité de l'image aérienne (NILS), ensuite une vérification expérimentale de la technique est envisagée.

Dans cette partie nous allons aborder plusieurs points concernant l'utilisation de biais négatif dans les motifs de L/S, dans un premier temps avec des résultats de simulations et expérimentaux à l'énergie d'accélération de 50 keV et dans un second temps de façon analogue à l'énergie d'accélération de 5 keV. Les différents biais négatifs sur les motifs de période constante 64 nm sont représentés en figure III.8

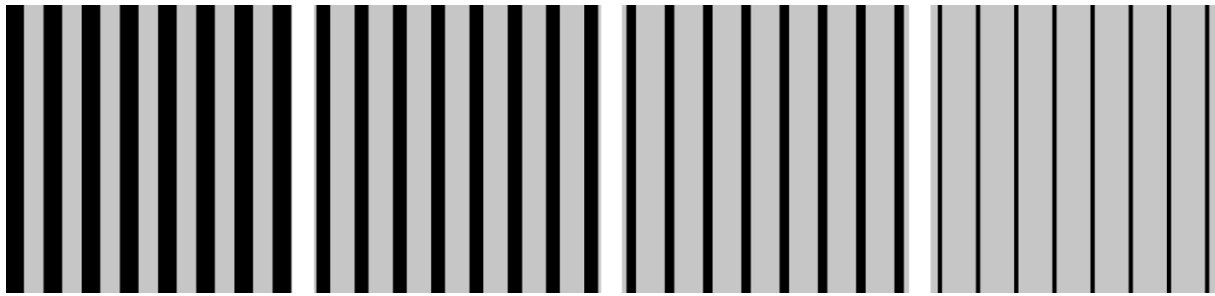


Fig. III.8 : Représentations bidimensionnelles tronquées (480nm*480nm) de motifs L/S de période 64nm, la zone en noire représente la zone exposée et la zone en gris la zone non-exposée, de gauche à droite, un motif 32/32nm non-biaisé, un motif 24/40nm (32nmhp de biais -25%), un motif 16/48nm (32nmhp de biais -50%), un motif 08/56nm (32nmhp de biais -75%)

Notre objectif après lithographie étant d'obtenir des motifs de L/S 32/32nm (32nmhp) dans la résine, on adoptera pour le reste du manuscrit la notation suivante :

- Motif 32/32nm → 32nmhp – non-biaisé
- Motif 24/40nm → 32nmhp – biais -25%
- Motif 16/48nm → 32nmhp – biais -50%
- Motif 08/56nm → 32nmhp – biais -75%

2.2. A l'énergie d'accélération de 50 keV

L'effet de cette stratégie d'écriture sur les performances lithographique est d'abord testé avec l'outil Vistec SB3054. Pour ce faire, on utilise des motifs de L/S de 896nm de large (soit 14 pas de 64nm) et de 3mm de long. Ainsi les motifs sont clivables pour obtenir les profils des motifs et sont peu larges afin de réduire le temps d'exposition et de pouvoir simuler certains cas à l'aide de notre modèle dans un temps raisonnable. Dans la section 2.2 et ses sous-sections associées, aucun empilement ne sera considéré, la résine est directement déposée sur silicium.

2.2.1. Résultats de simulation à 50 keV

Dans cette partie sont abordés les effets de l'utilisation de motifs biaisés sur le logarithme de la pente de l'image aérienne normalisé (NILS) et de la dose à la cote requise pour exposer les 4 cas de motifs présentés précédemment. Afin de nous placer en simulation dans un cas identique aux conditions expérimentales, l'extension spatiale des motifs simulés est de 896nm. De plus, n'ayant pas de PSF déterminées expérimentalement pour alimenter le modèle, nous les avons simulés avec le logiciel Casino.

Détermination des PSF par simulation

Pour ce faire, on suppose que la PSF de notre outil Vistec d'énergie d'accélération de 50 keV est modélisée par une double fonction gaussienne. Ce n'est pas usuel et n'est pas vrai pour un outil à faisceau formé qui normalement possède une densité de courant constante, sauf sur les bords (de quelques nanomètres de large), de la distribution des électrons du faisceau qui peuvent être décrits comme des profils gaussiens (cf. chapitre II, section 1.1.3.2).

Néanmoins, le logiciel Casino ne permet pas de réaliser des simulations avec d'autres types de faisceaux que des faisceaux gaussiens (ce logiciel est initialement destiné à la microscopie électronique à balayage qui utilise des faisceaux de type gaussien). De plus, l'équipement Vistec SB3054 disponible au CEA-LETI est limité en résolution à des motifs de L/S 28nmhp lorsqu'aucune stratégie de biais n'est utilisée, cela laisse supposer que la réduction effective de taille de faisceau est certainement limitée bien que le système de modulation de la taille du faisceau qui réalise sa mise en forme soit capable de réaliser une projection du premier sur le second niveau d'ouvertures avec une précision nanométrique. Les phénomènes collisionnels au bord des ouvertures ne permettent plus d'avoir une distribution des électrons primaires quasi uniforme après le passage par les deux ouvertures. Supposons que pour exposer des zones de 24, 16 et 8 nm notre faisceau soit assimilable à une distribution gaussienne. Par contre, il est très probable que ce soit une approximation assez grossière pour le cas où la zone à exposer est de 32nm.

Afin de simuler l'effet d'une modulation de taille de faisceau, on veut donc déterminer 4 PSF. Supposons de plus que la taille de faisceau avant l'impact avec la résine a une largeur à mi-hauteur correspondant à la largeur des zones exposées des motifs définis dans la section précédente, soit respectivement 32, 24, 16 et 8nm. On doit donc déterminer 4 α , un β et un η . L'écart-type de la distribution des électrons rétrodiffusés β ne dépend que de l'énergie du faisceau et de l'empilement des matériaux. Le ratio d'énergie rétrodiffusée dans la résine η va dépendre également du cheminement des électrons rétrodiffusés et donc de l'énergie du faisceau et de l'empilement de matériaux.

a) Ecriture générale de α

Dans la littérature, le terme α (écart-type de la distribution des électrons primaires de la PSF) obtenu expérimentalement peut s'écrire sous la forme de plusieurs contributions supposées indépendantes :

$$\alpha_{\text{total}}^2 = \alpha_{\text{flou}}^2 + \alpha_{\text{procédé}}^2 + \alpha_{\text{élargissement}}^2 \quad (\text{eq. III.2})$$

où α_{flou} est un terme qui rend compte de la distribution des électrons avant l'interaction avec la résine (taille du faisceau hors résine, erreurs de positionnement, astigmatisme mal corrigé, vibrations de la colonne électronique), $\alpha_{\text{procédé}}$ rend compte des phénomènes liés au procédé (diffusion d'acide, nature de la résine, développement) et $\alpha_{\text{élargissement}}$ rend compte de l'élargissement du faisceau dans la résine (phénomène dépendant de l'accélération des électrons et de l'épaisseur du film de résine, cf. chapitre II, section 2.8.1).

b) Ecriture de α dans le cas d'une simulation d'interaction électron matière

S'il on détermine une PSF par simulation, le terme α_{flou} se réduit à α_{faisceau} puisqu'il n'y a aucune erreur de positionnement, ni vibrations, ni astigmatisme. On n'a de plus aucune composante relative au procédé. On doit donc considérer une version revisitée de l'équation III.2 :

$$\alpha_{\text{totalsimulation}}^2 = \alpha_{\text{faisceau}}^2 + \alpha_{\text{élargissement}}^2 \quad (\text{eq. III.3})$$

Tâchons de déterminer la contribution relative à l'élargissement du faisceau à 50 keV qui sera constante quelle que soit la modulation du faisceau envisagée. A l'aide d'une simulation d'interaction électron-matière avec Casino. Pour ce faire, on prend un faisceau qui en dehors de la résine est caractérisé par une largeur à mi-hauteur de 32nm (soit $\alpha_{\text{faisceau}} = 13.6\text{nm}$).

Dans le logiciel Casino 3.2, il faut définir un diamètre de faisceau à 6σ (ce qui correspond alors à $6 \times 13.6 = 81.5\text{nm}$). La simulation comprend 1 million d'électrons d'énergie 50 keV et l'information

d'énergie déposée est répartie sur une matrice dont le pas est 5 nm selon la distance radiale et 1 nm selon l'épaisseur.

A l'énergie de 50 keV, l'extension spatiale de la zone de simulation est de rayon 15 μm environ, l'utilisation d'un pas de 5 nm est obligatoire avec un ordinateur conventionnel sous peine de surcharger la mémoire de ce dernier avec une matrice trop grande, le logiciel refuse alors catégoriquement de calculer). On pourrait directement réaliser 4 simulations avec les tailles de faisceau proposées dans les paragraphes précédents pour déterminer la composante relative à l'élargissement du faisceau dans 4 cas. Néanmoins, l'utilisation de très petits faisceaux produit une première fonction gaussienne dont l'écart-type devient de plus en plus faible en comparaison à la découpe de l'information d'énergie déposée et rend donc la détermination du terme relatif à l'élargissement du faisceau dans la résine hasardeuse. C'est pour cela que l'on a préféré réaliser la détermination de ce terme dans le cas du faisceau de plus gros diamètre utilisé dans cette section.

c) Les paramètres β et η des PSF

Le paramètre β caractérisant la distribution des électrons rétrodiffusés doit être invariant avec un changement de taille de faisceau, il en est de même pour le paramètre η qui ne dépend de l'empilement des matériaux de la lithographie (ici nous n'avons que de la résine sur du silicium). Ils seront déterminés avec la simulation permettant d'obtenir le terme relatif à l'élargissement du faisceau dans la résine (pour la tranche de résine relative au milieu de l'épaisseur)

d) Le paramètre résine

Le manque d'informations sur la résine, notamment sa composition atomique relative et sa densité nous a conduit à supposer que la résine d'un point de vue interaction électron matière pouvait être modélisée par du PMMA (dont les informations sont déjà présentes dans Casino). Compte-tenu des informations obtenues sur la structure du polymère de la résine au chapitre II, section 4.1.1 par spectroscopie d'absorption IR, c'est une hypothèse qui semble vraisemblable. On peut néanmoins supposer que la résine d'étude ait en réalité une proportion atomique de carbone supérieure à celle du PMMA, si l'on suppose que notre résine a de gros groupements latéraux (chaines carbonées des alkoxy terminant les fonctions esters) et qu'elle contient des molécules organiques de PAG et de base. On fixe l'épaisseur du film de PMMA à 37nm (directement déposé sur silicium).

e) Résultats de simulation par Casino

Finalement, pour déterminer le terme relatif à l'élargissement du faisceau de la distribution des électrons primaires, on extrait 2 PSF avec l'impact d'un unique faisceau dont les caractéristiques ont été précisées précédemment. Une PSF à 5 nm de l'interface vide/résine (interface supérieure) et une PSF à 5 nm de l'interface résine/silicium (interface inférieure) et ce pour éviter tout phénomène lié aux interfaces. Nommons les respectivement PSF_{top} et PSF_{bot} .

Tableau III.1 : PSF obtenues en haut et en bas de la résine

PMMA 37nm sur Si @50keV	α (nm)	β (nm)	η
PSF_{top}	16.3	5766	0.66
PSF_{bot}	16.7	5794	0.69

Considérons de plus l'équation :

$$\alpha_{\text{élargissement}} = \sqrt{\alpha^2_{\text{totalsimulationPSFbot}} - \alpha^2_{\text{totalsimulationPSFtop}}} \quad (\text{eq III.4})$$

L'application numérique conduit à $\alpha_{\text{élargissement}50\text{keV}} = 3.6$ nm. Il est probable que le pas de la matrice sur laquelle on obtient l'information d'énergie (5nm dans le sens de la distance radiale) ait une influence sur cette valeur), en toute rigueur il faudrait procéder à des simulations avec une matrice avec un pas très fin, mais cela est impossible avec un ordinateur conventionnel.

Le tableau III.2 récapitule les paramètres des 4 PSF qui serviront de données d'entrée pour le modèle de simulation de dépôt d'énergie dans les motifs présentés dans la partie I. Ce dernier contient également les motifs auxquels les PSF seront convoluées afin d'obtenir le NLS et la D2S des motifs (on vise pour les 4 cas un CD de 32 nm dans la résine).

Tableau III.2 : Récapitulatif des paramètres des 4 cas (PSF et motifs)

Cas envisagé	PSF 50 keV (PMMA 37nm sur Si)				
	α_{faisceau} (nm)	α_{total} (nm)	β (nm)	η	Motif (nm)
32nmhp – non-biaisé	13.6	14.1	≈ 5800	0.66	32/32
32nmhp – biais -25%	10.2	10.8	≈ 5800	0.66	24/40
32nmhp – biais -50%	6.8	7.7	≈ 5800	0.66	16/48
32nmhp – biais -75%	3.4	5.0	≈ 5800	0.66	08/56

f) Résultat des simulations de dépôt d'énergie pour les motifs considérés

Les images aériennes des expositions par simulation sont représentées en figure III.9 et les données de D2S et NLS obtenues sont listées dans le tableau III.3 (le modèle a été étalonné avec la dose expérimentale du cas sans biais).

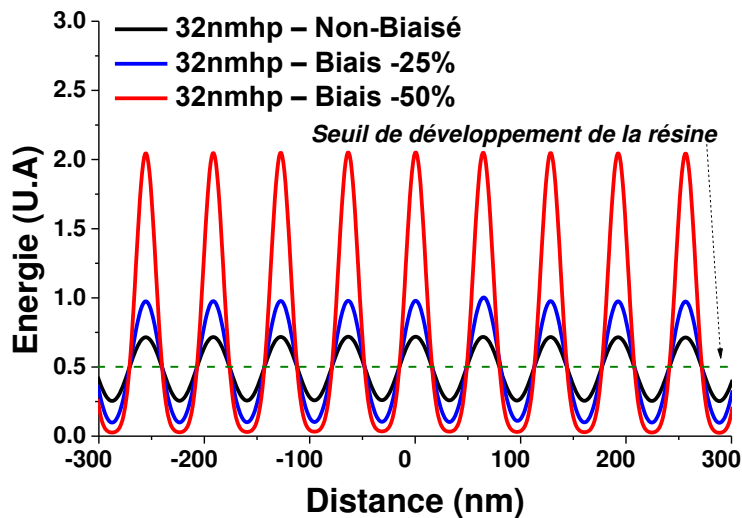


Fig. III.9 : Images aériennes des 3 premiers cas de biais (0, -25 et -50% respectivement). Il est préférable de ne pas représenter le cas de biais -75% faute de quoi l'échelle des ordonnées serait inadaptée au regroupement des courbes relatives aux 4 cas de biais.

Tableau III.3 : D2S relative et NLS simulés à 50 keV

	D2S relative	NLS
32nmhp – non-biaisé	1.0	1.7
32nmhp – biais -25%	1.4	4.0
32nmhp – biais -50%	3.8	7.9
32nmhp – biais -75%	40.5	13.4

L'utilisation combinée de motifs biaisés et d'un faisceau formé permet d'améliorer considérablement le NILS de 1.7 jusqu'à environ 13.4 au détriment d'une augmentation de la dose relative d'exposition jusqu'à 40.5. Expérimentalement, il est commun d'avoir des valeurs de NILS de quelques unités, 1.7 est un peu faible par contre les valeurs de 7.9 et 13.4 semblent exagérément élevées. Il est de plus probable que l'augmentation relative de la D2S soit moindre en réalité. En effet, trois des hypothèses nécessaires à la réalisation de ces résultats de simulation jouent un large rôle dans l'établissement de la valeur finale de la dose à la côte et du NILS.

La première hypothèse relative à la détermination de dose à la côte est que l'on utilise un modèle de courbe de contraste défini comme dans l'équation III.1 qui surestime légèrement la valeur de la dose-to-clear et ne prend pas en compte le phénomène dit de « dark erosion » (solubilité non nulle de la résine même pour de faibles doses d'exposition). Or cette solubilité de la résine dans le développeur non négligeable même pour des faibles doses d'exposition, dans notre cas sous-estimée, entraîne une surestimation de la quantité résiduelle de résine. C'est-à-dire à un surdimensionnement de la dimension critique des lignes de résine et donc une estimation erronée de la dose d'exposition (cf. figure III.5).

Les deux dernières hypothèses quant à elles sont l'assimilation du faisceau formé à un faisceau gaussien de largeur à mi-hauteur égale au CD du motif à exposer (reproduisant un comportement fictif de modulation de taille de faisceau). Il est probable que ces deux approximations soient largement en défaveur de la dose à déposer et largement en faveur du NILS.

c) Conclusion intermédiaire

Bien que le modèle de simulation soit simple, on peut voir que l'utilisation combinée de motifs biaisés et d'un outil à faisceau formé permet de prédire une augmentation de la D2S et du NILS en même temps que le biais négatif augmente. Cela signifie donc que l'on peut s'attendre expérimentalement à l'amélioration des performances du procédé lithographique à 50 keV notamment en matière d'EL et en rugosité de ligne puisque le NILS semble augmenter avec la technique et ce au détriment de la dose nécessaire à la réalisation des motifs. Il est également probable que les gains d'EL et l'augmentation de la dose soit plus modérés expérimentalement.

2.2.2. Résultats expérimentaux à 50 keV

Dans cette section, on a réalisé l'exposition des motifs considérés en section 2.1 sur notre résine d'étude directement déposée sur silicium, tous les motifs étant regroupés sur une même plaque. Pour ce faire, on a exposé de larges plages de doses pour chacun des motifs. La dimension critique est mesurée pour chacune des doses afin d'obtenir la D2S et l'EL pour chacun des cas. Une fois la D2S déterminée, des images CDSEM supplémentaires sont réalisées à 5 doses (dont une étant la dose la plus proche de la D2S présente sur la plaque pour chaque cas de motif) afin d'observer l'évolution de la rugosité de ligne en fonction de la dose pour nos 4 motifs visant chacun à reproduire des L/S 32/32nm dans la résine.

a) Evolution du CD en fonction de la dose et latitude en énergie

La figure III.10 présente l'évolution du CD_i en fonction de la dose pour les 4 cas de motifs envisagés. De manière générale l'évolution du CD_i en fonction de la dose est très souvent linéaire et décroissant pour une plage de dose autour de la D2S et on obtient l'EL expérimentalement en divisant l'inverse de la pente de la tangente à la courbe du CD en fonction de la dose (dans la zone de $CD_{visé} \pm 10\%$) par la D2S. Le tableau III.4 quant à lui regroupe les valeurs de D2S pour obtenir un CD de

32nm, les D2S relatives et les EL obtenues lors de ces lithographies. Pour chaque biais, nous constatons une diminution du CD_l avec la dose qui augmente.

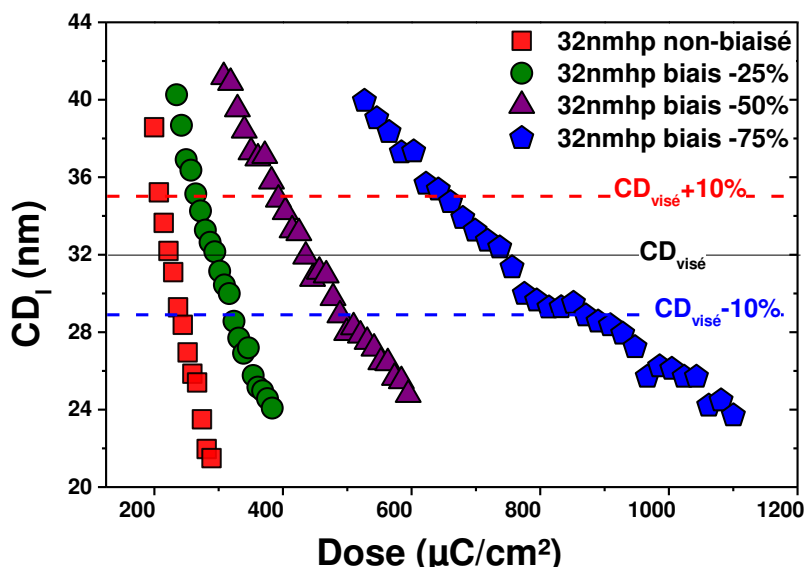


Fig. III.10 : Evolution du CD de ligne obtenu en fonction de la dose d'exposition pour les 4 cas considérés.

Tableau III.4 : D2S, D2S relative et EL obtenues à partir des données expérimentales à 50 keV

Cas	D2S ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$)	D2S relative	EL _{+10%} (%)
32nmhp – non-biaisé	226.0 ± 14.6	1.00	15.0 ± 3.2
32nmhp – biais -25%	294.4 ± 6.7	1.30	20.6 ± 1.4
32nmhp – biais -50%	444.6 ± 17.9	1.97	27.2 ± 3.3
32nmhp – biais -75%	753.8 ± 33.8	3.34	32.1 ± 4.3

Le premier constat de l'utilisation de motifs biaisés avec le Vistec SB3054 concerne la variation de la dose. Cette dernière augmente d'un facteur d'environ 1.3, 2.0 et 3.3 avec le biais négatif qui augmente (respectivement biais -25%, -50% et -75%) mais bien moins que ce que l'on a obtenu en simulation (rappel : respectivement 1.4, 3.8 et 40.5). On peut de plus s'apercevoir que l'EL augmente au fur et à mesure que le biais négatif augmente, suggérant que la taille du faisceau diminue avec le biais négatif qui augmente avec notre outil à faisceau formé.

En s'attardant sur la variation relative de dose on peut trouver que cette dernière évolue linéairement avec le carré de la variation relative de surface exposée comme le montre la figure III.11. On peut donc en exposant deux cas de motifs biaisés de biais différents prédire la D2S d'un motif de biais intermédiaire encore non exploité. On pourrait s'attendre à avoir besoin par exemple de 4 fois la dose initiale pour exposer le cas de biais de -75% (correspondant à l'exposition du quart de la surface initiale) mais cela serait ne pas prendre en compte la composante non négligeable de dose déposée par la rétrodiffusion des électrons qui dépend de la surface des motifs exposés et du paramètre η (égal à 50 keV à 0.66 d'après les simulations Casino). Dans ce cas-ci, le motif est large d'environ 900 nm. En exposant des motifs plus larges, la proportion d'électrons rétrodiffusés participant à l'écriture du motif va augmenter, il est probable que cette dose relative nécessaire à l'obtention des motifs biaisés diminue.

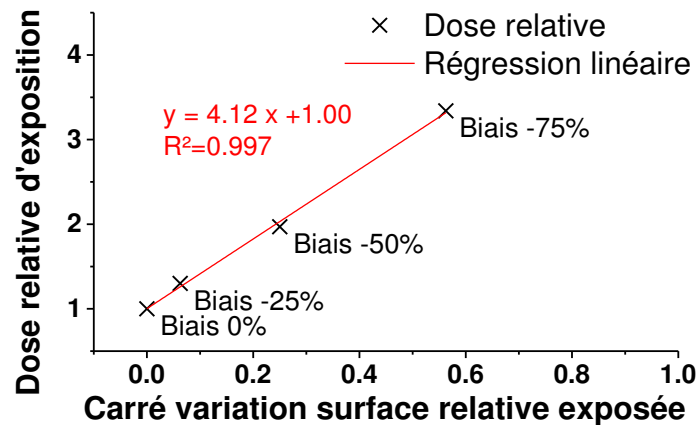


Fig. III.11 : Evolution de la D2S relative pour chaque biais en fonction du carré de la variation de surface

De plus, les motifs utilisés dans ces 4 cas présentent très exactement la même surface globale et le même nombre de tirs à réaliser pour exposer les motifs, cela signifie que la variation de dose relative est égale à la variation relative de temps d'écriture pour les différents cas utilisés ici.

b) Confrontation des résultats de simulation et expérimentaux en matière d'EL

On peut trouver dans la littérature ^[III.10] un lien entre le NILS qui représente une mesure théorique de la qualité de la lithographie et l'EL qui représente la mesure expérimentale de la stabilité du procédé, comme le montre l'équation III.5.

$$EL (\%) = A * NILS - B \quad (\text{eq III.5})$$

où A et B sont des constantes dépendantes du procédé résine. Le rapport B/A représente le NILS minimum théorique pour lequel l'EL serait nulle (c'est-à-dire qu'il n'existerait qu'une seule dose sans défauts, dose en dessous de laquelle on ne serait résolu et dose au-dessus de laquelle on serait surdosé, cas inaccessible expérimentalement). Les procédés ont expérimentalement une EL acceptable à partir de 10% environ (pour une tolérance à plus ou moins 10% du CD visé) et l'on considère que de même que le NILS minimum est au minimum de 2 pour atteindre ces 10% d'EL (une résine de contraste infini aurait un EL de 10% pour un NILS de 2) ^[III.11]

Cet étalonnage nécessaire entre le NILS et l'EL vient du fait que le NILS quand il est calculé la plupart du temps ne prend en compte que très peu voire aucune considérations expérimentales telles que les éventuelles vibrations mécaniques au niveau du portoir ou de la colonne et les incertitudes de placement du faisceau, les propriétés de la résine d'exposition, le recuit après exposition (PEB), etc... Ces dernières limitent la qualité de la lithographie.

La figure III.12 représente les valeurs d'EL obtenues expérimentalement avec les différents biais employés à la section 2.2.2 en fonction des valeurs de NILS obtenues par simulation pour ces mêmes cas de biais à la section 2.2.1.

La régression linéaire de la courbe d'EL en fonction du NILS présente un coefficient de corrélation passable de 0.93 mais on a bien une relation linéaire, cependant la linéarité entre le NILS et l'EL pourrait provenir du fait que chacune de ces grandeurs puisse varier linéairement avec une autre grandeur, par exemple la dose. Cette relation linéaire entre l'EL et le NILS va nous permettre de vérifier les hypothèses formulées en section 2.2.1 selon lesquelles on pouvait modéliser notre faisceau formé variable par un faisceau gaussien de largeur à mi-hauteur égale à la largeur de la zone à exposer, c'est-à-dire 32, 24, 16 et 8 nm pour nos différents cas de motifs biaisés (respectivement 32nmhp non-biaisé, biaisé -25%, biaisé -50% et biaisé -75%). En effet, même si la relation linéaire est vérifiée mais qu'elle ne permet pas de dire s'il on a effectivement corrélation entre les deux grandeurs, les

coefficients de la régression permettent néanmoins de discuter. Dans la pratique avec un NILS nul on n'a aucune fenêtre de procédé, il est souvent admis qu'un NILS minimum de 2 est nécessaire à l'obtention d'une fenêtre de procédé correcte (environ 10%).

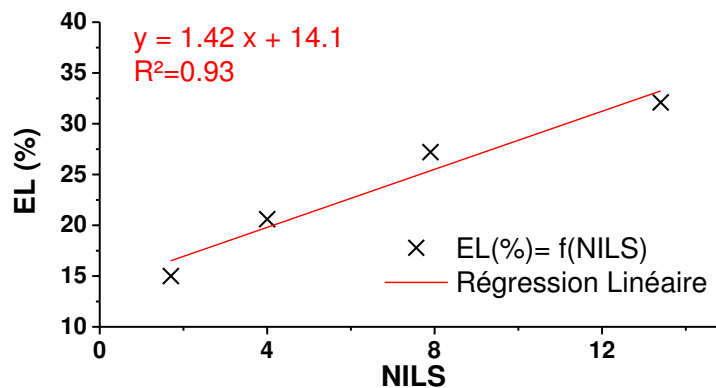


Fig. III.12 : Evolution de l'EL en fonction du NILS et la régression linéaire associée

Cela signifie que le rapport B/A des constantes de l'équation III.5 doit être proche de 0 voire négatif. Or la régression linéaire obtenue donne une ordonnée à l'origine positive ce qui voudrait dire que l'on peut lithographier des motifs de L/S avec un fond d'énergie continu, ce qui n'a pas de sens. On peut donc largement remettre en cause les 2 hypothèses formulées selon lesquelles on pouvait modéliser le terme relatif à la distribution des électrons primaires des PSF de notre Vistec par une fonction gaussienne de largeur à mi-hauteur égale à la largeur de la zone à exposer. La forme gaussienne est à remettre en cause et la distance caractéristique (un équivalent du diamètre) également. Une diminution de la taille du faisceau aussi drastique aurait engendré une très forte augmentation de la dose, or ce n'est pas le cas expérimentalement, pour le cas de biais à -50% (respectivement -75%) on mesure expérimentalement une dose relative de 2 (respectivement 3.3) et par simulation de 3.8 (respectivement 40.5). Il est donc possible d'inférer grâce à l'évolution de la dose d'exposition expérimentale que la modulation de la taille du faisceau est limitée et ne permet pas de réduire la taille du faisceau aux dimensions les plus petites simulées de 16 et 8nm. Une vérification expérimentale de la taille du faisceau pour chacun des cas de biais serait nécessaire pour trouver un accord entre les EL mesurées et le NILS obtenu par simulation.

c) Proposition de fonction pouvant décrire une distribution quasi-uniforme des électrons primaires

Il serait, de plus, adéquat de proposer une forme non gaussienne pour le faisceau et donc une PSF sous la forme d'une autre fonction pour la distribution des électrons primaires et une fonction gaussienne pour la distribution des électrons rétrodiffusés. La distribution des électrons rétrodiffusés garde une distribution gaussienne quelle que soit la mise en forme du faisceau puisqu'elle résulte d'un cheminement aléatoire dépendant de phénomènes stochastiques : les collisions des électrons.

On cherche donc une fonction pour la distribution des électrons primaires qui ressemblerait à un créneau non parfait et qui au-delà d'une longueur caractéristique doit décroître rapidement et tend vers 0. Une fonction basée sur des fonctions de type sigmoïde (cf. eq III.6) pourrait convenir, en effet ces dernières possèdent 2 asymptotes horizontales, une en zéro et une à la valeur du numérateur (figure III.13) et de plus la convergence vers les valeurs asymptotiques se fait « rapidement ».

$$f(r) = \frac{1}{1+e^{-r}} \quad (\text{eq III.6})$$

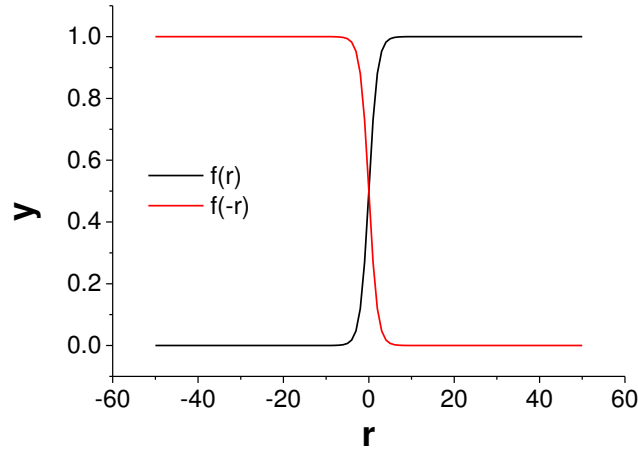


Fig. III.13 : Représentation de $f(r)$ et $f(-r)$ en fonction de la distance radiale

La fonction que nous cherchons doit être symétrique, doit présenter une grandeur homogène à une distance caractéristique et l'on doit contrôler la pente.

Modifions ainsi l'équation III.6 :

$$f_1(r) = \frac{1}{1+e^{-p(r+r_0)}} \quad (\text{eq III.7})$$

où p est le terme relatif au contrôle de la pente et r_0 la distance caractéristique. Représentons f et f_1 avec $p = 3$ et $r_0 = 10$ (choisis arbitrairement).

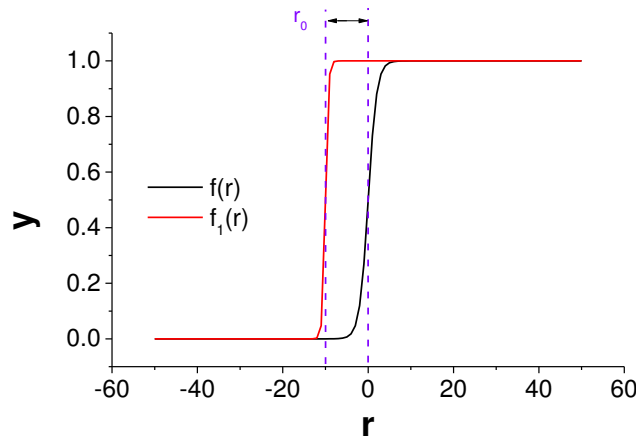


Fig. III.14 : Représentation de $f(r)$ et $f_1(r)$ en fonction de la distance radiale pour $p = 3$, $r_0 = 10$

Il nous faut désormais une fonction symétrique qui répond aux critères ci-dessus, posons :

$$f_3(r) = K * \left(\frac{1}{1+e^{-p(r+r_0)}} + \frac{1}{1+e^{p(r-r_0)}} - 1 \right) \quad (\text{eq III.8})$$

où K est un coefficient d'ajustement de la hauteur (donc d'énergie quand on décrira une PSF) et f_3 se simplifie en :

$$f_3(r) = \frac{K*(1-e^{-2*p*r_0})}{(1+e^{-p(r+r_0)})*(1+e^{p(r-r_0)})} \quad (\text{eq III.9})$$

Représentons f_3 pour $p = 3$, $r_0 = 10$ et $K = 3$:

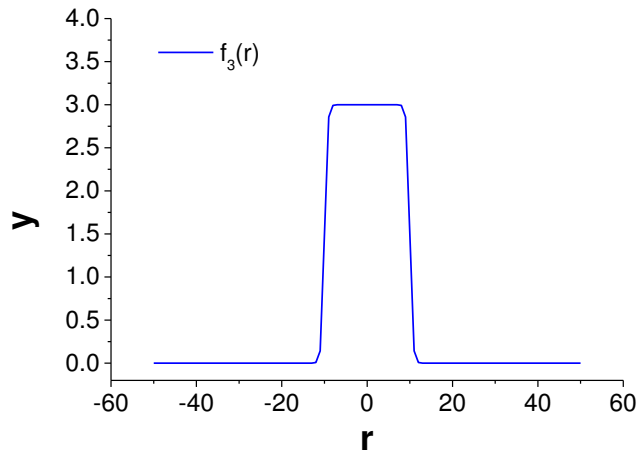
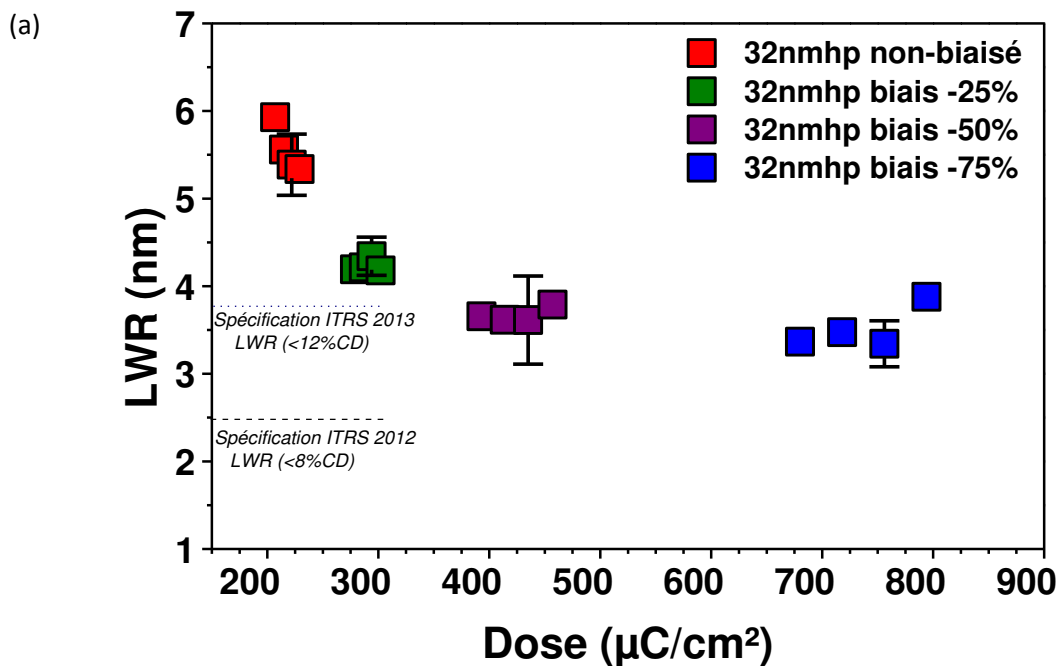


Fig. III.15 : Représentation de $f_3(r)$ en fonction de la distance radiale pour $p = 3$, $r_0 = 10$ et $K = 3$

Une telle fonction a le mérite de ne présenter que 3 constantes à déterminer. Dans le cas d'un outil à faisceau formé, les PSF devraient pouvoir s'écrire en remplaçant le premier terme usuellement décrit à l'aide d'une distribution gaussienne par une fonction du type de f_3 . Une vérification expérimentale serait de mise. Mais il faudra probablement également revisiter la méthode de détermination expérimentale des PSF décrite par Rio pour la partie relative à la distribution des électrons primaires, c'est-à-dire établir les fonctions qui permettent d'extraire les 3 grandeurs caractéristiques d'une fonction telle que f_3 à partir de mesures de CD d'espace en fonction de la dose.

d) Evolution de la rugosité de ligne

Les figures III.16 (a) et (b) représentent respectivement les variations de LWR en fonction de la dose d'exposition pour 4 doses différentes pour chacun de nos cas de motifs (dont une à la dose exposée la plus proche de la D2S) et les variations de LWR en fonction du CD de la ligne mesurée.



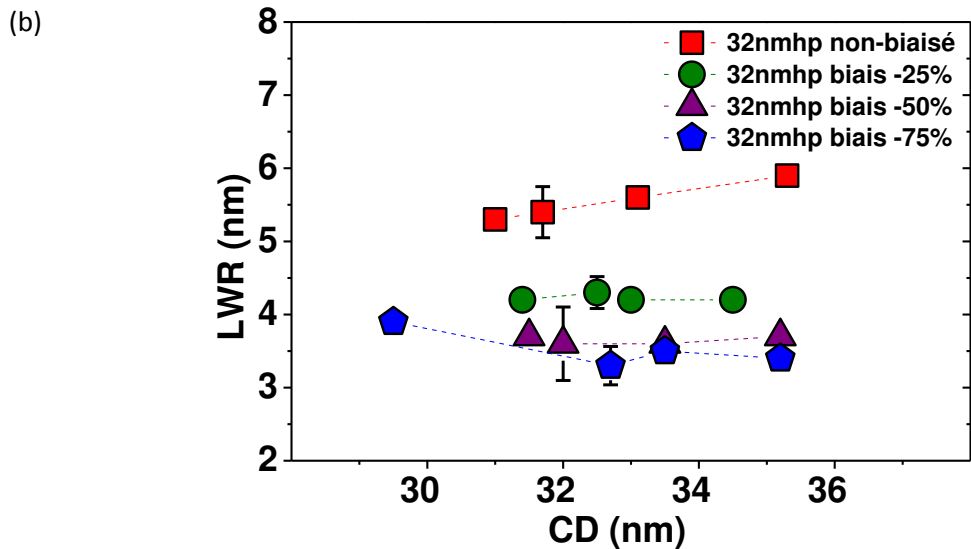


Fig III.16 : (a) Evolution de la rugosité de ligne en fonction de la dose pour chacun des cas de motifs envisagés. Les points comportant les barres de dispersion sont les points exposés les plus proches de la D2S, ces barres de dispersion représentent la dispersion de LWR calculée avec la méthode de Student pour 3 mesures à des endroits différents des motifs avec un intervalle de confiance de 95%. (b) Evolution précédente de LWR cette fois ci en fonction du CD de la ligne.

D'après la figure III.16.a, au fur et à mesure que l'on augmente le biais négatif des motifs et la dose d'exposition, on peut voir que le LWR tend à diminuer vers une valeur limite inférieure proche de 3.4 nm. D'après la figure III.16.b, on peut voir que le LWR est quasiment constant au sein d'un même cas de biais dans la zone $CD_{visé}$ à plus ou moins 10% près (soit de 28.8 à 35.2 nm)

L'utilisation du biais négatif permet de travailler dans des conditions où l'image aérienne est améliorée et à de plus fortes doses d'exposition. Cela permet de réduire en même temps deux des composantes de la variance de rugosité de ligne, plus précisément celle relative au bruit grenaille et celle relative au logarithme normalisé de la pente de l'image aérienne (NILS). Il n'est donc pas surprenant d'arriver à réduire en partie la rugosité de ligne en utilisant cette stratégie d'exposition.

L'ITRS ne donne des spécifications que pour la valeur de LWR des lignes, on peut néanmoins s'intéresser à l'évolution du LER gauche et droit et de la corrélation des bords ρ en fonction de la dose pour les différents cas de biais étudiés (figure III.17).

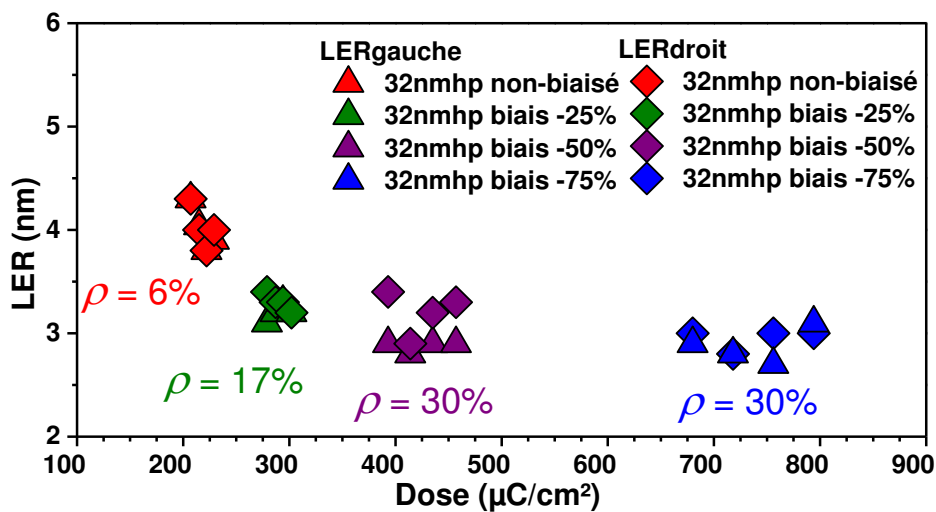


Fig. III.17 : Evolution du LER gauche et droit en fonction de la dose pour chaque cas de biais. Le coefficient de corrélation des bords ρ est la valeur moyenne de corrélation obtenue au sein de chaque cas de biais.

La figure III.17 montre que l'évolution du LER gauche et droit est similaire à celle observée pour le LWR. De plus, on peut observer l'augmentation du coefficient de corrélation des bords à mesure que l'on augmente le biais négatif. Bien que le LER diminue avec la modification de deux composantes qui le constitue, le bruit grenaille et le NILS, on peut désormais s'intéresser à la dépendance du LER avec le bruit grenaille (ou rapport bruit sur signal). Vérifions si le LER moyen des bords évolue linéairement avec le rapport bruit sur signal.

Dans notre cas, l'utilisation d'un outil à faisceau formé avec un pixel d'exposition long de 1250nm et de largeur assimilée au CD à exposer conduit à un nombre d'électrons déposé considérable et l'incertitude de déposer un électron dans un tel pixel est quasiment insignifiante quel que soit les doses d'exposition que l'on a expérimentalement (de l'ordre de 0.1%). Ainsi, pour mieux représenter le niveau de bruit relatif à la génération du bord du motif, considérons qu'une portion du bord de notre motif est déterminée par le dépôt d'électrons sur une portion de 5 nm dans le sens de la largeur du motif à exposer et 1 nm dans le sens de la longueur de la ligne (cf. figure III.18), cela revient à considérer une dose « quasi-linéique ». De cette façon pour les doses d'exposition que l'on a effectivement utilisées, le niveau de bruit grenaille varie de 12 à 6 pourcents. C'est bien entendu une approximation, mais le bruit grenaille « vrai » n'est pas directement calculable.

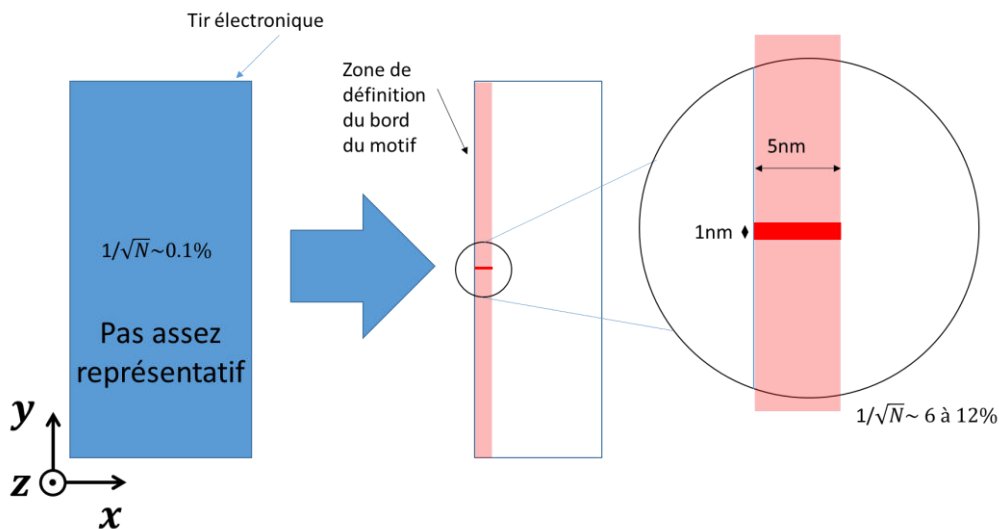


Fig. III.18 : Niveau de bruit grenaille à l'échelle du pixel d'exposition et à l'échelle d'un pixel de 1 nm par 5 nm

La figure III.19 présente l'évolution du LER moyen en fonction de la racine de l'inverse du nombre d'électrons calculé pour les doses d'exposition des figures précédentes et rapporté à une surface de 1 nm par 5 nm.

Un test de Student pour la régression linéaire réalisée en figure III.19 donne pour l'ordonnée à l'origine et la pente des valeurs de statistique t de 5.5 et 6.5 respectivement. De plus, avec un niveau de confiance de 99% la valeur de T_{student} obtenue à $16 - 2 = 14$ degrés de liberté est de 2.97 (inférieur aux deux statistiques t) et confirme la significativité du R^2 de la régression. On a donc une relation de corrélation entre le LER moyen et le bruit grenaille. Bien entendu, les motifs exposés dans notre cas ne permettent pas de faire évoluer le LER (ou LWR) seulement avec le bruit grenaille.

Intéressons-nous à présent à la valeur limite inférieure de rugosité atteinte par la stratégie d'écriture. On peut voir que pour les cas de biais -50 et -75% on atteint une valeur minimale de de LWR (respectivement LER) quasi identique d'environ 3.4nm (respectivement 2.8nm). Néanmoins, il faut largement augmenter la dose, respectivement $435 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ et $756 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, pour passer du cas de biais -50% au cas -75% à la dimension visée de 32 nm, en conséquence la composante du bruit grenaille

dans la valeur de rugosité continue de diminuer mais l'on n'observe plus de diminution de rugosité expérimentalement.

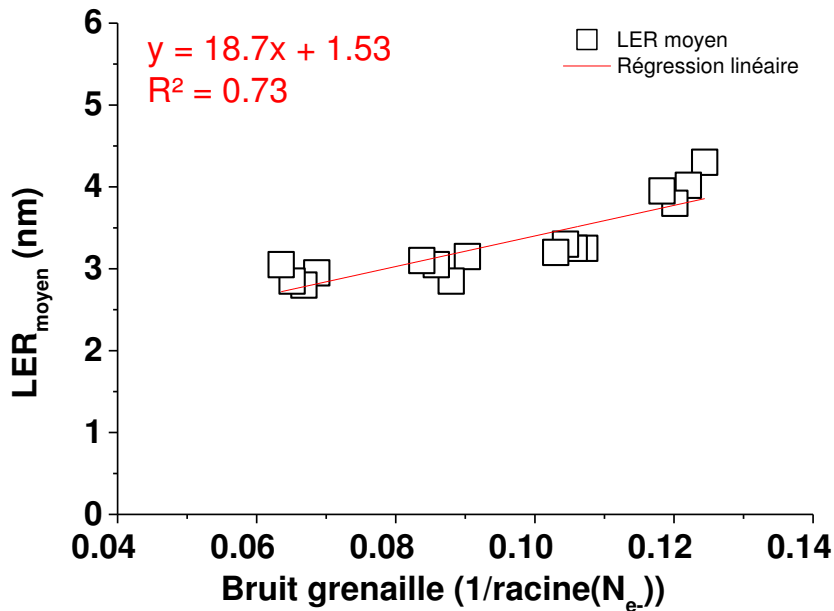


Fig. III.19 : Evolution du LER en fonction du bruit grenaille pour un pixel de 1 nm par 5 nm et la régression linéaire associée

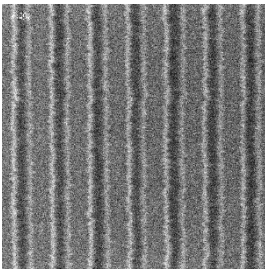
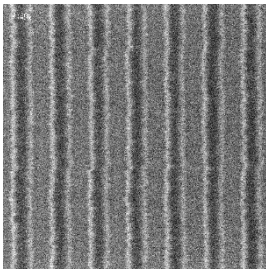
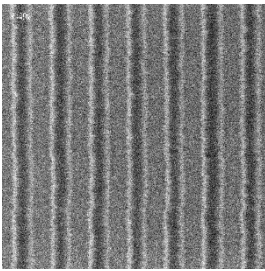
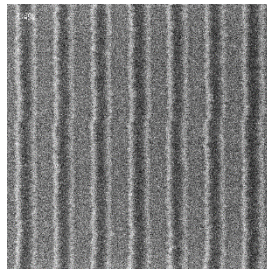
Il se peut donc que l'on soit confronté à un autre phénomène limitant la réduction de LWR/LER à de plus fortes doses. Les travaux de T. Kozawa ^[III.12] présentant des simulations d'exposition en lithographie à UV extrêmes de résine à des très fortes doses suggèrent que la limite basse de rugosité atteignable proviendrait de la concentration en photo-générateur d'acide (PAG). Cette dernière devient limitante dans le cas d'expositions à fortes doses. Il est donc possible dans notre cas que la composante de rugosité liée au bruit grenaille soit plus réduite dans le cas de biais à -75% mais que l'exposition à de plus fortes doses ne puisse pas conduire à une valeur de LWR/LER plus basse à cause d'une concentration en PAG trop faible.

On pourrait envisager une expérience pour vérifier les résultats de Kozawa, il faudrait obtenir pour un même polymère de résine des formulations avec de plus fortes concentrations de PAG (compensées par des plus fortes concentrations de base pour limiter la variation de sensibilité de la résine). Cependant l'auteur souligne que cette mesure est probablement limitée puisque la présence de PAG impacte négativement les cinétiques de dissolution des chaînes polymères de la résine lors du développement et augmente conséquemment le LWR. Cette limite basse de LWR/LER obtenue est peut-être également une limitation en provenance des outils de métrologie.

Le tableau III.5 montre les images CD-SEM au CD le plus proche de 32 nm réalisées à partir des 4 cas de motifs avec leurs doses d'exposition, les valeurs de LWR associées et la réduction effective de LWR mesurée. La figure III.20 quant à elle représente les PSD de LWR associées aux cas du tableau III.5.

La comparaison des résultats en matière de LWR pour le cas standard (non-biaisé) et les cas de biais -25%, -50% et -75% montre que la stratégie d'écriture permet de diminuer le LWR d'environ 20, 35 et 39% respectivement, au détriment de la dose d'exposition qui augmente d'un facteur d'environ 1.3, 2.0 et 3.3 respectivement (cf. valeurs tableau III.4). L'observation des PSD de LWR permet de constater que le biais négatif permet de réduire le LWR sur toute la gamme spectrale d'étude mais surtout dans le domaine des composantes basses fréquences de LWR. On peut également voir d'après ces PSD de LWR que le biais -75% n'apporte qu'un gain très modéré comparé au biais -50%.

Tableau III.5 : LWR et réduction de LWR en fonction du biais pour des motifs de CD proche de 32nm

Cas	32nmhp - non biaisé	32nmhp - biais -25%	32nmhp - biais -50%	32nmhp - biais -75%
Image				
Dose	222 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$	294 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$	435 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$	756 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$
LWR	5.4 \pm 0.3nm	4.3 \pm 0.2nm	3.5 \pm 0.5nm	3.3 \pm 0.3nm
Réduction LWR		20.4%	35.2%	38.8%

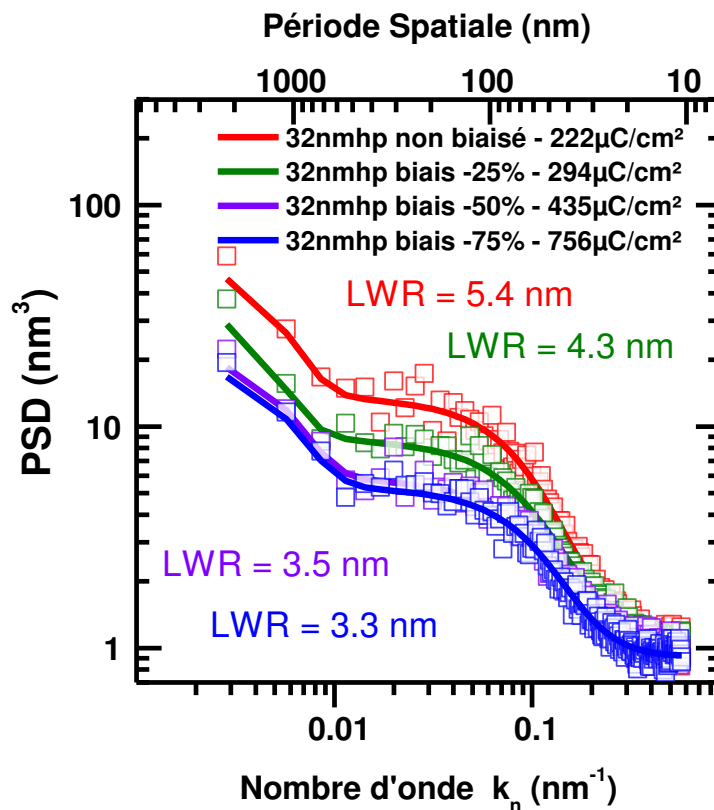


Fig. III.20 : PSD de LWR pour les lignes de CD 32nm réalisées avec nos 4 cas de motifs

Comme on a pu le voir dans le chapitre II section 5.3.5, le raccord des tirs électroniques introduit une déformation dans la partie des très basses fréquences étudiées et la forme de la PSD est plutôt horizontale dans cette zone quand l'on omet ces effets de raccords. Une telle tendance à être horizontale suggère que la composante basse fréquence de rugosité est dominée par des phénomènes aléatoires (non-corrélés) tels que le bruit grenaille électronique, l'incertitude sur l'activation d'un PAG, l'incertitude sur la déprotection des chaînes polymères de la résine et l'incertitude sur la solubilisation de chaînes polymères suffisamment déprotégées. En somme, pour un développement identique en

supposant que la résine est homogène en concentration de PAG et que les chaînes polymères sont statistiquement dans des conformations identiques, il n'est pas surprenant de pouvoir réduire cette composante de basse fréquence de rugosité en diminuant le bruit grenaille électronique. La partie haute fréquence des PSD est également diminuée progressivement avec le biais négatif, cette dernière est cependant moins diminuée que la partie basse fréquence.

Conclusion :

La stratégie d'écriture visant à réduire la zone d'exposition permet avec notre équipement Vistec SB3054 de diminuer fortement la rugosité de ligne et d'améliorer grandement la stabilité du procédé au détriment du temps d'exposition. Il serait également intéressant de pouvoir dissocier les contributions du bruit grenaille et de l'amélioration de NILS dans l'évolution de LWR, mais cette information n'est pas accessible avec les motifs testés ici. Pour cela, on pourrait envisager d'apporter une dose de fond aux motifs qui présentent du biais négatif afin de faire descendre le NILS à la même valeur que dans le cas d'exposition sans biais. Cependant, s'il on veut un CD constant à 32 nm la dose déposée par l'exposition des motifs biaisés se retrouvera nécessairement diminuée par l'apport d'une dose de fond. En effet puisque la résine a un comportement à seuil et que l'image aérienne correspond à la répartition spatiale de l'énergie déposée, deux images aériennes identiques réalisées à la même énergie d'accélération doivent nécessairement conduire aux mêmes résultats d'exposition. Il faudrait idéalement avoir plusieurs outils de lithographies à différentes énergie d'accélération et dont on connaît les PSF. Ainsi on pourrait exposer des motifs similaires avec les deux outils et ajuster les NILS qui sont normalement différents à différentes énergies d'accélération à l'aide d'une dose de fond. On pourrait conséquemment réaliser des comparaisons à NILS constant mais à doses différentes et observer s'il on peut obtenir des rugosités plus faibles.

Finalement, le meilleur compromis temps-qualité de la lithographie semble être l'utilisation d'un biais de -50 % pour réaliser nos structures denses de L/S 32nmhp (pas 64 nm et CD 32 nm), ainsi le procédé est presque deux fois plus stable et le LWR est diminué d'environ 35% pour un temps d'exposition multiplié par environ 2.

2.3. A l'énergie d'accélération de 5 keV

Dans cette section nous allons nous intéresser à l'effet du biais négatif sur les performances lithographiques à l'énergie de 5 keV et ce de façon analogue à la section 2.2, d'abord en présentant des résultats de simulation et ensuite expérimentaux obtenus avec le prototype Mapper Asterix, finalement les deux types de résultats seront confrontés.

2.3.1. Résultats de simulation à 5 keV

Dans cette partie sont abordés l'effet de l'utilisation de motifs biaisés sur le contraste d'image (NILS) et la dose à la cote requise pour exposer nos 4 cas de motifs avec et sans biais. Pour ce faire, on considère que le faisceau de notre outil Asterix d'accélération 5kV est unique et représenté par une double fonction gaussienne. Les PSF générées par les 5 meilleurs faisceaux (selon les critères de sélections de MAPPER Lithography) de l'équipement Asterix sont mesurées chaque semaine sur un empilement résine (37nm)/SiARC(22nm)/SoC(170nm). C'est un empilement légèrement différent de celui sur lequel on a réalisé les expositions, c'est-à-dire résine (37nm)/SiARC(30nm)/SoC(95nm).

a) Choix de la PSF

On assimile la largeur à mi-hauteur de la distribution des électrons incidents à la spécification donnée par l'équipementier Mapper soit 25nm. L'écart-type β de la distribution des électrons rétrodiffusés et η sont quant à eux déterminés à l'aide du logiciel Casino 3.2

Les PSF par simulations ici ont été réalisées pour un empilement équivalent à l'empilement d'étude présenté, c'est-à-dire résine(37nm)/SiARC(30nm)/SoC(95nm)/Si. Et on a simulé l'interaction de l'empilement avec 10 millions d'électrons. On extrait l'information de β et η pour une tranche de PMMA située au milieu du film.

Les matériaux comme le SiARC et SoC sont matérialisés dans Casino par leurs densités et leurs compositions élémentaires et épaisseurs.

SiARC : densité = 1.76 g.cm⁻³, composition élémentaire (%) = C[14.8], H[12.3], O[48.1], Si[24.7]
 SoC : densité = 1.29 g.cm⁻³, composition élémentaire (%) = C[51.5], H[42.4], O[6.1]

On procède de façon analogue à la section 2.2.1 et on détermine l'élargissement du faisceau dans la résine pour une simulation à l'énergie d'accélération de 5 keV avec un faisceau de largeur à mi-hauteur de 25 nm.

Tableau III.6 : PSF au haut et bas de la résine à 5 keV

PMMA 37nm sur SiARC(30nm)/SoC(95nm) @5keV	α (nm)	β (nm)	η
PSF _{top}	12.3	165	0.38
PSF _{bot}	13.1	161.5	0.53

L'application numérique fourni $\alpha_{\text{élargissement } 5\text{keV}} \approx 4.5$ nm

Cette valeur de 4.5 nanomètres du paramètre d'élargissement du faisceau dans la résine à l'énergie de 5 keV est supérieure à celle obtenue à l'énergie de 50 keV qui est de 3.6 nanomètres (cf. section 2.2.1). C'est conforme à ce qui est rapporté dans la littérature. Finalement, on utilisera la PSF décrite dans le tableau III.7 pour les simulations.

Tableau III.7 : PSF 5 keV (PMMA 37nm sur SiARC(30nm)/SoC(95nm))

α_{faisceau} (nm)	α_{total} (nm)	β_{mid} (nm)	η_{mid}
10.6	11.5	165.0	0.46

β_{mid} et η_{mid} sont les constantes issues de l'extraction de la PSF au milieu du film de PMMA

Cette PSF est convoluée aux 4 cas de motifs envisagés précédemment.

b) Paramètres de la résine

La dose-to-clear (D_0) de la résine est calculée à partir de sa valeur expérimentale obtenue à 50kV (à savoir 100 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$) d'après les considérations développées dans la thèse de D. Rio ^[III.13], qui montrent que le contraste reste inchangé en modifiant l'énergie tension d'accélération et que D_0 est divisée par un facteur d'environ 7 en passant de 50 keV à 5keV (la valeur passe donc de 100 à 14.3 $\mu\text{C}.\text{cm}^{-2}$). En effet, il est expérimentalement impossible avec l'outil Asterix d'obtenir une courbe de

contraste à 5 keV puisque ce dernier n'expose que des motifs de $3 \times 3 \mu\text{m}$ rendant impossible toute mesure ellipsométrique avec les équipements disponibles en salle blanche du CEA-LETI.

c) Extension spatiale des motifs simulés

Dans notre cas de simulation à 5keV, on a choisi des motifs larges de $1.5 \mu\text{m}$ pour limiter le temps de calcul mais quand même prendre en compte toute la contribution des électrons rétrodiffusés, c'est-à-dire une extension spatiale des motifs $> 6\beta$ dans la simulation afin de se placer dans un cas similaire au cas expérimental avec l'outil MAPPER Asterix. Cela permet d'étalonner le modèle de simulation avec le cas expérimental. Les images aériennes des expositions par simulation sont représentées en figure III.21 et les données de D2S relative et NILS obtenues sont listées dans le tableau III.8.

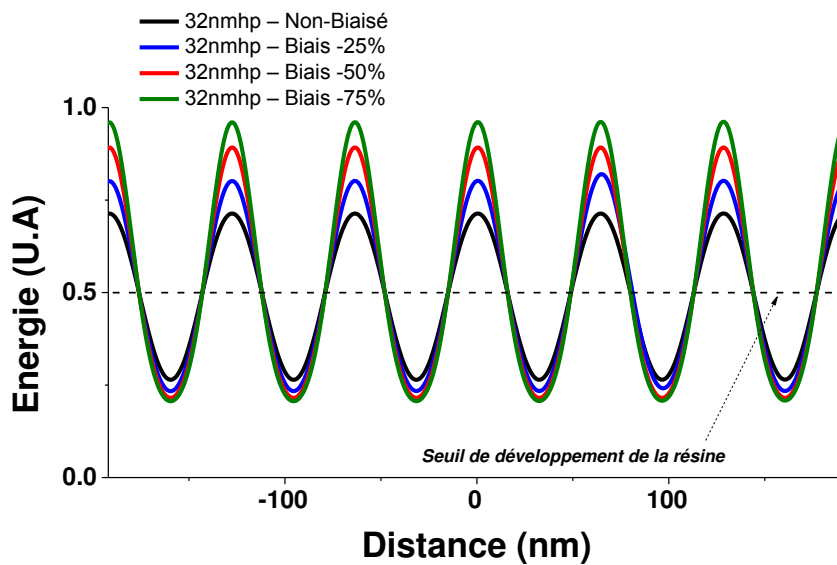


Fig. III.21 : Images aériennes simulées pour les 4 cas de motifs 32nmhp envisagés (biais de 0, -25, -50% et -75% respectivement)

Tableau III.8 : D2S relative et NILS simulés à 5 keV

	D2S relative	NILS
32nmhp – non-biaisé	1.0	2.0
32nmhp – biais -25%	1.4	2.5
32nmhp – biais -50%	2.2	3.0
32nmhp – biais -75%	4.5	3.2

Dans le cas d'une lithographie basse énergie simulée avec une taille de faisceau constante (fixée à 25 nm FWHM) l'utilisation de motifs 32nmhp biaisés négativement (respectivement -25%, -50% et -75%) permet de prédire une augmentation de la dose d'un facteur multiplicatif de respectivement 1.4, 2.2 et 4.5 par rapport au cas de lithographie sans biais. Les valeurs de NILS deviennent respectivement 2.5, 3.0 et 3.2 contrairement au 2.0 obtenus dans le cas standard. On peut également voir que le dernier cas de biais négatif à -75% n'apporte que très peu d'amélioration par rapport au cas de biais de -50% en matière de NILS.

On peut donc s'attendre expérimentalement à une amélioration croissante des performances lithographiques en matière d'EL et de LWR à mesure que le biais négatif augmente d'après ces quelques résultats de simulation.

2.3.2. Résultats expérimentaux à 5 keV

Dans cette section, on a réalisé l'exposition des motifs considérés précédemment sur notre résine d'étude directement déposée sur l'empilement de SiARC/SoC. Pour ce faire, on a exposé des plages de doses pour chacun des motifs considérés. Cependant, dans le cas du MAPPER Asterix, le nombre de doses différentes exposées par motifs est largement réduit (6 à 8 doses exposées selon les cas) comparé à des expositions réalisées avec le Vistec SB3054.

En effet, le nombre restreint 252 motifs écrits par chaque faisceau du MAPPER Asterix et leur très petite taille ($3 \times 3 \mu\text{m}$) oblige à exposer de nombreux motifs à la même dose afin de pouvoir ensuite générer suffisamment d'images CD-SEM à une dose donnée pour établir finalement une mesure sans bruit de LWR et la PSD associée. De plus, compte-tenu des problèmes de reproductibilité d'une exposition à une autre (en dose et LWR) présentés à la fin du chapitre II, il a donc été difficile d'obtenir exactement le CD de 32nm. Conséquemment, les résultats de LWR présentés dans cette section auront été mesurés dans les cas de biais -50% et -75% sur des lignes de CD légèrement plus grands et extérieurs à la zone de $\text{CD}_{\text{visé}}$ plus ou moins 10 pourcents. On a néanmoins obtenu dans ces cas-ci les valeurs de la D2S et d'EL dont l'erreur sur la valeur est inférieure à 20%.

a) Evolution du CD en fonction de la dose et latitude en énergie

De façon analogue à la section 2.2.1, on obtient l'EL grâce à l'évolution du CD en fonction de la dose. Le tableau III.9 regroupe les valeurs expérimentales de D2S (pour obtenir un CD de 32nm), les D2S relatives et les EL obtenues lors de ces lithographies. Dans les cas de biais à -50 et -75%, les D2S sont obtenues par extrapolation.

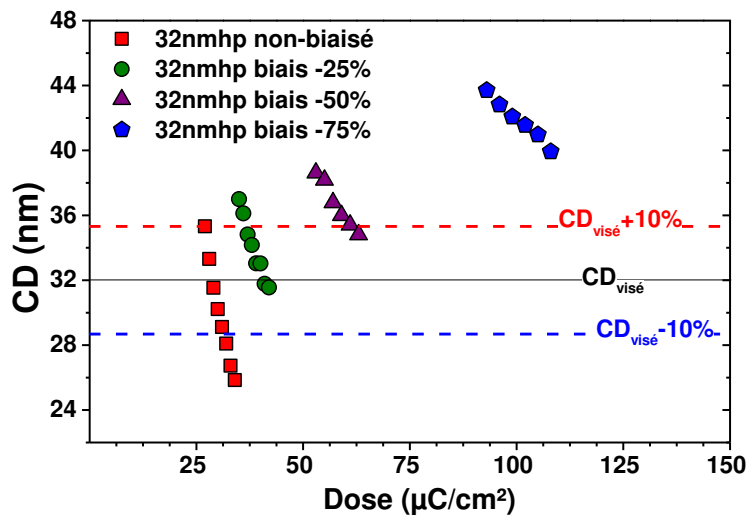


Fig. III.22 : Evolution du CD de ligne en fonction de la dose d'exposition pour les différents cas de biais

Tableau III.9 : D2S, D2S relative et EL obtenues avec les données expérimentales

Cas	D2S ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$)	D2S relative	EL _{+10%} (%)
32nmhp – non-biaisé	29.0 ± 1.6	1.0	15.9 ± 3.2
32nmhp – biais -25%	41.0 ± 2.7	1.4	18.7 ± 1.4
32nmhp – biais -50%	65.5 ± 4.5	2.3	23.2 ± 5.9
32nmhp – biais -75%	142.0 ± 5.1	4.9	24.1 ± 4.5

D'après le tableau III.9, l'utilisation de la stratégie de biais négatif implique une augmentation de la D2S à 41, 65.5 et 142 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ (pour les cas de biais de -25%, -50% et -75% respectivement) contrairement aux 29 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ obtenus avec le cas standard. Cette augmentation relative de la dose expérimentale requise est très proche des valeurs obtenues par simulation (rappel : respectivement 1.4, 2.2 et 4.5). Cela conforte la robustesse du modèle de simulation pour un dépôt d'énergie réalisé par un faisceau de type gaussien.

b) Confrontation des résultats de simulation et expérimentaux en matière d'EL

De manière analogue à la section 2.2.2 de ce chapitre, il est intéressant de voir s'il on peut accorder le modèle de simulation avec l'expérimentation en matière d'EL. Pour cela, réalisons la régression linéaire des valeurs d'EL obtenues expérimentalement en fonction des valeurs de NILS obtenues en simulation (figure III.23)

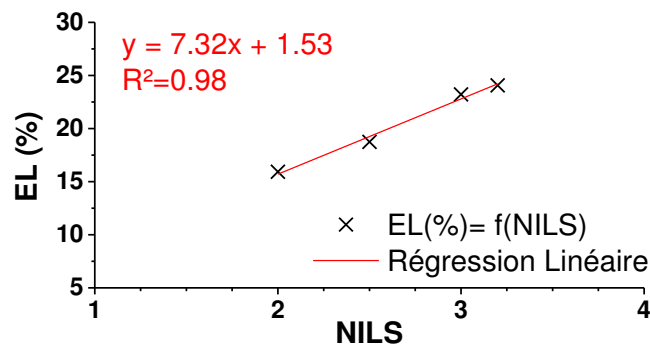


Fig. III.23 : Evolution de l'EL en fonction du NILS et la régression linéaire associée dans le cas du MAPPER Asterix

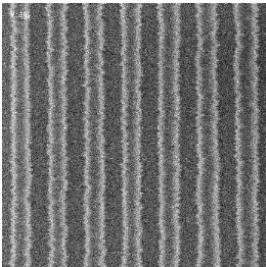
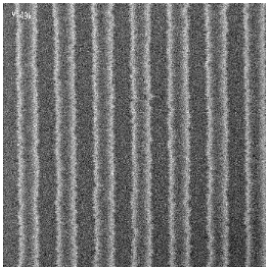
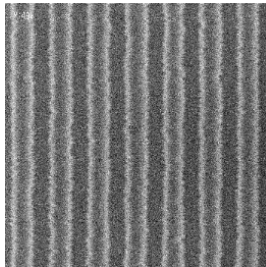
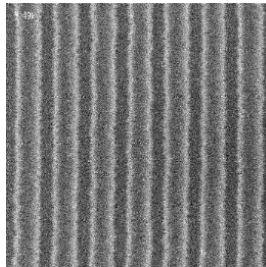
De la même façon que pour les simulations à 50 keV, les valeurs d'EL semblent évoluer linéairement avec le NILS. L'erreur sur la pente et l'ordonnée à l'origine de la régression sont respectivement de 0.54 et 1.46. En les prenant en compte, on peut voir que l'on n'est pas si éloigné des attentes que l'on peut avoir pour ce genre de courbe à savoir avoir une ordonnée à l'origine inférieure à 0. Compte tenu des coefficients de la régression, il se peut que l'évolution linéaire soit plus cohérente dans ce cas plutôt que dans celui de la section 2.2.2. Il faudrait idéalement compléter ce travail en réalisant plus de points à des biais intermédiaires.

c) Evolution de la rugosité de ligne

Contrairement aux résultats présentés avec le Vistec SB3054 de la section 2.2.2 où l'on présentait l'évolution de LWR au sein de chaque cas de biais en fonction de la dose, les résultats de LWR avec le MAPPER Asterix seront uniquement présentés comme le LWR des motifs ayant le CD le plus proche de 32nm obtenus pour chacun des cas de biais. Le tableau III.10 montre les images CDSEM réalisées pour les 4 cas de biais avec leurs doses d'exposition, les valeurs de LWR associées et la réduction effective de LWR mesurée.

L'utilisation du biais négatif comme stratégie d'écriture de motifs visant à reproduire des L/S 32nmhp avec l'outil MAPPER Asterix permet en effet de réduire le LWR de nos motifs après révélation. On peut cependant noter que la réduction de LWR est quasi inexistante avec le premier cas de biais à -25%, ce qui est surprenant compte-tenu de l'amélioration du NILS observé en simulation, néanmoins il est possible que le NILS réel sur plaque soit plus bas que celui simulé et que la composante de rugosité relative à celui-ci n'ait pas varié significativement. Les cas suivant de biais négatifs -50% et -75%, eux, permettent une réduction de LWR de respectivement 21% et de 31%. La figure III.24 quant à elle représente les PSD de LWR associées aux cas du tableau III.10.

Tableau III.10 : LWR et réduction de LWR en fonction du biais pour des motifs

Cas	32nmhp - non biaisé	32nmhp - biais -25%	32nmhp - biais -50%	32nmhp - biais -75%
	CD = 31.5	CD = 31.8	CD = 34.8	CD = 39.8
Image				
Dose	29 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$	41 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$	63 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$	110 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$
LWR	4.6nm	4.5nm	3.6nm	3.1nm
Baisse LWR		2.2%	20.8%	31.4%

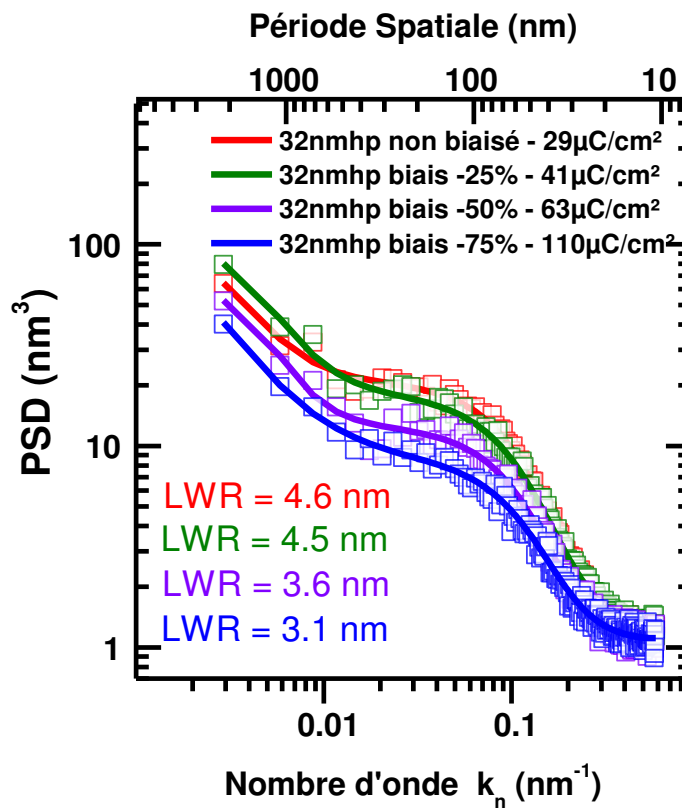


Fig. III.24 : PSD de LWR associées aux 4 cas de biais de motifs L/S 32nmhp

L'observation des PSD de LWR permet de constater que le biais négatif permet de réduire le LWR sur toute la gamme spectrale d'étude et de façon plus prononcée dans le domaine des composantes basses fréquences. On peut également voir d'après ces PSD de LWR qu'il existe une « remontée » des valeurs de la PSD pour les périodes spatiales les plus grandes (> 500nm). C'est assez surprenant puisque dans le cas du MAPPER Asterix il n'y a normalement pas de raccords de zones d'exposition avec une période spatiale de cet ordre de grandeur, contrairement au Vistec SB3054. On peut rappeler, dans le cas du MAPPER Asterix que le faisceau dépose des électrons tous les 4 nanomètres. Les phénomènes de raccord devraient être masqués puisque la taille du faisceau est bien plus grande que le pas d'écriture. Néanmoins, le MAPPER Asterix est un prototype et souffre de fortes

vibrations mécaniques dans toutes les directions (XYZ) au niveau du portoir de la plaque. Des mesures de vibrations mécaniques sont réalisées par l'équipementier à chaque exposition, un exemple d'évolution cumulative des erreurs de positionnement en fonction de la fréquence est donné en figure III.25 pour les 3 axes d'un repère orthonormé.

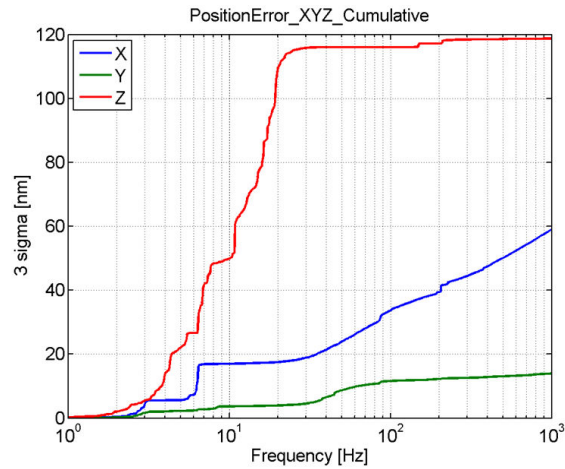


Fig. III.25 : Erreur de position cumulative du support de la plaque en fonction de la fréquence pour les axes XYZ.

Ces phénomènes vibrationnels nous avaient déjà fait choisir de lithographier nos motifs de lignes dans le sens pour lequel les vibrations sont les plus fortes afin de limiter l'incertitude de positionnement dans le sens orthogonal aux lignes et donc de limiter l'influence sur le LWR/LER. Ils sont supposés provenir des systèmes de pompes associés au prototype MAPPER Asterix et présentent des vibrations prononcées vers 8-10 Hz et 30 à 40 Hz. Au final, ces phénomènes vibrationnels impliquent des déplacements de plusieurs nanomètres voire de la dizaine de nanomètres dans le sens orthogonal aux lignes et sont encore plus prononcés dans le sens des lignes. Compte tenu de l'écriture très rapide des motifs, il faut vérifier si ces phénomènes vibrationnels mécaniques peuvent éventuellement impacter notre lithographie. La connaissance des conditions d'écriture de nos motifs, c'est-à-dire : du courant du faisceau ($\approx 25 \text{ pA}$), du pas d'écriture (4 nm), de l'ordre d'écriture des pixels d'une ligne et de la dose permet de déterminer la célérité apparente du faisceau dans la direction de la ligne. Ainsi on peut faire correspondre à des périodes spatiales que l'on retrouve dans nos PSD des fréquences correspondantes au balayage du faisceau (cf. tableau III.11).

Tableau III.11 : Correspondance période spatiale d'un motif – fréquence vibrationnel du support

Motif	Dose	Célérité du faisceau (sens de la longueur de la ligne)	Période spatiale de la PSD	Correspondance fréquentielle
32nmhp sans biais (8 pixels de large)	29 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$	1419 $\mu\text{m}/\text{s}$	2152 - 500 nm	660 -2650 Hz
32nmhp -75% biais (2 pixels de large)	110 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$	2297 $\mu\text{m}/\text{s}$	2152 - 500 nm	1067 – 4270 Hz

Les correspondances en fréquences des vibrations mécaniques ainsi obtenues sont suffisamment élevées pour que l'écriture d'une seule ligne n'induisse pas une déformation caractéristique des lignes pour les périodes spatiales d'étude (un pic dans les PSD), néanmoins comme l'on écrit environ 50 couples espaces/lignes (extension spatiale du motif divisé par le pas de répétition), il est possible que les vibrations mécaniques induisent un dépôt de dose parasite à longue distance (un flou) et déforment nos PSD.

Ces phénomènes vibrationnels sont d'autant plus visibles que la célérité du faisceau est faible. Lors de l'utilisation de la technique de détermination expérimentale des PSF de Rio, on peut observer pour les plus fortes doses d'exposition (de l'ordre de $10000 \mu\text{C}/\text{cm}^2$) un phénomène d'inversion de polarité au niveau de la zone exposée par le balayage direct du faisceau (la résine initialement positive est réticulée grâce à la grande quantité d'électrons déposés, cf. figure III.26).

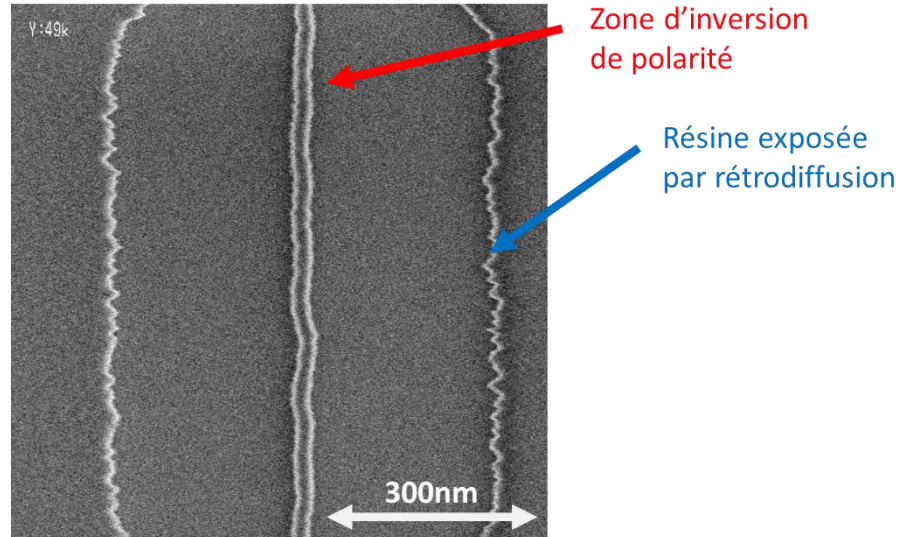


Fig. III.26 : Image CD-SEM d'un motif de ligne exposé à des doses extrêmes ($>10000 \mu\text{C}/\text{cm}^2$) la résine d'étude voit sa tonalité inversée et réticule dans la zone directe du balayage du faisceau. A environ 300 nm on obtient un bord de résine qui résulte de l'exposition du film par les électrons rétrodiffusés

Pour les plus fortes doses d'exposition, on peut noter la présence de déformations en forme de vague pour la ligne centrale. L'étude du LWR et LER de ces lignes de tonalité inversée, notamment de l'accord de la mesure des vibrations mécaniques du capteur utilisé par MAPPER et celle obtenue en analysant le LER fait l'objet d'un article à paraître.

Finalement, on peut également regarder l'évolution du LER gauche et droit, du coefficient de corrélation et du bruit grenaille en fonction du biais négatif (tableau III.12)

Tableau III.12: LER gauche et droit et coefficient de corrélation pour chaque cas de biais

Cas	32nmhp - non biaisé	32nmhp - biais -25%	32nmhp - biais -50%	32nmhp - biais -75%
LERgauche	3.3 nm	3.2 nm	2.6 nm	2.3 nm
LERdroit	3.2 nm	3.1 nm	2.6 nm	2.3 nm
Corrélation des bords	0.8 %	-0.9 %	2.4 %	3.6 %
Bruit grenaille 5 keV (4*4 nm)	18.6 %	15.6 %	12.4 %	9.5 %
Bruit grenaille 5 keV (1*5 nm)	33.2 %	28.0 %	22.2 %	17.1 %
Bruit grenaille 50 keV (1*5 nm) (cf. 2.2.2)	12.0 %	10.4 %	8.6 %	6.4 %

Les données du tableau III.12 montre que dans le cas du MAPPER Asterix, les bords des lignes restent non corrélés avec l'utilisation du biais négatif. Cette non-corrélation suppose que les phénomènes aléatoires prévalent même en augmentant largement la dose d'exposition. Il se peut

également que la façon d'écrire les motifs joue également sur la non-corrélation des bords. Avec le MAPPER Asterix on dépose de la dose tous les 4 nanomètres et il faut un très grand nombre de tirs pour réaliser une ligne alors qu'avec le Vistec un seul tir permet de réaliser un motif de grandes dimensions.

Le bruit grenaille pour un pixel de 4 par 4 nanomètres à 5 keV est assez fort. S'il on le ramène à un pixel d'exposition de 1 par 5 nanomètres pour comparer au cas à l'énergie de 50 keV, celui-ci augmente et devient presque 3 fois plus important à 5 keV qu'à 50 keV. Néanmoins, des valeurs similaires de LWR à 5 et 50 keV ont été obtenues.

d) Conclusion sur le biais à l'énergie d'accélération de 5 keV avec le MAPPER Asterix

Comme avec l'outil Vistec SB3054, l'utilisation de motifs biaisés négativement permet d'augmenter la stabilité du procédé et de diminuer le LWR au détriment de la dose d'exposition et donc du temps d'écriture. Dans le cas du MAPPER Asterix passer d'un cas sans biais aux cas - 25%, - 50% et -75% diminue le nombre de pixels écrits par respectivement 1/4, 1/2 et 3/4. Le temps d'exposition peut être calculé en supposant que le temps de latence entre l'écriture de 2 pixels successifs est constant quel que soit le biais utilisé, ainsi on peut considérer que l'on obtient le temps relatif d'exposition des cas avec biais par la multiplication de la dose relative par le nombre relatif de pixels d'exposition. On trouve pour les cas de biais -25%, -50% et -75% respectivement $1.4 \cdot 0.75 = 1.05$, $2.3 \cdot 0.5 = 1.15$ et $4.9 \cdot 0.25 = 1.225$. Au final on s'aperçoit que le temps d'exposition est relativement peu augmenté.

3. Conclusions du chapitre III

L'utilisation de la stratégie d'écriture de biais négatif semble prometteuse. En effet, elle a permis la réduction notable de la rugosité avec les deux outils d'exposition à ma disposition. Une réduction de LWR d'environ 38% est obtenue avec le Vistec SB3054 et d'environ 31% avec le MAPPER Asterix. La baisse de LWR s'opère également sur toute la gamme fréquentielle d'étude mais semble plus prononcée dans le domaine des basses fréquences et c'est une bonne chose car c'est un domaine habituellement peu impacté par les traitements post-lithographie du LWR. La meilleure valeur obtenue reste cependant supérieure aux recommandations de 1.7 nm de l'ITRS pour les nœuds technologiques inférieurs à 20 nm. Mais le LWR obtenu le plus faible avec les deux équipements est d'environ 3.2 nm ce qui montre que l'on peut réaliser des lithographie fournissant de très basses rugosités (plus faibles que les 4-5 nm obtenus généralement en EUV)

Cette stratégie a de plus le mérite d'apporter une stabilité accrue du procédé lithographie électronique au détriment de la dose d'exposition. Cependant, cela ne se traduit pas forcément par une nette augmentation du temps d'exposition notamment dans le cas du MAPPER Asterix. Dans le cas du Vistec SB3054, l'augmentation du temps d'exposition est plus marquée. En effet la mise en forme du faisceau réduit sa taille et donc la quantité d'électrons déposés par unité de temps (la densité de courant du faisceau est constante avant la mise en forme).

On a pu également vérifier que le modèle de simulation décrit par D. Rio dans ces travaux de thèse permet de prédire convenablement les performances lithographiques en matière de dose et de latitude en énergie dans le cas du MAPPER Asterix mais moins dans le cas du Vistec SB3054. La condition qui permet un bon accord entre la simulation et l'expérience est d'avoir une connaissance précise de la PSF de l'outil d'exposition (notamment pour la distribution des électrons primaires).

Il apparaît également qu'une limite basse de LWR est obtenue et ce bien que l'on continue à augmenter la dose et les performances en matière d'EL et donc de NILS avec le Vistec SB3054. On peut donc supposer que le LWR d'une résine dépend dans une certaine mesure du NILS et de la dose (ce qui est référencé dans la littérature) mais qu'il existe également un autre phénomène qui rentre en jeu et qui limite la réduction maximale de LWR obtenu après lithographie. Il est supposé dans la littérature, que cette limite basse de LWR proviendrait d'une concentration en PAG limitante.

En somme, il est tout à fait envisageable de considérer cette approche d'écriture biaisée négativement comme une façon alternative d'écrire un motif dans la résine et non pas uniquement comme une stratégie de correction des effets de proximité, cela est d'autant plus vrai avec les outils à faisceau gaussiens qui sont peu sensibles à l'augmentation du temps d'écriture par cette technique. Et cela sera un avantage indéniable pour les solutions de lithographie à multiples faisceaux d'électrons puisqu'une redondance d'écriture entre les faisceaux pourrait permettre de déposer plus de dose par unité de temps.

Bibliographie du chapitre III

- [III.1]: D. Rio, « Lithographie électronique basse énergie : application aux multifaisceaux », Thèse de doctorat de l'université de Grenoble, pp 62-66, (2010)
- [III.2]: F. Ozdemir *et al.*, Precision electron beam microfabrication, *Journal of Vacuum Science and Technology*, 10 : 1008-1011, (1973)
- [III.3]: M. Parikh, Self-consistent proximity effect correction technique for resist exposure (SPECTRE), *Journal of Vacuum Science and Technology*, 15 : 931, (1978)
- [III.4]: M. Parikh, Proximity effects in electron lithography : magnitude and correction techniques. *IBM Journal of Research and Development*, 24(4) : 438-451, (1980)
- [III.5]: G. Owen and P. Rissman, Proximity effect correction for electron beam lithography by equalization of background dose. *Journal of Applied Physics*, 54 : 3573, (1983)
- [III.6]: D. Rio, « Lithographie électronique basse énergie : application aux multifaisceaux », Thèse de doctorat de l'université de Grenoble, p 134, (2010)
- [III.7]: K. Yamazaki *et al.*, Edge-Enhancement Writing for Electron Beam Nanolithography, *Japanese Journal Of Applied Physics Vol. 42*, pp. 3833–3837, (2003)
- [III.8]: L. Martin, « Méthodes de corrections avancées des effets de proximité en lithographie électronique à écriture directe : Application aux technologies sub-32nm », thèse de doctorat de l'INSA de Lyon, p 72, (2011)
- [III.9]: K. Keil *et al.*, Resolution and total blur: Correlation and focus dependencies in e-beam lithography, *Journal of Vacuum Science & Technology B* 27, 2722, (2009)
- [III.10]: C. A. Mack, *Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication*, John Wiley & Sons, Ltd., p 375, (2007) (ISBN: 978-0-470-01893-4)
- [III.11]: C. A. Mack, *Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication*, John Wiley & Sons, Ltd., p 402, (2007) (ISBN: 978-0-470-01893-4)
- [III.12]: T. Kozawa, Lower Limit of Line Edge Roughness in High-Dose Exposure of Chemically Amplified Extreme Ultraviolet Resists, *Japanese Journal Of Applied Physics Vol. 51* (2012) 06FC01
- [III.13]: D. Rio, « Lithographie électronique basse énergie : application aux multifaisceaux », Thèse de doctorat de l'université de Grenoble, p 106, (2010)

Chapitre IV.

Procédés visant à réduire la rugosité de ligne de résine

Dans le chapitre précédent, nous avons pu voir que malgré l'utilisation d'une stratégie d'écriture électronique biaisée, la rugosité de ligne après lithographie reste largement au-dessus des spécifications de l'ITRS. Dans ce chapitre, nous proposons d'autres stratégies pour permettre la réduction de rugosité à des valeurs proches de celles préconisées par l'ITRS. Tout d'abord, nous allons discuter de l'effet du développement. Dans une deuxième partie, nous avons étudié l'impact de traitements post-lithographiques tels que des recuits et des traitements à base de plasmas. Finalement le dernier point traite d'une combinaison des meilleures stratégies de réduction de rugosité envisagées au cours de ces travaux de thèse. Il est à noter que les travaux réalisés dans ce chapitre ne concernent que des expositions réalisées avec l'outil d'exposition VISTEC SB3054DW.

1. Effet du développement

Après l'exposition, la plaque contenant les motifs à révéler est recuite dans un four de la piste à laquelle l'outil de lithographie est lié, on procède alors au recuit après exposition (PEB). Ce recuit permet la diffusion et l'activation de la réaction de déprotection par les acides libérés pendant l'étape de lithographie. Une fois recuite, la plaque est ensuite introduite dans le module de développement où cette dernière est mise en contact avec la solution de développeur (dans notre cas une solution de TMAH à la concentration massique de 2.38% et à la température de 21°C). L'arrêt du développement est réalisé en diluant progressivement le milieu avec de l'eau déionisée et la plaque est séchée en évacuant l'eau résiduelle par centrifugation à de fortes vitesses de rotation (environ 3000 tours par minute).

Dans le cas d'une résine à amplification chimique positive, la résine est quasiment insoluble quand elle n'est pas exposée et c'est l'exposition qui va permettre de réaliser la déprotection des fonctions ester du polymère de résine, ces dernières sont transformées en partie en fonctions acide carboxylique (départ du groupement alkoxy), on parle de ratio de déprotection.

On a donc une diminution du poids moléculaire de la chaîne polymère de la résine ce qui est favorable à l'augmentation de la solubilité de la chaîne partiellement déprotégée. Il est néanmoins important de noter que la présence de fonctions acides carboxyliques est très probablement un large

atout dans l'augmentation de la solubilité des chaînes partiellement déprotégées. En effet, la nature d'acide faible des acides carboxyliques va les faire réagir avec la base forte que sont les ions hydroxydes de la solution de développement. Ainsi, on obtient des chaînes polymères chargées grâce à la présence de multiples anions carboxylates, ce qui a pour effet d'augmenter la solubilité de ces chaînes dans un solvant polaire tel que l'eau.

La description ci-dessus permet d'appréhender simplement le développement des motifs de résine. De plus, le développeur n'a accès qu'à la surface de la résine et peut éventuellement diffuser à travers la matrice polymère grâce au volume libre existant entre les chaînes. On a donc un front de résine qui se déplace au fur et à mesure que le développement se fait. Cependant, il faut garder à l'esprit que le profil final de nos motifs dépend de la quantité de résine solubilisée et donc du temps pendant lequel la solution de développeur est en contact avec la résine.

Le bord de résine ainsi obtenu est probablement un mélange entre des chaînes de degrés de déprotection différents qui n'ont pas eu le temps d'être solubilisées.

Il n'est pas question dans cette section de développer un modèle permettant de simuler l'éventuelle composante de rugosité de ligne apportée par le développement mais plutôt de vérifier que l'étape de développement a expérimentalement un effet sur la rugosité de ligne. Ainsi on veut vérifier que l'équation I.21 du chapitre I présentant une expression de la variance de LWR comporte bien un terme relatif à l'étape de développement, σ_{dev}^2 .

Pendant mes travaux, j'ai pu comparer le développement de référence de type statique à un développement de type dynamique mis en place par l'équipementier dans une autre piste SOKUDO DUO. Cette dernière a été installée plus tard pendant les travaux de thèse et sera utilisée pour réaliser les développements du futur équipement multifaisceaux de MAPPER Lithography.

1.1. Méthodes de développement

Il y a aujourd'hui deux méthodes de développement : statique et dynamique. De nos jours, le développement dynamique est plus largement utilisé pour deux principales raisons :

- L'impact environnemental est réduit car on utilise des volumes de solution inférieurs à ceux utilisés avec les méthodes statiques
- L'obtention d'une meilleure uniformité de développement

1.1.1. Cas statique

Les développements statiques ont été réalisés dans la piste SOKUDO RF3 disponible dans la salle blanche du CEA-LETI. La solution de développeur est déposée sur la plaque à l'aide d'une buse (ou nozzle en anglais) située au bout d'un bras mobile, le détail exact de la procédure de dépôt de la solution de développeur ne peut être dévoilé par soucis de confidentialité néanmoins une représentation schématique est donnée en figure IV.1. Une fois déposée, la solution est immobile au-dessus de notre film de résine pour une durée précise appelée *puddle time* (que l'on note dans la suite t_{puddle}).

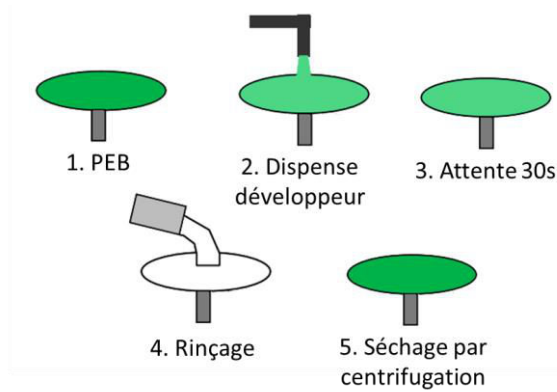


Fig. IV.1 : Représentation schématique de la succession du PEB et procédé de développement

1.1.2. Cas dynamique

De manière analogue à la section 1.1.1, par soucis de confidentialité ni la forme des buses, ni la méthode de dépôt ne peuvent être présentées. Dans le cas du développement dynamique utilisé, la procédure est presque identique à celle du cas statique représenté en figure IV.1. Il faut néanmoins noter que la dispense (étape 2) est réalisée avec la plaque en rotation, l'étape 3 d'attente est remplacée par une phase où la plaque est toujours en rotation mais sans dispense, dernièrement l'étape 4 est également réalisée avec rotation de la plaque.

On peut cependant préciser que 2 paramètres sont désormais accessibles pour l'étape 3 dans ce cas dynamique, la vitesse de rotation de la plaque et le temps équivalent au temps de résidence du bain du cas statique de la section 1.1.1 qui correspond au temps de l'étape 3 (on le notera t_{puddleeq}).

1.2. Cas étudiés

Pour le cas de développement statique, on a choisi de tester le temps t_{puddle} préconisé par le fournisseur de la résine de 30 secondes et un temps réduit à 15 secondes. Le développement dynamique testé a été implémenté sur la piste SOKUDO DUO par l'équipementier et doit proposer des performances lithographiques similaires au développement de référence (il possède comme paramètres t_{puddleeq} égal à 15 secondes et une vitesse de rotation de 30 tours par minute). Il est important de préciser que dans le cas du procédé de développement dynamique la vitesse de rotation implique une limitation dans la valeur du paramètre t_{puddleeq} . En effet, un t_{puddleeq} trop important conduira inévitablement à l'assèchement de la plaque pendant l'étape ce qui peut être préjudiciable pour les performances de la lithographie. Les trois procédés seront notés respectivement « Dev 30s », « Dev 15s » et « Dev dyn eq ».

Les sections suivantes discutent des effets de ces procédés de développement sur la dose à la côte, la latitude en énergie et la rugosité de ligne pour des motifs de L/S 32nmhp et ce en considérant également la stratégie d'écriture vue au chapitre III. Seuls les cas d'écriture non-biaisée et avec un biais de -50% sont abordés. En effet, le premier consiste à l'écriture conventionnelle en lithographie électronique, le second quant à lui s'est révélé être le meilleur compromis entre le temps d'exposition et la valeur de rugosité obtenue après lithographie (pour l'outil Vistec SB3054) au chapitre III. Les lithographies réalisées pour cette section ont été réalisées pour chaque procédé de développement deux fois.

1.3. Résultats expérimentaux

Effet sur la dose :

L'effet sur la dose (pour obtenir un CD de ligne de 32nm) du changement de procédé de développement est présenté dans le tableau IV.1.

Tableau IV.1 : Effet des procédés de développement sur la dose à la côte

	Dose à la côte ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$)		
	Dev 30s (référence)	Dev 15s	Dev dyn eq
32nmhp – non-biaisé	202 \pm 14	210 \pm 10	209 \pm 9
32nmhp – biais -50%	335 \pm 18	354 \pm 17	343 \pm 12

Les trois procédés de développement utilisés ne semblent pas montrer de différences significatives en matière de dose à la côte, que ce soit pour le cas de lithographie sans biais et pour le cas avec un biais de -50%.

Effet sur la latitude en énergie

L'impact sur la latitude en énergie est présenté dans le tableau IV.2.

Tableau IV.2 : Effet des procédés de développement sur la latitude en énergie

	EL (%)		
	Dev 30s (référence)	Dev 15s	Dev dyn eq
32nmhp – non-biaisé	9.8 \pm 2.6	10.3 \pm 1.7	8.8 \pm 1.7
32nmhp – biais -50%	27.5 \pm 4.7	25.7 \pm 3.8	22.9 \pm 2.5

Les trois procédés de développement utilisés ne semblent pas impacter significativement la stabilité du procédé de lithographie, que ce soit pour le cas de lithographie sans biais et pour le cas avec un biais de -50%.

Effet sur la rugosité de ligne

Les résultats relatifs à l'effet des 3 procédés de développements considérés sur la rugosité de ligne globale et la répartition fréquentielle de la rugosité (obtenue à l'aide de l'équation II.9 du chapitre II) sont présentés dans la figure IV.2

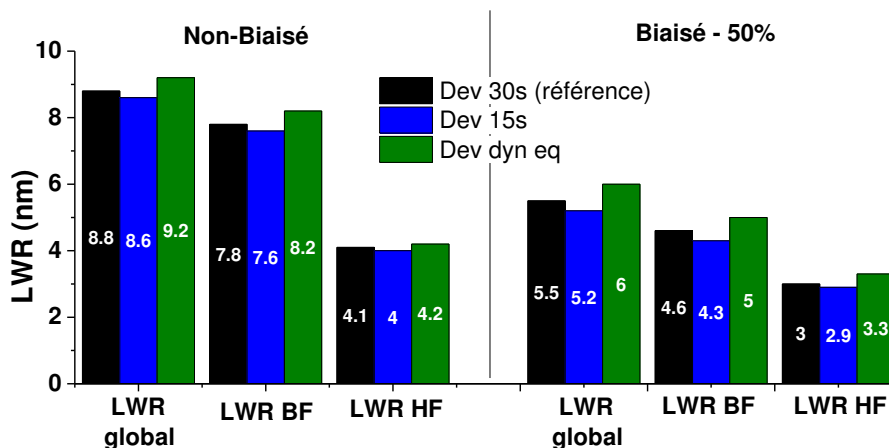


Fig. IV.2 : Influence du procédé de développement sur le LWR et impact sur la répartition fréquentielle de la rugosité

Dans notre cas, la méthode de développement semble n'avoir qu'un faible impact sur les rugosités de ligne. Une tendance similaire est observée pour les lithographies sans et avec biais, bien que l'effet soit plus prononcé pour la lithographie avec un biais de -50%. Une réduction du temps de puddle en développement statique conduit à une légère diminution de quelques pourcents de la rugosité de ligne et ce sont principalement les composantes basses fréquences de rugosité qui sont impactées. Dans les deux cas de lithographie, l'utilisation d'un développement dynamique avec un temps de puddle équivalent à 15 secondes tend au contraire à augmenter la rugosité (jusqu'à 9% d'augmentation dans le cas de la lithographie avec biais) sur tout le domaine fréquentiel.

1.4. Synthèse et conclusion sur les méthodes de développement

Les trois procédés de développement utilisés, à savoir 2 développements statiques de t_{puddle} de 30s et 15s et un développement dynamique (t_{puddleeq} de 15s et une vitesse de rotation de 30 tours par minute) semblent apporter des performances très similaires en matière de dose à la côte, latitude en énergie et LWR pour les 2 cas de motifs L/S 32nmhp avec et sans biais.

Cependant, dans le cas d'une lithographie biaisée à -50%, apportant un plus fort contraste en énergie, on peut voir que l'effet du développement sur la rugosité est plus prononcé que dans le cas sans biais.

Pour un biais de motif donné, on peut considérer que le NILS est constant. De plus, les résultats expérimentaux montrent que la variation de dose est négligeable avec les procédés de développement considérés donc la composante de bruit grenaille peut être considérée comme constante. Cela laisse suggérer que le LWR est bien dépendant du procédé de développement et que l'équation 1.25 possède bien un terme relatif à l'étape de développement.

Dans cette étude, le procédé de développement n'a pas été optimisé mais d'après les résultats ci-dessus celui-ci a un impact non négligeable sur la rugosité. Pour aller plus loin il serait intéressant de procéder à l'étude de l'effet sur le LWR des paramètres disponibles avec un développement de type dynamique à savoir le temps t_{puddleeq} et la vitesse de rotation.

2. Procédés post-lithographie

Pour permettre la diminution de la rugosité de ligne des motifs de résine après lithographie, de nombreux procédés de lissage après lithographie ont été proposés dans la littérature. Parmi ces traitements, on trouve des recuits (appelés parfois hardbake)^[IV.1], des traitements à base de plasma (UV seuls ou bien plasma complet)^[IV.2-9], des recuits sous vapeurs de solvants^[IV.1], de l'implantation ionique^[IV.10], des recuits sous exposition à un laser^[IV.11] et bien d'autres^[IV.12].

Les techniques de traitement post-lithographie de la rugosité de ligne des motifs de résine utilisés dans ces travaux de thèse sont des traitements thermiques et des traitements à base de plasma. Les sections suivantes discutent des modifications physico-chimiques des films de résine et des motifs de résine traités avec ces techniques.

Dans cette partie, toutes les mesures de rugosité ont été réalisées avec des boites de mesure de 1.076 μm afin d'éviter l'impact sur le LWR du phénomène de recouvrement des tirs électroniques avec le Vistec SB3054 observé au chapitre II.

2.1. Traitements thermiques

L'intérêt d'un tel traitement est simple, l'apport d'énergie sous forme thermique permet d'augmenter la mobilité des chaînes polymères de la résine. Le gain en mobilité pourrait éventuellement permettre de lisser la rugosité de nos motifs de L/S obtenus après lithographie.

2.1.1. Mise en place des recuits

Tous les recuits de cette section ont été réalisés dans les fours disponibles dans la piste SOKUDO RF3 du CEA-LETI. L'utilisation de ces fours plutôt que d'une simple plaque chauffante repose sur plusieurs critères : le chauffage dans ces fours est réalisé sans contact avec la plaque de silicium, la température et son uniformité à l'échelle d'une plaque 300mm sont très bien contrôlées (d'écart-types respectifs $3\sigma \leq 0.5^\circ\text{C}$ et $3\sigma \leq 0.2^\circ\text{C}$) et finalement la plaque est refroidie à 23°C avant sa réintroduction dans son conteneur. Cela signifie que contrairement à l'utilisation d'une plaque chauffante « classique », on limite drastiquement toute contamination particulaire supplémentaire induite par la manipulation de la plaque (sortie du conteneur, manipulation et réintroduction dans le conteneur) tout en ayant un procédé très bien contrôlé et reproductible.

2.1.2. Les températures caractéristiques des résines

Au chapitre II, on a pu entrevoir les températures caractéristiques T_{gpoudre} , T_{gfilm} et T_d de la résine d'étude respectivement 118°C , 145°C et 190°C obtenues respectivement avec une mesure de calorimétrie différentielle à balayage (DSC), d'analyse mécanique dynamique (DMA) et d'analyse thermogravimétrique (ATG). Il est primordial de connaître ces températures caractéristiques du matériau polymère de résine quand on veut pouvoir réaliser des traitements thermiques de ce dernier.

La température de déprotection thermique est souvent un maximum à ne pas dépasser sans quoi la déprotection de la résine va engendrer le dégazage de molécules. Dans le cas de motifs de lignes de résine, il est probable qu'un recuit utilisant une température supérieure à la T_d conduise une perte significative de volume et donc de dimension critique et de hauteur des motifs, ce qui serait préjudiciable pour les étapes telles que la gravure plasma.

Les recuits réalisés par l'analyse thermogravimétrique et les recuits dans les fours de la piste SOKUDO RF3 diffèrent par trois points majeurs comme le précise le tableau IV.3.

Tableau IV.3 : Différences opérationnelles des recuits dans les fours d'ATG et de la SOKUDO RF3

Equipement	ATG	Four SOKUDO RF3
Atmosphère	Diazote	Air
Rampe de température	$10^\circ\text{C}/\text{min}$	Non connue, mais introduction échantillon dans l'enceinte à la température de consigne (supposée très grande)
Etat matériau	Massif (poudre)	Film nanométrique

L'appareillage d'ATG disponible au CEA-LETI n'a pas permis pendant les travaux de thèse de réaliser les analyses sous un flux diazote/dioxygène de composition relative respective 80/20. Cela aurait été plus représentatif des recuits des films et motifs de résine réalisés dans les fours de la piste SOKUDO RF3 (réalisés sous une atmosphère identique à celle de la salle blanche). Il paraît

vraisemblable que la présence de dioxygène à des fortes températures (>100°C) ait une influence sur la dégradation thermique du matériau de résine. De plus, le dispositif d'ATG ne permet pas non plus de réaliser le chauffage du matériau (rampe de température) dans des conditions similaires à celles du four.

Il apparaît donc que la température de dégradation obtenue avec l'ATG dans notre cas ne semble pas assez représentative de nos recuits de films et motifs de résine. C'est pour cela que la détermination de la température de déprotection de notre résine sous forme de film est réalisée d'une autre manière comme décrit dans la prochaine section.

2.1.3. Température de déprotection de films de résine

Afin de déterminer notre température de déprotection thermique de nos films de résine, j'ai procédé à l'étude de l'effet de recuits de 5 minutes de films de 60 nm d'épaisseur aux températures de 110, 130, 150, 160, 170, 190 et 210°C avec un suivi à la fois de l'épaisseur du film et du spectre d'absorption infrarouge après recuit. Afin d'éviter toute influence d'un éventuel historique thermique de la résine et pour se placer dans un cas plus représentatif de la mise en œuvre dans un procédé de microélectronique, chaque recuit a été réalisé sur une plaque de résine sur silicium différente.

2.1.3.1. Effet des recuits sur l'épaisseur du film de résine

Dans cette section, l'épaisseur des films de résine a été mesurée avant et après recuit. Les résultats de la variation d'épaisseur en fonction de la température sont présentés de manière relative en figure IV.3.

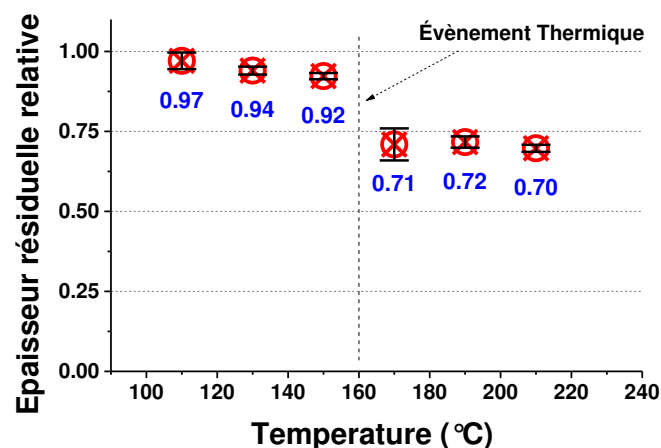


Fig. IV.3 : Evolution de l'épaisseur relative de film de résine avec la température. Les barres de dispersions ont été calculées avec la méthode de Student avec un intervalle de confiance de 99%.

D'après la figure IV.3, on peut voir que pour les températures de 110, 130 et 150°C l'épaisseur après recuit diminue légèrement. Cependant dès que des températures supérieures à 170°C sont utilisées, l'épaisseur de film semble se stabiliser vers 70% de sa valeur initiale. Il est donc envisageable avec cette nette modification de l'épaisseur de film, qu'il y ait un évènement thermique entre 150°C et 170°C pour des recuits de 5 minutes.

2.1.3.2. Effet des recuits sur le spectre d'absorption infrarouge

Les figures IV.4 a, b et c présentent les spectres d'absorption infrarouge (normalisés à l'épaisseur) des films de résine de référence, recuits à 150°C/5min et 170°C/5min dans la SOKUDO RF3.

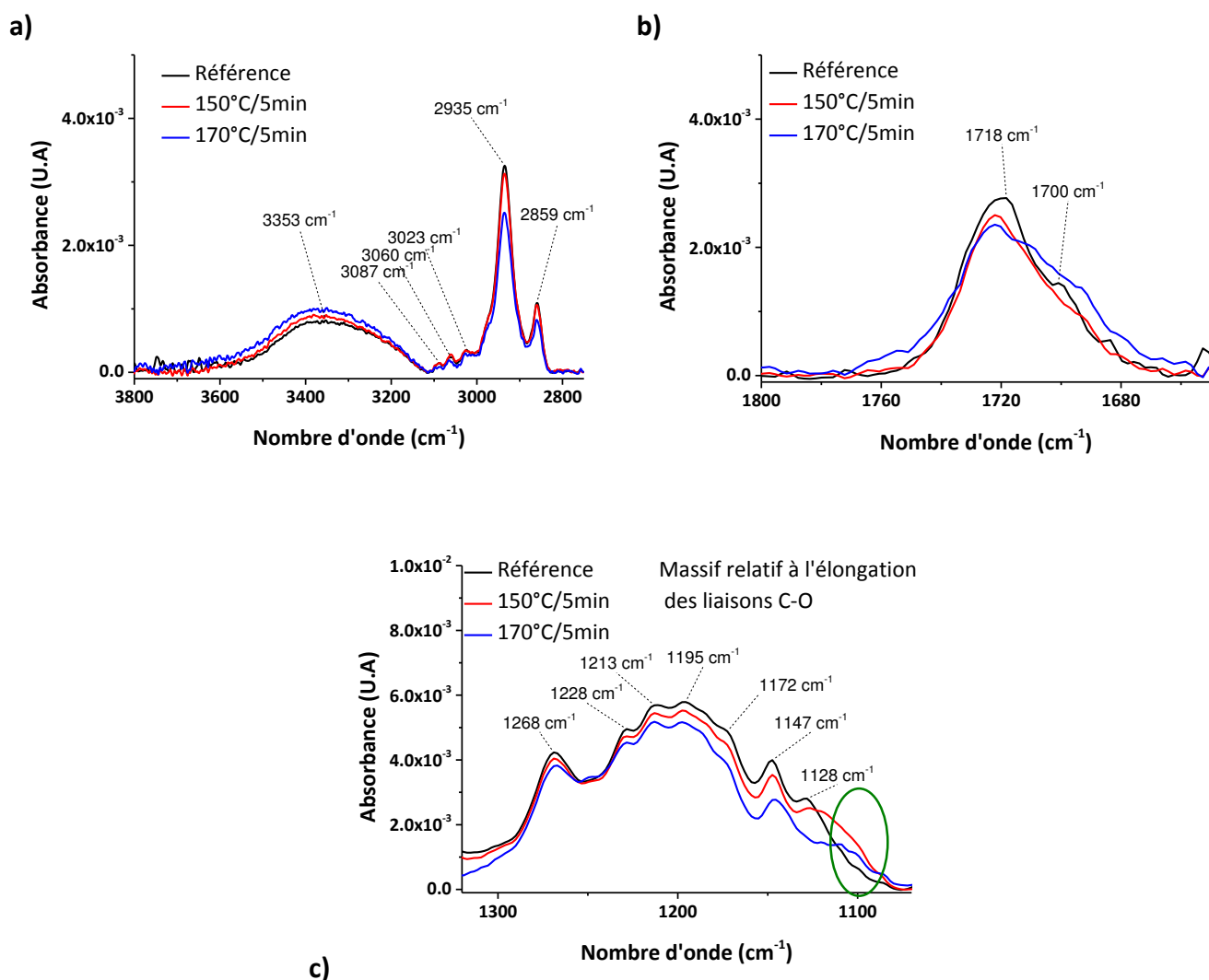


Fig.IV.4 : Spectres d'absorption infrarouge de la résine traitée thermiquement. a) Région d'élongation des liaisons OH et CH aromatiques et aliphatiques, b) Région d'élongation des liaisons C=O, c) Région d'élongation des liaisons C-O

Premièrement, l'observation des trois regroupements de spectres d'absorption IR de la résine avant et après recuits permet de voir que le traitement thermique de la résine à 150°C n'apporte pas de différences sensibles au spectre de la résine. Ces différences mineures pourraient être expliquées par le départ de molécule de solvant (PGMEA) emprisonnée dans la matrice polymère après le dépôt par centrifugation. Le PGMEA est un ester (cf. figure IV.5) dont la température d'ébullition est de 147°C [IV.13] à pression atmosphérique, son départ après un recuit de 5 minutes à 150°C semble cohérent. Un pic apparaît vers 1100cm⁻¹, ce dernier est supposé provenir de l'élongation de liaisons Si-O (référéncé à 1110 cm⁻¹) [IV.30] du substrat de silicium. En effet, la mesure résulte de la différence des spectres d'absorption obtenus avec résine déposée sur silicium moins la mesure sur une plaque de silicium vierge (une autre plaque du même lot), compte tenu de la très faible absorbance de la résine à cette fréquence, une faible variation du taux d'oxygène dans la plaque pourrait fausser la mesure.

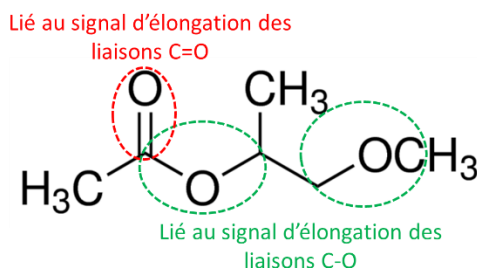


Fig. IV.5 : Représentation en formule topologique de la molécule de PGMEA.

Deuxièmement, le recuit à 170°C modifie plus notablement les pics d'absorption. On peut voir une légère augmentation d'intensité de la bande d'élongation des liaisons O-H (vers 3300 cm^{-1}) et une diminution d'intensité des bandes d'absorptions relatives aux liaisons C-H aliphatiques (2 pics vers 2935 et 2900 cm^{-1}), l'intensité des bandes relatives à l'élongation des liaisons C-H aromatiques restent elles non impactées. Dans la partie du spectre relative à l'élongation des fonctions carbonyles, on peut observer un massif probablement composé de 2 pics, un centré vers 1720 cm^{-1} (C=O ester) et le second de moindre intensité localisé vers 1700 cm^{-1} (C=O acide carboxylique). On peut noter une légère baisse de l'intensité du pic vers 1725 cm^{-1} et une légère augmentation d'intensité et l'élargissement du pic vers 1700 cm^{-1} . En ce qui concerne la partie relative à l'élongation des liaisons simples C-O observée entre 1320 cm^{-1} et 1100 cm^{-1} , l'utilisation d'un recuit à 170°C permet de diminuer l'intensité globale du massif ainsi que de faire disparaître le pic de plus faible nombre d'onde du massif (1128 cm^{-1}).

Finalement, les modifications apportées par un recuit à 170°C sur les spectres d'absorption IR laissent suggérer que l'on réalise le départ de groupements alkyles contenant également une liaison simple C-O tout en formant des fonctions acide carboxylique. La figure IV.6 permet de visualiser les modifications apportée par le recuit à 170°C sur la structure du polymère de la résine proposée au chapitre II, section 4.1.1.

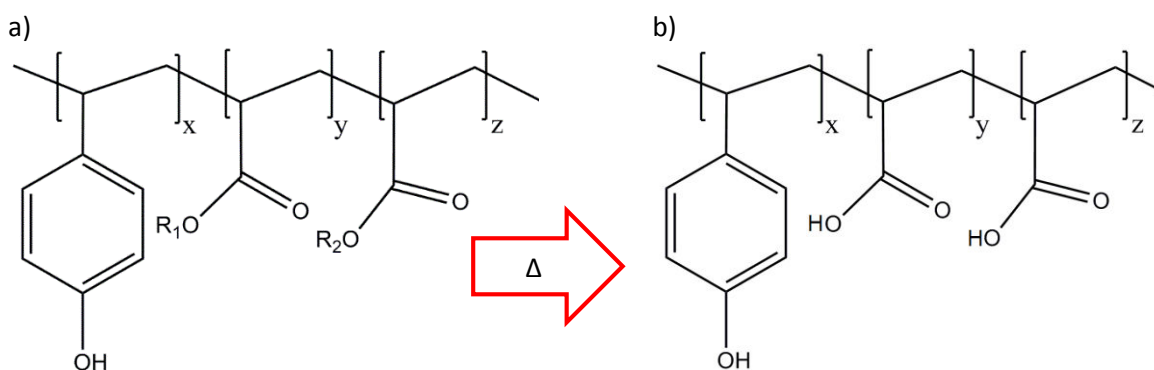


Fig. IV.6 : Représentations supposées de la résine après dépôt (a) et après un recuit à 170°C (b)

On peut de plus trouver dans la littérature ^[IV.14] que des fonctions acides carboxyliques formant des liaisons hydrogènes ont tendance à avoir leur fréquence de vibration déplacée vers les nombres d'ondes plus faibles, ce qui est tout à fait envisageable dans le cas d'un polymère solide présentant des fonctions hydroxyde, cela conforte l'élargissement du pic vers 1700 cm^{-1} observé.

2.1.3.3. Conclusion

Les résultats vus dans les sections précédentes semblent montrer qu'une modification du matériau de résine sous forme de film fin apparait entre 150°C et 170°C pour des recuits de 5 minutes. Ce résultat ne semble pas se conformer à la mesure d'ATG, qui fournissait une température de

déprotection de 190°C. De plus, il semble important de préciser que tout accord direct entre la température de déprotection fournie par une mesure d'ATG (dans nos conditions) et la baisse d'épaisseur significative observée de la résine en film fin se révélerait fortuit, car cela suppose que l'on omet la dépendance de la température de déprotection avec la rampe de la température de la mesure d'ATG comme le présente la figure IV.7.

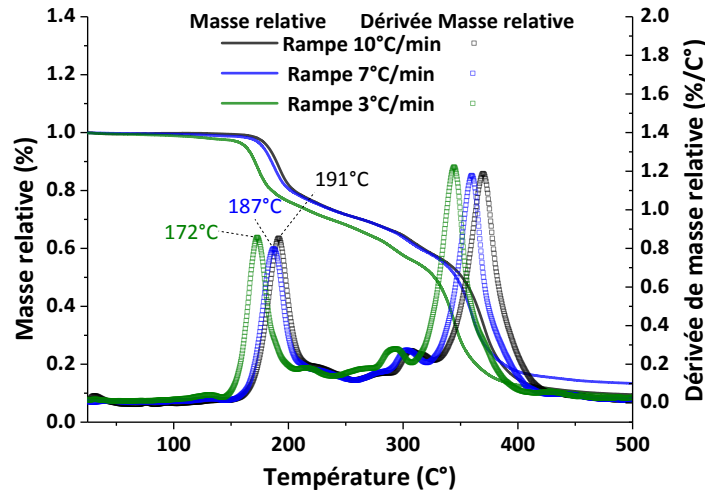


Fig. IV.7 : Evolution de la mesure d'ATG de la résine sous forme poudre et sous atmosphère inerte (N₂) avec la rampe de température utilisée

Il semble donc approprié pour nos études de recuits de motifs de résine de ne pas dépasser la température de 150°C pour 5 minutes afin d'éviter le phénomène de déprotection thermique de la résine.

2.1.4. Température de transition vitreuse

La température de transition vitreuse caractérise la température à partir de laquelle les propriétés de déformation d'un matériau polymère changent, en augmentant la température au-dessus de la T_g le matériau polymère passe d'un état vitreux à un état caoutchoutique. On peut trouver dans la littérature de nombreux articles utilisant des recuits afin de répondre à diverses problématiques techniques en microélectronique, par exemple la réduction du CD de trous de contact en réalisant le fluage de la résine dans les trous ^[IV.15], mais également à la génération de motifs L/S denses 32nmhp à l'aide de L/S non-denses (1:3) de rapport d'aspect élevé ^[IV.16] et ce à l'aide du fluage du matériau de résine afin de produire des dimensions structures de dimensions inaccessibles avec des techniques et/ou matériaux de lithographie plus anciens. On trouve également des travaux relatifs au traitement du LWR de motifs L/S de résine par des recuits, notamment les travaux de simulation de Cho *et al.* ^{[IV.17][IV.18]} qui montrent qu'il serait possible de réduire le LWR jusqu'à environ 2nm avec une large augmentation du CD de ligne initial à l'aide de recuits à des températures supérieures à la T_g de la résine. D'autres auteurs ^[IV.19] montrent qu'il est possible expérimentalement d'obtenir une réduction de LWR d'environ 11% avec des recuits proches de la T_g de leur résine.

Les différents auteurs de ces articles, qu'ils approchent le traitement de la résine par simulation ou expérimentalement, ne précisent cependant pas si la T_g utilisée est celle du matériau de résine massif (obtenue généralement avec une mesure de DSC) ou du matériau sous forme de film fin. Cette information est pourtant importante puisque l'on peut trouver dans la littérature ^[IV.20] que des films fins de PMMA, PS ou d'autres polymères déposés sur un substrat voient leur T_g dépendre de l'épaisseur du film, en l'occurrence augmenter ou diminuer lorsque les interactions avec le substrat

sont respectivement fortes ou faibles. Ce phénomène apparaît pour des épaisseurs très faibles, en général inférieures à 100 nm. Mais cette épaisseur seuil pour laquelle la $T_{g\text{film}}$ dérive du comportement du matériau massif dépend également du matériau polymère. La littérature suggère de plus, que la mobilité des chaînes est dépendante de leurs positions dans le film de polymère et qu'il est possible que les chaînes de la surface libre du film aient une T_g inférieure à celle du reste du film. Les traitements thermiques de motifs peuvent donc être sujets à des effets tridimensionnels (3 surfaces libres et une en contact avec le substrat) et avoir un comportement différent aux observations réalisées sur un matériau massif ou même sous forme de film fin.

Pour nos traitements de motifs de L/S de résine, on a désormais 3 températures caractéristiques. La température de déprotection de la résine sous forme de film fin apparaît entre 150°C et 170°C, un maximum de 150°C quel que soit le traitement paraît raisonnable. La mesure de T_g de la résine « massive » notée $T_{g\text{poudre}}$ est égale à 117°C environ et celle obtenue avec la DMA notée $T_{g\text{film}}$ est d'environ 145°C

Le cas du traitement thermique de lignes de résine est d'autant plus complexe que les lignes de résine ne sont probablement pas composées de la résine telle qu'elle a été déposée mais de chaînes de résine partiellement déprotégées dont le ratio de déprotection est variable entre le bord et le cœur de la ligne. Cette hypothèse paraît vraisemblable puisque les lignes de résine positive qui sont obtenues après lithographie électronique ont reçu une dose d'exposition non nulle (la rétrodiffusion des électrons joue un rôle important dans ce dépôt d'énergie dans les zones non directement exposées). Il est donc possible que la T_g moyenne de nos motifs de résine soit différente de la valeur obtenue par DSC ou DMA.

2.1.5. Effet des recuits sur la rugosité et la dimension critique

Les expériences de recuits ont été réalisées sur des motifs L/S 35nmhp de résine directement déposée sur silicium. Le protocole d'obtention des images des motifs est simple, un premier jeu de clichés CDSEM est réalisé sur une première partie des motifs de L/S pour obtenir les images fournissant les valeurs de CD et LWR de référence, la plaque est ensuite recuite à la température désirée, puis on réalise les images fournissant les valeurs après traitement dans une autre partie du motif non impactée par le CDSEM (un jeu de clichés impacte une zone longue d'environ 190 μm des motifs et les motifs lithographiés sont longs de 3 mm).

La figure IV.8 illustre l'évolution du LWR et du CD des lignes de résines recuites à des températures allant de 20°C à 120°C. Pour une température inférieure à 100°C, l'impact du recuit semble n'avoir qu'un effet mineur sur le LWR et le CD. Dès lors qu'une température supérieure à 100°C est utilisée, on peut commencer à voir le LWR diminuer et le CD de ligne légèrement augmenter.

Les recuits à des températures supérieures ou égales à 120°C ont fourni des images pour lesquelles les mesures CDSEM n'étaient pas réalisables car la résine des motifs a flué (cf. figure IV.9). La température de fluage des lignes de résine correspond finalement assez bien à la mesure de T_g , d'environ 117°C, réalisée par DSC.

La plus grande valeur de lissage obtenue, d'environ 10.4% du LWR initial apparaît pour un recuit à la température de 110°C sans variation trop importante du CD de ligne. La figure IV.10 montre la PSD de LWR du cas de recuit à la température de 110°C pendant 5 minutes et la référence, on peut voir que l'essentiel du lissage du LWR de résine intervient dans les composantes hautes fréquences de rugosité définie par l'ITRS.

Les valeurs de LER gauche et droit et la corrélation des bords avant et après recuit à 110°C pendant 5 minutes du tableau IV.4, montrent que la réduction de LER gauche et droit est équivalente à celle du LWR, les bords des lignes restent peu corrélés.

Tableau IV.4 : Influence du recuit à 110°C/5min sur le LWR, LER_g, LER_d et corrélation

Cas de motif	LER _g	LER _d	Corrélation
35nmhp référence	4.0	4.0	8.4%
35nmhp recuit 110°C/5min	3.7	3.5	9.1%

2.1.6. Synthèse et discussion

Un lissage maximal du LWR de la résine de 10.4% (de 5.4 à 4.8 nm) est obtenu pour une température de recuit de 110°C d'une durée de 5 minutes sans modification trop importante du CD de la ligne (de 36.5 à 38 nm soit environ 4%). Les LER gauche et droit sont diminués de la même manière que le LWR et les bords restent peu corrélés. Les phénomènes de lissage ont essentiellement effet dans la partie des hautes fréquences de rugosité.

Pour des températures de recuit supérieures ou égales à 120°C on observe un fluage des motifs de résine, ce qui est en accord avec la mesure de $T_{g\text{poudre}}$ de la DSC. Or nous avons pu voir d'après la littérature que les propriétés de mobilité des chaînes polymères étaient dépendantes non seulement de la nature du polymère mais également de l'extension spatiale du matériau polymère. Compte tenu du faible volume de nos lignes de résine et que les bords de la résine sont composés d'un mélange de chaînes partiellement déprotégées comme le suggère les études ^{[IV.21],[IV.22]} et ^[IV.23], il est possible que cela ne soit qu'un accord fortuit.

Le phénomène de lissage de la rugosité de ligne apparaît donc à une température légèrement inférieure à la température de transition vitreuse mesurée pour la résine sous forme de poudre par DSC (117°C). Cette réorganisation à une température inférieure à la T_g peut provenir de deux phénomènes :

- Soit la T_g de la surface du motif de résine est plus faible que la T_g de la résine massive.
- Soit le traitement thermique à une température proche de la T_g a une durée suffisante pour induire la mobilité des chaînes nécessaire à la réorganisation et au lissage. On pourrait envisager de réduire les temps de traitements avec des températures identiques et voir s'il on obtient des résultats similaires.

Finalement, la diminution des dimensions des structures recherchée par l'industrie microélectronique pourra probablement avoir un impact sur les mécanismes mis en jeu lors de recuits de motifs de résine pour diminuer le LWR. Il faudra alors prendre en compte avec précision la géométrie des motifs et les interactions substrat-polymère que ce soit en simulation ou expérimentalement comme le suggère l'étude de M. K. Mundra *et al.* ^[IV.24]

2.2. Traitements plasmas

2.2.1. Etat de l'art du lissage de LWR par plasma

Les traitements à base de plasmas des motifs de résine ont été introduits dans l'industrie comme traitements après lithographie au début des années 2000. Ces traitements sont réalisés sans

puissance de polarisation, c'est-à-dire sans accélération des ions (pour rappel : un plasma est constitué de molécules, ions, radicaux ainsi que d'UV et d'électrons). L'exposition des matériaux polymères organiques aux plasmas notamment aux UV émis par ces derniers, notamment aux VUV ($100 < \lambda < 200$ nm) permet de modifier leurs propriétés physicochimiques.

En effet, les photons VUV excèdent les énergies des liaisons covalentes (tableau IV.5) que l'on trouve couramment dans les polymères organiques et de plus les coefficients d'absorption des polymères organiques sont plus grands de plusieurs ordres de grandeur dans le domaine des VUV en comparaison à ceux dans le domaine des proches UV ($\lambda = 300-400$ nm). L'absorption du rayonnement VUV conduit à diverses modifications des chaînes polymères organiques comme des cassures de liaisons et la formation de radicaux libres. Les radicaux libres fortement réactifs, peuvent réagir avec les chaînes polymères et conduire à de la réticulation par exemple.

Tableau IV.5 : Energie de quelques liaisons présentes dans les résines

Liaison	Energie (kJ.mol ⁻¹)	Energie (eV)	Equivalence λ (nm)
C-H (chaînes saturées)	400-440	4.1-4.6	272-299
C-O (esters et acides)	320-370	3.3-3.8	323-374
C-C	340-370	3.5-3.8	352-374
O-H	380-450	3.9-4.7	266-315

Données extraites de [IV.25]

Les premiers traitements plasma mis en place, à base de bromure d'hydrogène (HBr), étaient destinés à renforcer la résistance à la gravure des résines de type 193nm [IV.26]. Cependant ils ont montré une aptitude à lisser le LWR des motifs de résines. Des études [IV.3] [IV.28] rapportent que le lissage induit par l'exposition de motifs de résine aux traitements HBr provient de l'action des VUV du plasma. Ce rayonnement VUV présent avec des plasmas à base d'HBr permet la rupture des liaisons covalentes C-O des résines, il en découle la présence de gros groupements type methyladamantane dans la résine et un dégazage de petites espèces résultantes de la dégradation des fonctions lactones pendantes (cf. figure IV.11). La combinaison de la présence de ces groupements et du dégazage est suspectée être la source du réarrangement volumique des chaînes polymères. Le lissage est observé pour une dose de VUV modérée, l'exposition à de fortes doses favorise la réticulation des chaînes et limitera la réduction de LWR.

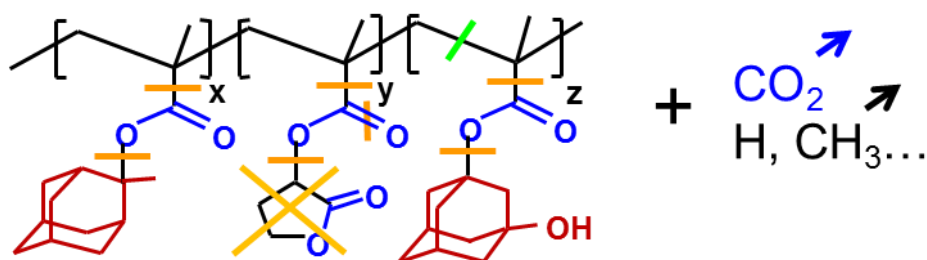


Fig. IV.11 : Représentation schématique de l'effet des VUV des traitements HBr sur la structure d'un polymère de résine de type 193nm. Les groupements de methyladamantane et d'hydroxyadamantane (en rouge respectivement à gauche et à droite) restent dans la résine alors que les groupements autres groupements (lactone et fonctions carbonyle) latéraux sont dégradés et les produits de dégradation dégazent

Cependant, un tel plasma conduit également au « re-dépôt » d'espèces carbonées en surface des motifs de résine [IV.26]. Ces espèces sont issues de la photolyse des groupements des chaînes polymère de résines. Les mesures par spectroscopie Raman conduites par l'auteur montrent que la résine exposée au plasma HBr présente des pics caractéristiques de la formation de carbone de type graphite (pics situés aux nombres d'ondes d'environ 1320 et 1600 cm⁻¹ [IV.28], [IV.29]).

Les études ont montré que le plasma HBr conduit à des réductions de LWR de motifs de résine d'environ 30% alors que le rayonnement VUV émis par ce même plasma conduit à une diminution de 39%.

Ainsi, pour optimiser le lissage des résines 193nm par traitement plasma, il faut utiliser des chimies de plasma qui émettent fortement dans le VUV et qui minimisent le « re-dépôt » d'espèces carbonées.

Les travaux de thèse de M. Brihoum ^{[IV.4][IV.29]}, présentent une version revisitée de ce traitement plasma HBr en modifiant le caractère de la puissance source. Brihoum propose l'utilisation d'un plasma HBr dont la puissance du générateur source est pulsée. En pulsant la puissance source, les produits de photolyse émis par la résine sont moins fragmentés et ont moins tendance à coller sur les surfaces, la formation de la couche graphite est ainsi réduite. La réduction de rugosité obtenue avec un plasma d'HBr pulsé est d'environ 33%. Le plasma HBr pulsé présente une amélioration comparée au plasma HBr continu mais reste en deçà des performances d'un traitement VUV.

D'autres travaux ^[IV.5], réalisés par Fouchier et Pargon proposent d'utiliser un plasma d'HBr/O₂ (avec un faible flux d'O₂) pour minimiser la formation de la couche graphite. En effet, la présence de radicaux d'oxygène dans le plasma permet la gravure isotrope de la couche carbonée à mesure qu'elle se dépose. Ce traitement plasma permet une réduction du LWR d'une résine de type 193nm de 42%. La diminution obtenue est plus importante que dans le cas de l'exposition par des VUV seuls car il est suspecté que la gravure isotrope contribue également au lissage des motifs de résine.

Plus récemment, des plasmas à base de dihydrogène ont été introduits en tant que traitement pour le lissage du LWR. En effet, les plasmas H₂ émettent également intensément dans les gammes de longueur d'onde inférieures à 200nm ^{[IV.28], [IV.7]}, ce qui en fait des candidats de choix pour le traitement du LWR après lithographie. Il s'avère de plus que ces derniers ne conduisent pas à des dépôts de couche carbonée de type carbone graphite comme le font les plasmas HBr, certainement parce que les radicaux libres d'hydrogène empêchent leur formation. Des réductions de rugosité de l'ordre de 50% ont pu être obtenues sur des motifs de résines imprimées par lithographie 193nm.

Pour tous les traitements issus de la littérature le lissage de LWR s'opère dans le domaine des composantes hautes fréquences de LWR quasi exclusivement.

Finalement, dans le cadre de ces travaux de thèse, j'ai voulu tester l'efficacité des meilleurs traitements plasma issus de la littérature pour réduire le LWR de mes motifs de résine. Il a donc été envisagé d'utiliser un plasma HBr continu, un plasma HBr pulsé, un plasma HBr/O₂ et un plasma H₂. Dans notre cas, les motifs sont réalisés dans une résine développée pour la lithographie EUV et adaptée à la lithographie électronique, contrairement à la majorité des travaux de la littérature qui ont été réalisés sur des résines 193nm.

2.2.2. Dispositif expérimental

Les manipulations relatives à cette section ont été réalisées à deux périodes de la thèse. L'effet des plasmas à base de HBr listés ci-dessus a été testé au début des travaux de thèse avec des motifs L/S 35nmhp (dimensionnement proche des 32nmhp retenus) sur silicium lorsque l'empilement de référence n'avait pas encore été retenu. L'effet de plasma H₂ a été réalisé plus tard car le gaz d'alimentation H₂ n'était pas disponible dans la machine de gravure du LTM et les motifs traités sont des L/S 32nmhp réalisés sur l'empilement de SiARC/SOC. L'empilement sous-jacent la résine peut avoir

un impact sur la rugosité avant traitement plasma mais n'a pas d'influence sur le résultat post-traitement.

Dans tous les cas de plasmas envisagés, les traitements ont également été réalisés sur la résine directement déposée sur silicium non lithographiée afin d'étudier les modifications physico-chimiques du matériau de résine.

2.2.3. Plasmas utilisés

Les expériences de traitement ont été réalisées dans la DPS 300 du LTM décrite au chapitre II. Pour chacun des types de plasmas envisagés, la température de la cathode est de 65°C (sauf pour le plasma H₂ pour lequel elle est réglée à 30°C) et la puissance de polarisation (bias) nulle. Le tableau IV.6 synthétise les paramètres des traitements plasma utilisés.

Tableau IV.6: Descriptif des paramètres des traitements plasmas utilisés

Procédé Plasma	Type	Gaz	Pression	Source (Puissance, Fréquence, Rapport de Cycle)	Durée
HBr*	Continu	HBr 100 sccm	5 mTorr	1200 W	30s
HBr pulsé**	Pulsé	HBr 100 sccm	15 mTorr	1200 W f =1 kHz / RC = 15%	200 s
HBr/O ₂ ***	Continu	HBr 100 sccm O ₂ 10 sccm	5 mTorr	600 W	12s
H ₂ ****	Continu	H ₂ 100 sccm	10mTorr	300W	30s

*, **, ***, **** paramètres issus de la littérature respectivement de [IV.28], [IV.4], [IV.5], [IV.7]

2.2.4. Effet des plasmas considérés sur les motifs L/S

Les plasmas décrits dans la section précédente sont utilisés pour traiter des motifs L/S 35nmhp de résine sur silicium dans le cas des plasmas à base de HBr et L/S 32nmhp réalisé sur l'empilement de SiARC/SOC dans le cas du plasma H₂.

Dans cette section le LWR est mesuré avec la procédure décrite au chapitre II qui permet d'éviter de mesurer les zones de raccord visibles dans les lignes avec le Vistec SB3054 (soit une mesure sur un période spatiale de 1.076µm). Le CD et le LWR moyens des lignes de résine après lithographie et après traitements et leurs variations relatives sont présentées dans le tableau IV.6. Les figures IV.12. a&b présentent les images CDSEM et les figures IV13.a&b les PSD de LWR associées aux résultats du tableau IV.7.

Tableau IV.7 : Effet des traitements plasma sur le CD et le LWR des motifs de résine

Procédé	CD référence (nm)	CD après traitement (nm)	CD _{variation}	LWR référence (nm)	LWR après traitement (nm)	LWR _{variation}
HBr	37.0	32.9	-11%	6.3	6.4	+2%
HBr pulsé	37.0	34.8	-6%	6.3	6.2	-1%
HBr/O ₂	37.0	34.4	-7%	6.3	5.9	-7%
H ₂	30.8	29.2	-5%	4.8	4.3	-10%

D'après le tableau IV.6, on peut voir que les 4 plasmas envisagés conduisent à une très légère réduction du CD de ligne avec une réduction maximale d'environ 11% obtenue dans le cas du plasma HBr. Dans le cas du LWR, les variations sont quasi inexistantes pour les plasmas HBr et HBr pulsé. Les plasmas HBr/O₂ et H₂ permettent d'obtenir une très faible réduction du LWR respectivement de 7% et 10% environ. L'observation des PSD de LWR de la figure IV.13 permet de voir lorsqu'il y a effectivement un lissage de LWR que ce dernier apparaît dans le domaine des composantes hautes fréquences de LWR défini par l'ITRS ce qui est en accord avec les études de la littérature bien que les réductions obtenues soient plus modérées.

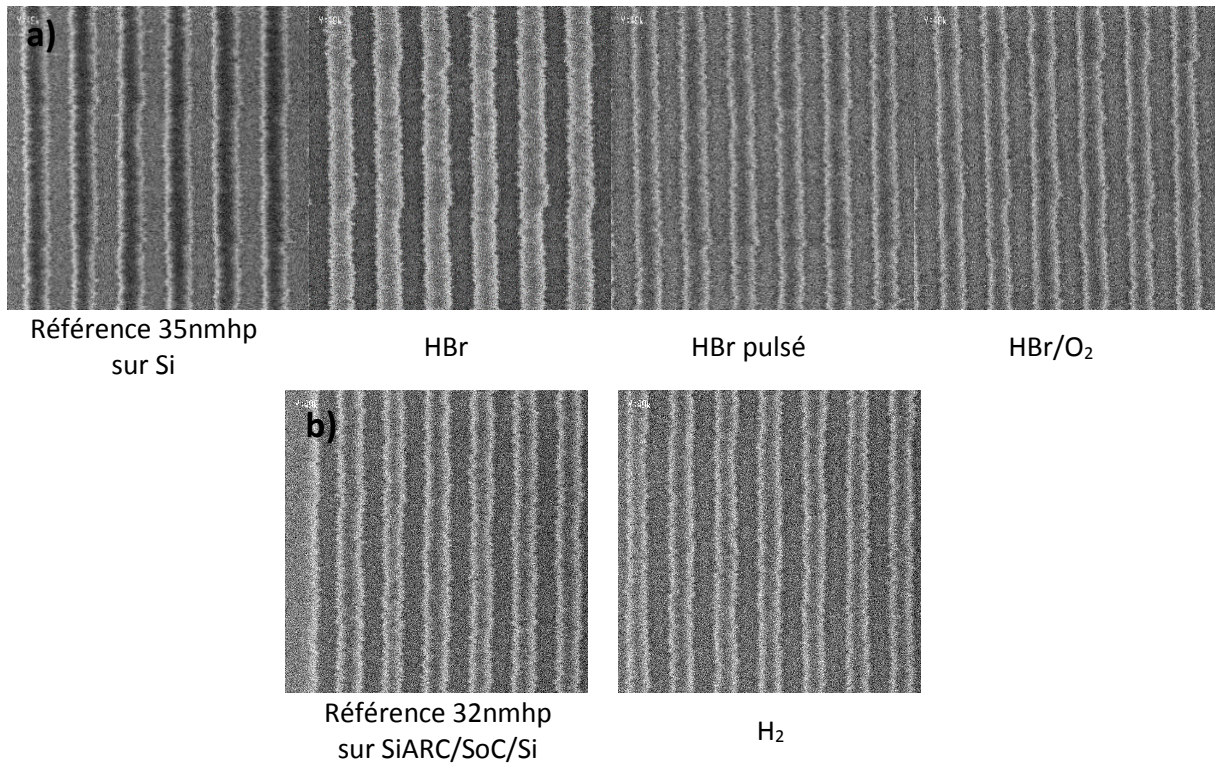


Fig. IV.12 : Images CDSEM avant et après traitements plasmas, (a) à base de HBr, (b) à base de H₂

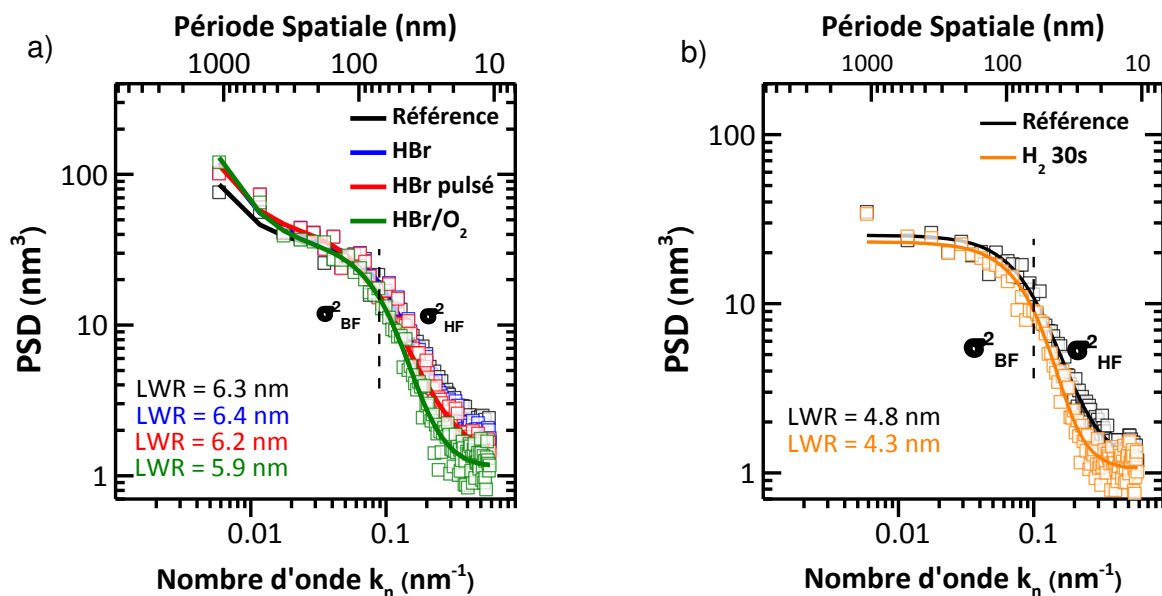


Fig. IV.13 : PSD de LWR (a) avant et après traitements plasmas à base de HBr et (b) avant et après traitements plasmas à base de H₂. La limite BF/HF de rugosité définie par l'ITRS est également précisée

Les observations des motifs L/S en microscopie électronique en coupe de la figure IV.14 (uniquement pour les cas relatifs aux plasmas à base d'HBr et leurs références) permet de voir que les motifs perdent environ 5 nm de hauteur par rapport aux 30 nm initiaux (soit environ 15%). Les profils semblent avoir été légèrement arrondis par les traitements plasma HBr.

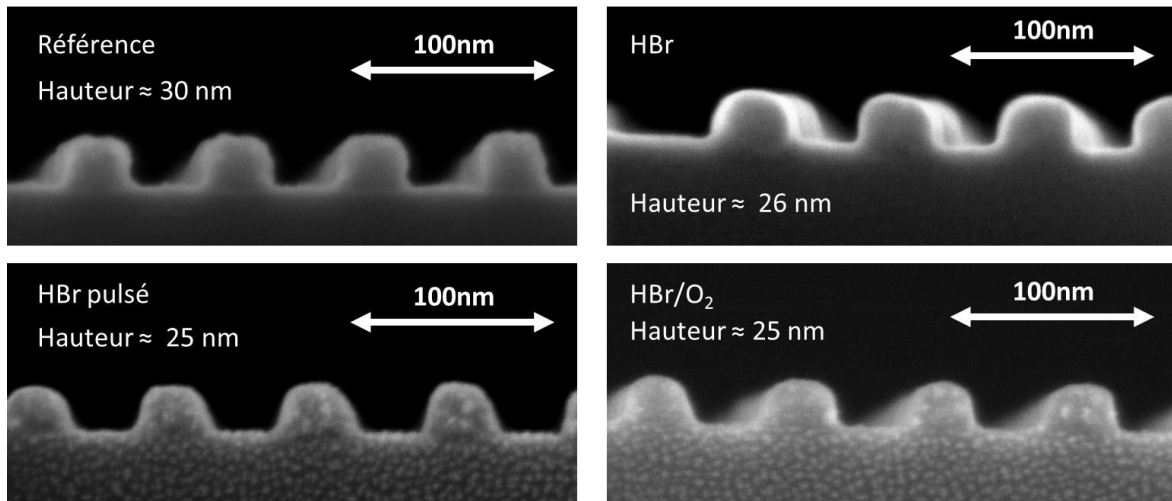


Fig. IV.14 : Allure des profils des lignes avant et après traitements plasma à base HBr

D'après les observations du tableau IV.6 et de la figure IV.14, il semblerait que les motifs perdent plus de hauteur que de CD avec les plasmas à base d'HBr.

2.2.5. Modifications physicochimiques de la résine non lithographiée

2.2.5.1. Effet des plasmas sur l'épaisseur du film de résine

L'effet des traitements plasma sur l'épaisseur de nos films de résine non-exposée (60nm d'épaisseur initiale environ afin d'avoir assez de signal en spectroscopie d'absorption IR) déposés sur silicium est présentée de manière relative en figure IV.15.

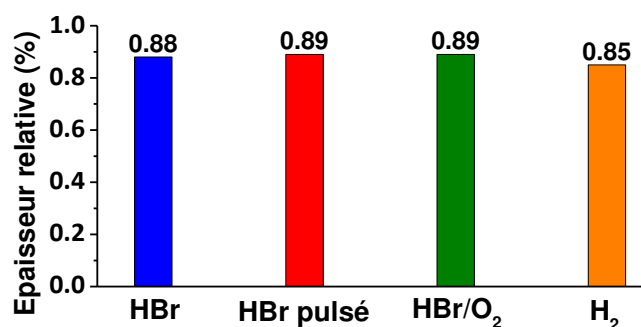


Fig. IV.15 : Epaisseur relative des films de résine après traitement plasma HBr

D'après la figure IV.15, on peut voir que les 3 traitements plasma à base d'HBr conduisent à une diminution d'épaisseur d'environ 11%, le traitement plasma à base de H₂ lui diminue l'épaisseur de 15% environ. Pour les cas relatifs aux plasmas à base d'HBr, les diminutions d'épaisseur du film de résine sont assez proches de celles mesurées sur les coupes des motifs de la figure IV.14.

2.2.5.2. Effets des plasmas sur le spectre d'absorption infrarouge

Les figures IV.16 a, b et c présentent les spectres d'absorption infrarouge (normalisés à l'épaisseur) des films de résine de référence et traités avec les 4 plasmas.

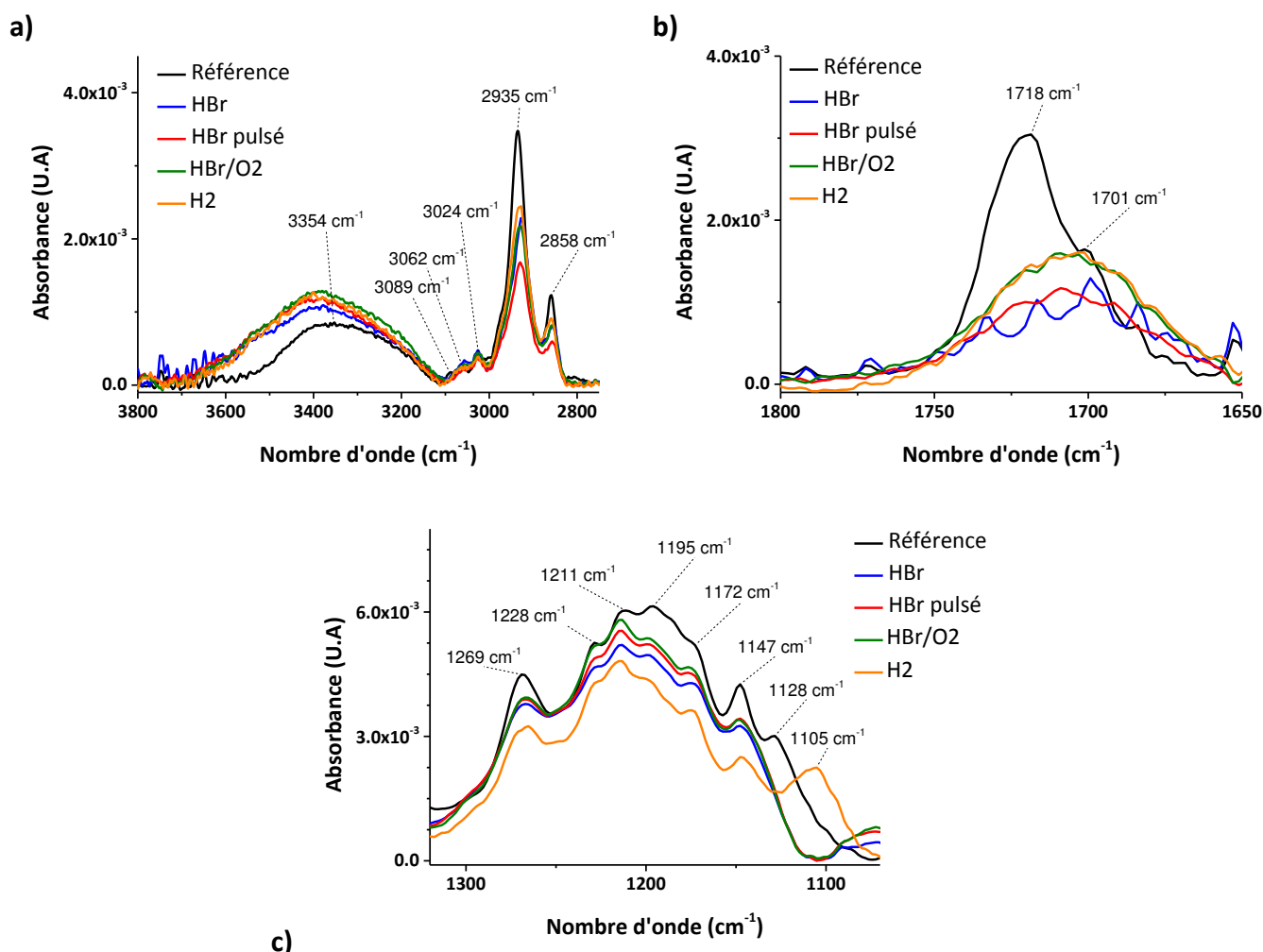


Fig. IV.16 : Spectres d'absorption infrarouge de la résine avant et après les traitements plasma. a) Région d'élongation des liaisons O-H et C-H aromatiques et aliphatiques, b) Région d'élongation des liaisons C=O, c) Région d'élongation des liaisons C-O

Les spectres d'absorption infrarouge montrent des tendances similaires pour les 4 traitements plasma :

On observe une diminution du signal relatif à l'élongation des liaisons C-H aliphatiques (vers 2935 cm⁻¹ et 2858 cm⁻¹), du signal relatif à l'élongation de C=O de type ester (vers 1718 cm⁻¹) et du massif relatif à l'élongation des C-O de 1300 cm⁻¹ à 1100 cm⁻¹ environ (plus précisément la disparition du pic vers 1128 cm⁻¹). Le signal relatif aux fonctions carbonyles est plus fortement diminué dans le cas du traitement HBr et HBr pulsé car le flux de photon est plus important avec ces traitements (puissance source plus grande), on a, a priori une modification plus forte de la résine avec les traitements HBr et HBr pulsé et pourtant cela ne se traduit pas sur la rugosité. On peut également observer l'augmentation du signal relatif à l'élongation des liaisons hydroxyde (vers 3354 cm⁻¹) et l'élargissement du pic relatif à l'élongation des liaisons carbonyle (proche de 1700 cm⁻¹) vers les nombres d'onde plus faibles.

Le pic parasite supposé en provenance de l'élongation de liaisons Si-O du substrat apparaît vers 1105 cm⁻¹ dans le cas du traitement plasma à base de H₂. On peut noter de plus que tous les

spectres de résine, traitée ou non, réalisés à cette période présentait un pic à ce nombre d'onde et d'intensité variable (même avec d'autres plaques en guise de référence).

Dans le cas de la résine 193nm des travaux d'Azarnouche^[IV.28], les signaux relatifs à l'élongation des liaisons C-H aliphatiques ont tendance à augmenter avec le traitement HBr contrairement à ceux de notre résine. Dans tous les cas, l'évolution des spectres d'absorption infrarouge de la résine traitée par plasma est conforme aux résultats de la littérature et semble indiquer que l'on procède à la rupture de liaisons C-O de fonctions ester qui sont alors remplacées par des fonctions acide carboxylique. Néanmoins on peut supposer que dans notre cas les groupements carbonés provenant des fonctions esters ne restent pas dans la résine et dégazent. Cela peut expliquer les pertes d'épaisseur et de CD que l'on a observées dans les sections précédentes.

2.2.5.3. Effets des plasmas sur les spectres Raman

La spectroscopie Raman permet de compléter les informations obtenues en spectroscopie d'absorption infrarouge. En effet, cette dernière est plus sensible aux modes de vibration symétrique et permet donc l'observation d'autres modifications physicochimiques que pourraient subir la résine exposée aux plasmas, à base d'HBr notamment. Comme nous avons pu le voir dans la section 2.2.1, les résines de type 193nm (lithographiées ou non) soumises à des plasmas HBr continus présentent après traitement 2 pics relatifs à la présence d'un carbone de type graphite. Il est intéressant de savoir si notre résine bien que provenant d'une plateforme mixte 193nm/248nm et destinée initialement à la lithographie EUV puisse présenter des transformations similaires. La figure IV.17 présente les spectres Raman des films de résine de référence et traités avec les plasmas à base de HBr.

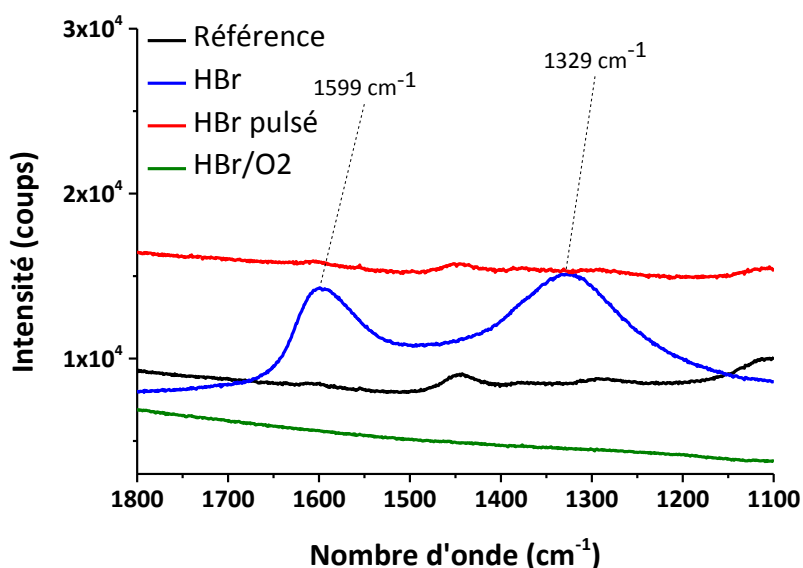


Fig. IV.17 : Spectres Raman normalisés à l'épaisseur de la résine d'étude avant et après traitements plasmas HBr

La figure IV.17 montre la présence de 2 pics aux nombres d'onde de 1329 cm^{-1} et 1599 cm^{-1} sur le spectre Raman de la résine d'étude traitée avec le plasma HBr. Ces derniers sont totalement absents des 3 autres spectres. D'après ces résultats, il semble que la résine d'étude soumise à un plasma HBr continu présente des pics de vibration proches de ceux obtenus par Azarnouche^[IV.28] et relatifs à la formation d'un matériau de type carbone graphite désordonné. De plus, il semble que les plasmas HBr pulsé et HBr/O₂, initialement développés pour limiter la formation de carbone graphite désordonné en surface de la résine se révèlent efficaces, puisque l'on peut noter l'absence des pics relatifs à la présence d'un tel dépôt.

2.2.5.4. Effets des plasmas sur l'ATG de la résine

Il paraît vraisemblable de voir si les traitements plasmas affectent la position et l'intensité de ce pic de déprotection puisque l'analyse de spectroscopie infrarouge semble montrer que l'utilisation de plasmas pour traiter la résine d'étude induit la coupure de fonctions ester pour laisser place à des acides carboxyliques. La figure IV.18 présente les ATG de la résine dans son état de référence et après traitement plasma (sous forme de poudres).

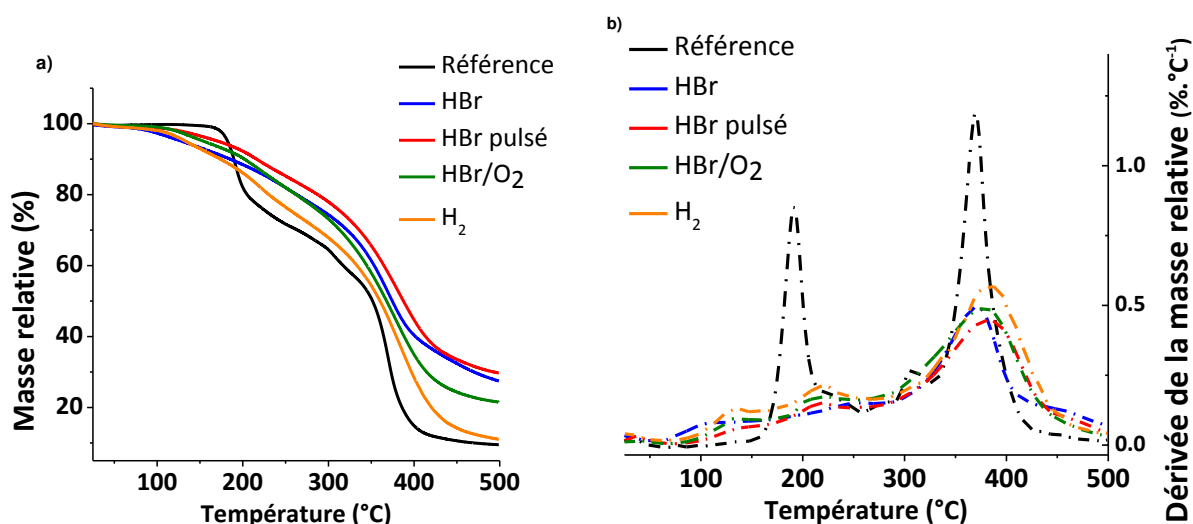


Fig. IV.18 : Thermogrammes d'ATG de la résine avant et après plasmas HBr réalisés avec une rampe de température de 10°C/min. (a) Masse résiduelle, (b) dérivée de masse résiduelle par rapport à la température, en fonction de la température

Comme déjà décrit, l'analyse TGA d'une résine avant traitement présente deux températures caractéristiques (cf. Fig IV.18.b) : la température de déprotection thermique à 190°C et la température de dégradation thermique du polymère à 380°C. Les 4 traitements plasma conduisent à des résultats TGA relativement similaires. Les thermogrammes après traitement (cf. Fig IV.18.b) présentent 3 températures caractéristiques vers 170°C, 210°C et 380°C, les deux dernières températures correspondant aux pics de la résine non traitée. Deux hypothèses peuvent expliquer une plus faible résistance au stress thermique des résines après traitements plasma avant 170°C :

- Des groupements clivés de la chaîne principale et emprisonnés dans la matrice polymère lors du traitement plasma dégagent progressivement lors de l'application de la rampe de température de l'analyse TGA.
- Le rayonnement UV des plasmas a activé le PAG et l'énergie thermique apportée par l'analyse thermogravimétrique conduit à des déprotections de groupements résiduels qui dégagent.

Pour aller plus loin dans l'analyse des modifications des matériaux de résine par traitements plasmas, on pourrait également procéder à une mesure de MALDI-TOF (ou spectrométrie de masse par désorption-ionisation laser assistée par matrice avec analyseur à temps de vol) afin de convenir sur un changement de la distribution du poids moléculaire moyen et une mesure de désorption thermique couplée à de la chromatographie en phase gaz et spectroscopie de masse (TD-GC-MS) afin d'analyser la nature des groupements dégagant à faible température.

2.2.6. Synthèse et discussion

L'utilisation des plasmas HBr continu, HBr pulsé, HBr/O₂ et H₂ ont permis de modifier la rugosité de ligne initiale dans le meilleur des cas d'environ 10% avec une réduction du CD au maximum d'environ 10%. Ces traitements largement reconnus pour leur grande efficacité à réduire le LWR de motifs L/S de résines 193nm grâce à l'action des VUV (fortes réductions allant jusqu'à 40%), se sont révélés moins efficace à lisser le LWR de nos motifs de résine (type EUV) réalisés avec le Vistec SB3054DW. Cependant, l'ordre de l'efficacité des traitements est identique à ce qui a été rapporté dans la littérature, à savoir H₂ est plus efficace que HBr/O₂, lui-même plus efficace que les traitements HBr continus et pulsés. On peut également noter que dans notre cas, le traitement plasma H₂ ne conduit pas à une augmentation du CD par fluage de la résine phénomène possible reporté par la littérature [IV.31].

L'inefficacité du traitement plasma HBr continu pour lisser nos résine peut certainement être expliqué par la présence de la couche graphite qui tend à dégrader les rugosités. Dans le cas du plasma HBr pulsé, il n'y a pas de couche graphite et les modifications induites par les VUV du plasma sont les plus importantes (d'après les analyses de spectroscopie infrarouge de la figure IV.16) et pourtant ce traitement ne conduit pas à un lissage de la résine. Cette dernière constatation laisse suggérer que les mécanismes de lissage de nos résines de type EUV soient différent de ceux rapportés pour les résine de type 193nm et que l'émission VUV des plasmas ne joue pas un rôle prépondérant dans les mécanismes de lissage. Quelques expériences supplémentaires avec des traitements UV seuls utilisant des filtres optiques en MgF₂ placés au-dessus des motifs non présentées dans les sections précédentes ont montré une réduction du CD de 5% et une légère augmentation de LWR de 5%. Ces expériences confortent le fait que les VUV des plasmas n'ont pas de rôle bénéfique sur la rugosité de bord de notre résine. Finalement, les deux traitements HBr/O₂ et H₂ qui ont conduit à un lissage de la résine sont ceux qui sont susceptibles d'induire de la gravure latérale des motifs ; dans notre étude, le lissage des motifs est obtenu par une attaque chimique isotrope.

On peut donc émettre quelques hypothèses concernant l'efficacité réduite du rayonnement VUV pour lisser les motifs de notre résine de type EUV :

Premièrement, nos motifs présentent un volume considérablement réduit en comparaison à ceux traités dans le cas de motifs de résine 193nm [IV.29][IV.5] (réalisés pour des nœuds technologiques plus anciens). Par exemple le rapport des sections des lignes de résine 193nm traitées par Azarnouche et celles de notre étude est d'environ 6.7 en considérant les motifs comme des sections rectangulaires (les hauteurs et largeurs de ligne approximatives du cas d'Azarnouche sont respectivement de 90 et 78nm alors que les nôtres sont de 30 et 32-35nm). Il est donc envisageable qu'une partie de l'efficacité des traitements plasmas ait pour source le volume des lignes à traiter, ce qui a été récemment suggéré par De Schepper *et al.* [IV.6]

Secondement, notre résine n'est pas de formulation identique aux résines 193nm, par exemple elle ne possède pas de fonctions lactone contrairement aux résines traitées par Azarnouche, Brihoum et Fouchier (un exemple de formulation de résine 193nm possédant une lactone est donné en figure IV.19). Il paraît vraisemblable que la liaison C-O de la lactone en plus de celle de l'ester auquel cette dernière est rattachée puisse également se briser sous l'action des VUV (comme le montre la représentation schématique de la figure IV.19).

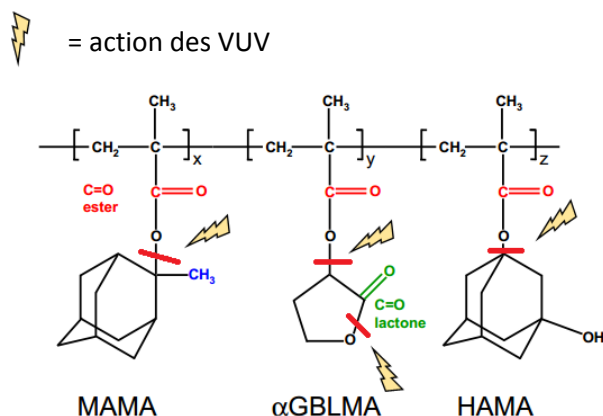


Fig IV.19 : Représentation de la schématique de la chaîne polymère de résine 193nm utilisées par Azarnouche [IV.27]. Les noms en lettres capitales sont les versions abrégées des noms commerciaux anglais des comonomères du polymère de résine, MAMA = Methyl Adamantane MethAcrylate, αGBLMA = alpha-GammaButyrolactone MethAcrylate et HAMA = HydroxyAdamantane MethAcrylate.

Ainsi, les VUV des plasmas peuvent induire en plus de la libération de petites molécules cycliques que sont les lactones, la libération de petites molécules linéaires résultantes de la cassure de la liaison C-O interne à la lactone. Conséquemment, la matrice polymère de la résine pourrait bénéficier de la présence de molécules qui peuvent agir comme des plastifiants d'encombrement stérique réduit par rapport à la lactone et autres groupements clivés et ainsi aider à la réorganisation des chaînes lors de l'exposition aux VUV du plasma. Il serait donc intéressant de pouvoir travailler avec différentes formulations de résines avec plus ou moins de groupements lactone et permettant la réalisation de structures de dimensions équivalentes, ainsi on pourrait évaluer l'influence de la présence de groupements lactone sur l'efficacité du lissage de LWR par traitements plasma.

Il est également possible que la proportion de groupements disponibles clivables soit aussi un paramètre influençant la diminution de LWR atteignable avec les traitements plasma comme le suggère la récente étude de De Schepper *et al.* [IV.8]. Finalement, il semble primordial que les producteurs de matériau de résine travaillent de concert avec les chercheurs du domaine afin de fournir des matériaux plus susceptibles de voir leur LWR lissée avec les traitements plasma.

Un autre point peu exploré dans la littérature est la dépendance de la réduction de LWR obtenue par traitements plasma avec la valeur de rugosité initiale pour des motifs de CD et hauteurs identiques. La troisième et dernière partie de ce chapitre en discute.

3. Combinaison des stratégies de lissage

Dans cette section est abordée la combinaison de la stratégie d'écriture de biais négatif entrevue au chapitre III qui permet une très large réduction de la rugosité de ligne avec les traitements post-lithographie explorés dans la partie II de ce chapitre, à savoir les traitements thermiques et traitements plasmas à base de dihydrogène. Le but est bien d'obtenir une réduction de LWR la plus forte possible, mais également de voir si les traitements ont une dépendance avec la rugosité initiale de motifs d'une même résine et de volumes identiques.

Dans cette partie tous les traitements sont appliqués sur des motifs L/S 32nmhp réalisés avec le Vistec SB3054 sur l'empilement SiARC/SOC dans l'optique d'être éventuellement appliqués aux futures lithographies réalisées avec les équipements de MAPPER Lithography.

3.1. Combinaison de la stratégie biaisée avec un traitement thermique

3.1.1. Détermination de la température de recuit

L'étude de l'impact de traitements thermiques sur la rugosité de la section 2.1 a été réalisée avec l'empilement résine sur silicium. Dans cette section, l'empilement utilisé est SiARC/SOC. Nous avons donc dans un premier temps évalué si la température de 110°C utilisée précédemment pour les recuits était applicable avec ce nouvel empilement. En effet, des interactions résine/substrats différentes pourraient conduire à des phénomènes de lissage différents. Les résultats du recuit à 110°C sur des motifs de résine non biaisés présents sur un empilement SiARC/SOC sont comparés aux résultats obtenus avec l'empilement résine/silicium dans le tableau IV.8. Les PSD de LWR du cas sur l'empilement SiARC/SoC est présenté en figure IV.20. Et l'effet du recuit sur les composantes fréquentielles du LWR sont présentés dans le tableau IV.9.

Tableau IV.8 : Effet du recuit de 110°C/5min des motifs de résine sur les deux substrats étudiés

Cas	CD avant recuit (nm)	CD après recuit (nm)	CD _{variation} (%)	LWR avant recuit (nm)	LWR après recuit (nm)	LWR _{variation} (%)
35nmhp sur Si	36.5	37.9	+4	5.4	4.8	-10
32nmhp sur SiARC/SoC	31.0	32.1	+3	5.4	5.6	+4

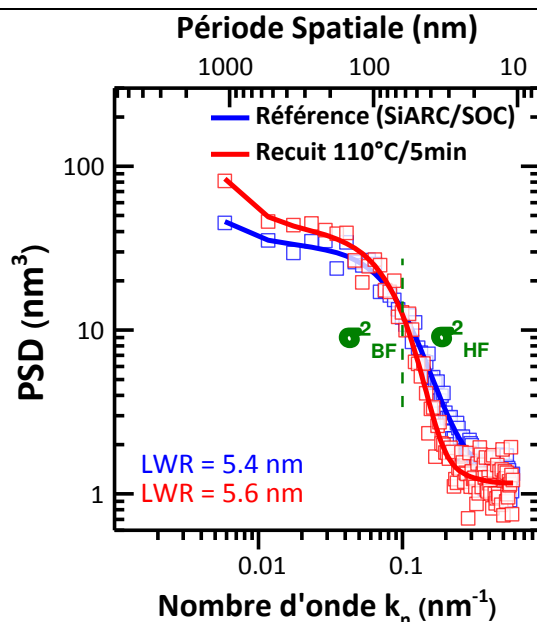


Fig IV.20 : PSD de LWR de motifs L/S 32nmhp de résine lithographiée avec l'empilement SiARC/SoC

Tableau IV.9 : Effet du recuit de 110°C/5min sur les composantes fréquentielles de LWR

Cas	LWR _{BF} avant recuit (nm)	LWR _{BF} après recuit (nm)	LWR _{BF} variation (%)	LWR _{HF} avant recuit (nm)	LWR _{HF} après recuit (nm)	LWR _{HF} variation (%)
35nmhp sur Si	4.3	4.4	+1	3.3	2.1	-37
32nmhp sur SiARC/SoC	4.6	5.2	+12	2.7	2.2	-19

Alors qu'une diminution de 10% de LWR avait été obtenue avec la résine déposée directement sur substrat de silicium, une augmentation de 3.8% de la rugosité est obtenue avec l'empilement SiARC/SoC. Les PSD de la figure IV.20 nous montrent qu'il y a bien un lissage des composantes hautes fréquences de LWR avec l'empilement SiARC/SoC mais il y a également une augmentation des composantes basses fréquences de LWR qui contrebalance la diminution des composantes hautes fréquences, conduisant ainsi à une augmentation globale de LWR. C'est également visible avec les valeurs de LWR des composantes basses fréquences et hautes fréquences du tableau IV.8. Le traitement des motifs de résine sur silicium conduit à un fort lissage de 37% des composantes hautes fréquences alors qu'il n'impacte quasiment pas les composantes basses fréquences de LWR. Par contre ce même traitement sur les motifs lithographiés sur SiARC/SoC conduit à un lissage de seulement 19% du LWR des composantes hautes fréquences alors que le LWR des composantes basses fréquences se voient augmenter de 12%.

L'augmentation des composantes basses fréquences de LWR en traitant thermiquement des motifs a été reportée et apparait faiblement pour des températures affectant peu le CD mais le phénomène se prononce pour des températures ayant un effet plus prononcé sur le CD [IV.10]. Cette augmentation est donc liée en partie au fluage des motifs même s'il est faible. Dans notre cas quel que soit l'empilement sous la résine le CD augmente de la même façon. L'augmentation des composantes basses fréquences de LWR n'est donc probablement pas liée à un fluage supérieur induit par le changement de substrat. Il est possible que ce changement de comportement soit également lié au changement des propriétés du matériau de résine observé pendant les travaux de thèse.

Afin d'éviter cette augmentation néfaste des composantes basses fréquences de LWR, il a été décidé d'utiliser une température légèrement diminuée de 105°C pour les expériences suivantes avec des motifs de résine sur l'empilement SiARC/SoC.

3.1.2. Résultats expérimentaux

Des motifs L/S 32nmhp ont été réalisés sur l'empilement SiARC/SoC sans biais et avec un biais de -50%. La figure IV.21 montre que le changement de l'empilement sous-jacent à la résine n'a pas eu d'impact sur les profils des motifs de résine obtenus. Ces motifs ont ensuite été recuits à la température de 105°C pendant 5 minutes, les résultats en matière de CD et LWR obtenus après recuit sont donnés dans le tableau IV.10.

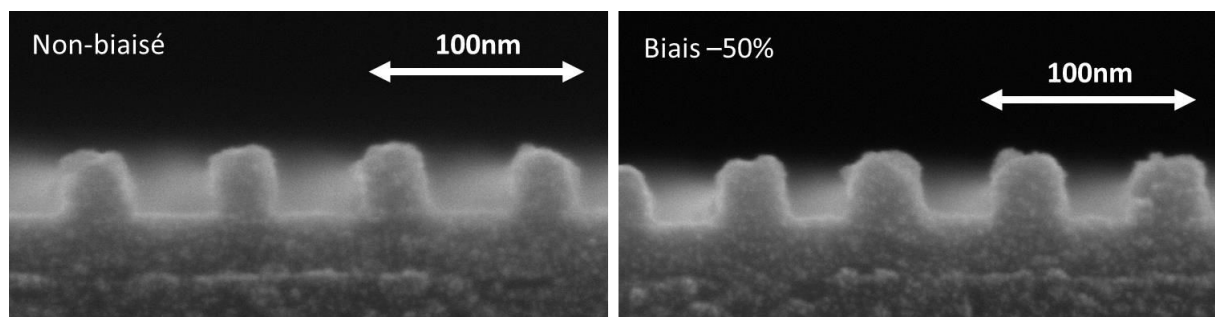


Fig. IV.21 : Images MEB en coupe au grossissement de 450 000 des différents cas de biais de motifs lithographiés

Le tableau IV.10 regroupe les résultats des valeurs de LWR avant et après traitement à 105°C pendant 5 minutes en fonction du biais négatif utilisé à l'exposition.

Tableau IV. 10 : Effet du recuit à 105°C/5min sur le CD et LWR des motifs de lignes de résine

	CD		LWR	
	Non-Biaisé	Biais -50%	Non-Biaisé	Biais -50%
Référence	30	31.1	5.2 nm	3.8 nm
Recuit 105°C/5min	30.9	31.6	4.9 nm	3.3 nm
Variation	+3%	+2%	-8%	-13 %

Pour les deux cas de biais, le recuit à 105°C conduit à une diminution de CD de l'ordre de 2% et à une diminution de LWR d'environ 10%. La figure IV.22 regroupe les PSD de LWR des 2 cas de motifs exposés avant et après traitement.

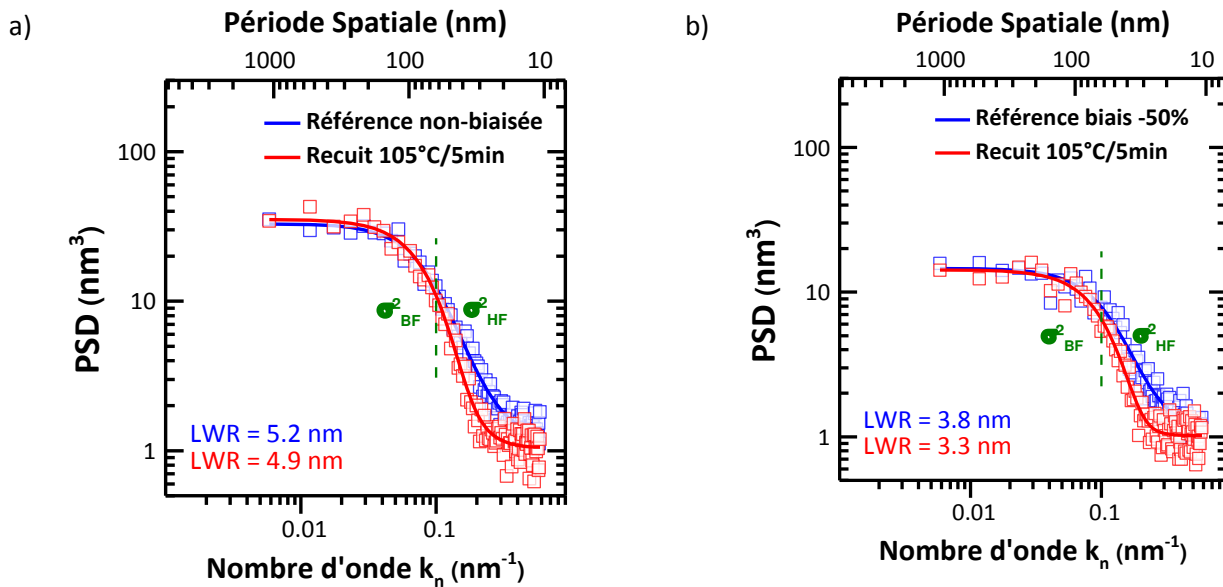


Fig. IV.22 : PSD de LWR de motifs L/S 32nmhp réalisées avec des biais négatifs de respectivement 0% (a) et -50% (b) et traités avec un recuit de 105°C pendant 5 minutes

On peut voir d'après le jeu de PSD de la figure IV.22 que les 2 cas présentent un lissage des composantes hautes fréquences de LWR. Le tableau IV.11 récapitule les variations des composantes basses et hautes fréquences de LWR.

Tableau IV.11: Effet du recuit à 105°C/5min sur les composantes fréquentielles du LWR

	LWR _{BF}		LWR _{HF}	
	Non-Biaisé	Biais -50%	Non-Biaisé	Biais -50%
Référence	4.5	3.0	2.8	2.4
Recuit 105°C/5min	4.4	2.9	2.0	1.6
Variation	-1%	-3%	-28%	-33 %

Un recuit de 5 minutes à 105°C des motifs biaisés ou non semble ne pas impacter les composants basses fréquences de LWR mais permet de lisser d'environ 30% les composants hautes fréquences de LWR.

3.1.3. Synthèse et discussion

L'utilisation de la combinaison stratégie d'écriture biaisée négativement et recuit des motifs permet de diminuer encore un peu plus les LWR des motifs. La valeur de 5.2nm de LWR dans le cas de

lithographie sans biais peut-être abaissée jusqu'à environ 3.3nm avec cette combinaison d'approches ce qui correspond à une réduction de LWR totale d'environ 37%. Pour aller plus loin, il serait intéressant de pousser l'étude plus loin en produisant grâce à la flexibilité de la lithographie électronique des lignes de très forts LWR (réalisées dans des conditions de très bas NILS) et de voir si le comportement face aux recuits est identique.

3.2. Traitements plasma à base de dihydrogène

Les résultats de la section 2.2 ont montré que le traitement de la résine à l'aide d'un plasma à base de dihydrogène conduit à une réduction du LWR de 10%. De ce fait, cette section traite de l'utilisation d'un tel plasma sur les 2 cas de motifs utilisés précédemment.

3.2.1. Résultats expérimentaux

Le tableau IV.11 regroupe les résultats des valeurs de LWR avant et après traitement plasma à base de H₂ (de même paramètres que ceux présentés dans la section 2.2) pour des motifs réalisés avec -50% ou sans biais lors de l'exposition.

Tableau IV.11 : Effet du plasma H₂ sur le CD et LWR des motifs de lignes de résine

	CD		LWR	
	Non-Biaisé	Biais -50%	Non-Biaisé	Biais -50%
Référence	30.6	31.0	4.8 nm	3.1 nm
Plasma H ₂	29.1	28.7	4.3 nm	2.8 nm
Variation	-5 %	-7%	-10 %	- 9 %

Le traitement plasma à base de H₂ appliqué sur des motifs de résine réalisés avec ou sans biais conduit à une diminution similaire de LWR d'environ 10%. Les PSD de LWR de la figure IV.23 permettent de visualiser l'effet de lissage qui intervient essentiellement dans le domaine des composantes hautes fréquences de LWR, le domaine des composantes basses fréquences n'est pas significativement impacté.

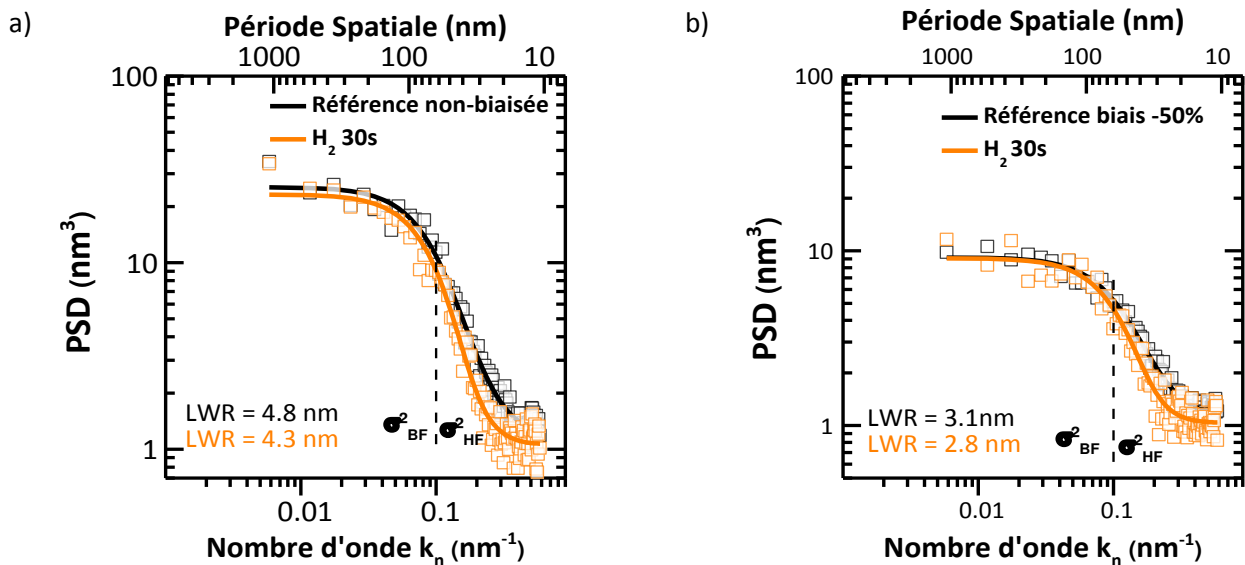


Fig. IV.23: PSD de LWR de motifs L/S 32nmhp réalisées avec des biais négatifs de respectivement 0% (a) et -50% (b) et traités avec un plasma à base de H₂

Tableau IV. 12 : Effet du plasma H₂ sur les composantes fréquentielles du LWR

	LWR _{BF}		LWR _{HF}	
	Non-Biaisé	Biais -50%	Non-Biaisé	Biais -50%
Référence	4.0	2.4	2.6	1.9
Plasma H ₂	3.8	2.4	2.0	1.4
Variation	-5%	0%	-22%	-24%

Le tableau IV.12 confirme que le lissage n'opère que dans les composantes hautes fréquences de LWR et ces dernières diminuent d'environ 20%

3.2.2. Synthèse et discussion

L'utilisation de la combinaison stratégie d'écriture biaisée négativement et d'un traitement plasma à bas de H₂ permet de diminuer encore un peu plus les LWR des motifs. La valeur de 4.8nm de LWR dans le cas de lithographie sans biais peut-être abaissée jusqu'à environ 2.8nm avec cette combinaison d'approches ce qui correspond à une réduction de LWR totale d'environ 41%. Le lissage n'intervient que dans le domaine des composantes hautes fréquences de rugosité.

4. Conclusions du chapitre

Dans ce chapitre IV, on a pu voir dans un premier temps que l'étape de développement apporte une contribution aux valeurs de LWR obtenues par lithographie. Le manque de temps n'a cependant pas permis de pouvoir pousser l'étude de l'effet du procédé de développement sur le LWR. Néanmoins, il apparaît que dans des conditions de contraste d'image améliorées, apportées par l'utilisation de motifs biaisés négativement, on puisse déjà faire varier de quelques pourcents la valeur de LWR en fonction des conditions de développement choisies. C'est un paramètre du procédé lithographique qu'il faut optimiser dans des travaux ultérieurs.

Dans un deuxième temps, nous avons exploré l'effet de traitements dits post-lithographie, en particulier des recuits et des traitements plasmas. Les conditions nécessaires à la réalisation d'un procédé de lithographie électronique basse énergie impliquent l'utilisation d'un film de résine relativement peu épais. Dans le cas du traitement thermique des motifs de résine, on a pu diminuer le LWR d'un maximum d'une dizaine de pourcents tout en limitant l'augmentation du CD de la ligne de 4% environ (ce qui est en accord avec des travaux de la littérature). Le lissage de LWR apparaît essentiellement dans le domaine des composantes hautes fréquences de LWR. De plus, le phénomène de lissage apparaît à des températures proches de 110°C inférieures aux températures de transition vitreuse du matériau de résine sous forme de poudre ($T_{g,bulk}=118^{\circ}C$) et sous forme de film fin ($T_{g,film}=145^{\circ}C$) et les motifs fluent pour des températures supérieures à 120°C pour des traitements d'une durée de 5 minutes. Cela suggère que les chaînes de la surface des motifs aient une mobilité suffisante pour que des recuits d'une durée de 5 minutes apportent un lissage du LWR. Cependant, les études ne permettent pas de conclure si les chaînes en surface des motifs ont bien une mobilité supérieure au reste de du motif ou si l'on fait face à un compromis temps/température. D'après la littérature, il semble également que l'amenuisement de l'épaisseur pour des films polymère conduise à des variations de mobilité des chaînes polymère au sein du film, mais qu'il existe une différence de comportement entre un film (2D) et des motifs (3D). On peut également trouver dans la littérature que la surface des motifs ne soit probablement de composition identique au reste du motif ce qui

pourrait également influencer sur la mobilité des chaînes en surface des motifs. Dans le cas des traitements plasma, à savoir des plasmas à base d'HBr (continu et pulsé), d'HBr/O₂ et de H₂, la meilleure réduction de LWR est obtenue avec un plasma à base de H₂ et est d'environ 10% pour un CD diminué d'environ 5%. C'est inférieur aux valeurs de réductions rapportées dans la littérature pour les résines 193nm. Bien que le rayonnement VUV des plasmas conduisent à des modifications physicochimiques similaires à ce qui a été rapporté pour les résine 193nm, celui-ci ne permet pas la réorganisation des chaînes polymères et au lissage du motif. Les traitements plasma qui permettent une amélioration de rugosité, tels que HBr/O₂ et H₂, sont ceux qui présentent une certaine réactivité chimique avec la résine et qui conduisent à une gravure isotrope.

Finalement, afin de pousser la réduction de LWR au maximum, des combinaisons de stratégie d'écriture utilisant des motifs biaisés négativement avec les traitements post-lithographies ont été explorées. Les études ont montré qu'en combinant des motifs biaisés à -50% à traitement thermique ou un traitement plasma H₂, des diminutions de LWR d'environ 37 % et 41 % respectivement ont pu être obtenues. A la fin de la thèse, j'ai pu proposer un procédé lithographique permettant de réaliser des motifs L/S 32nmhp présentant une rugosité de 2.9nm (gamme spectrale de LWR de 10.8 à 1.076µm). Ce procédé bien que gourmand en dose et donc chronophage avec le Vistec SB3054, a permis d'atteindre les spécifications lithographiques du nœud technologique 32nm.

Il reste encore du chemin à parcourir pour atteindre les spécifications des nœuds inférieurs à 20nm qui visent des rugosités inférieures à 1.7nm. Il est vraisemblable que cela nécessite le développement de nouveaux matériaux et de nouveaux procédés de lissage. Il est de même probable qu'une solution unique de lissage du LWR ne soit désormais plus suffisante.

Bibliographie du chapitre IV

- [IV.1]: M. Chandhok *et al.*, "Improvement in linewidth roughness by postprocessing," J. Vac. Sci. Technol. B vol. 26, Issue 6, pp. 2265-2270 (2008)
- [IV.2]: C. Koh *et al.*, "Characterization of promising resist platforms for sub-30 nm HP manufacturability and EUV CAR extendibility study," Proc. SPIE 7271, 763604 (2010)
- [IV.3]: E. Pargon *et al.*, Plasma impact on 193 nm photoresist linewidth roughness: Role of plasma vacuum ultraviolet light, Appl. Phys. Lett. 94, 103 111 (2009)
- [IV.4]: M. Brihoum *et al.*, Revisiting the mechanisms involved in Line Width Roughness smoothing of 193nm photoresist patterns during HBr plasma treatment, J. Appl. Phys. 113, 013302 (2013)
- [IV.5]: M. Fouchier and E. Pargon, HBr/O₂ plasma treatment followed by a bake for photoresist linewidth roughness smoothing, Journal of Applied Physics 115, 074901 (2014)
- [IV.6]: P. De Schepper *et al.*, Hydrogen plasma treatment: The evolution of roughness in frequency domain, Proc. of SPIE Vol. 9054 (2014)
- [IV.7]: P. De Schepper *et al.*, Line edge and width roughness smoothing by plasma treatment, Proc. of SPIE Vol. 8685 868508-1 (2013)
- [IV.8]: P. De Schepper *et al.*, The Influence of H₂ Plasma Treatment on LWR Mitigation: The Importance of EUV Photoresist Composition Plasma Process. Polym. (2014)
- [IV.9]: P. De Schepper *et al.*, Pattern Roughness Mitigation of 22 nm Lines and Spaces: The Impact of a H₂ Plasma Treatment, Plasma Process. Polym. (2014)
- [IV.10]: A. Pret *et al.*, "Roughness characterization in the frequency domain and LWR mitigation with post-litho processes," Proc. SPIE 7639, 763930 (2010)
- [IV.11]: M. Chandhok *et al.*, 22nm HP Integrated Patterning Improvements for EUV, International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography (2010)
- [IV.12]: C. Koh *et al.*, LWR Improvement in EUV Resist Process, Proc. of SPIE Vol. 7969, 796918 (2011)
- [IV.13]: CRC Handbook of Chemistry and Physics, 90th edition, CRC Press (2011) (ISBN: 78143985119)
- [IV.14]: G. Socrates, Infrared and Raman Characteristic Group Frequencies: Tables and Charts, 3rd Edition, Wiley (ISBN: 978-0-470-09307-8)
- [IV.15]: J-M Park *et al.*, Photoresist Adhesion Effect of Resist Reflow Process, Japanese Journal of Applied Physics Vol. 46, No. 9A, 2007, pp. 5738–5741
- [IV.16]: J-M Park *et al.*, Patterning of 32 nm 1:1 Line and Space by Resist Reflow Process, Japanese Journal of Applied Physics Vol. 47, No. 11, 2008, pp. 8611–8614
- [IV.17]: I. W. Cho, *et al.*, Journal of the Korean Physical Society, Vol. 56, No. 6, June 2010, pp. 1767~1771
- [IV.18]: I. W. Cho, *et al.*, Japanese Journal of Applied Physics 49 (2010) 036502
- [IV.19]: A. V. Prêt, *et al.*, Roughness characterization in the frequency domain and linewidth roughness mitigation with post-lithography processes, J. Micro/Nanolith. MEMS and MOEMS 9, 041 203 (2010)
- [IV.20]: C.B. Roth, J.R. Dutcher, Glass transition and chain mobility in thin polymer films, Journal of Electroanalytical Chemistry 584 (2005) 13–22
- [IV.21]: Q. Lin, R. Sooriyakumaran, and W.-S. Huang, Proc. SPIE 3999, 230 (2000)

- [IV.22]: J. M. Roberts, R. Meagley, T. H. Fedynyshyn, R. F. Sinta, D. K. Astolfi, R. B. Goodman, and A. Cabral, Proc. SPIE 6153, 61533U (2006)
- [IV.23]: T. H. Fedynyshyn, R. F. Sinta, D. K. Astolfi, A. Cabral, J. M. Roberts, and R. Meagley, Proc. SPIE 6153, 615315 (2006)
- [IV.24]: M. K. Mundra *et al.*, Effect of Spatial Confinement on the Glass-Transition Temperature of Patterned Polymer Nanostructures, Nano Lett., Vol. 7, No. 3, (2007)
- [IV.25]: HANDBOOK OF BOND DISSOCIATION ENERGIES IN ORGANIC COMPOUNDS, CRC PRESS (2003) (ISBN 0-8493-1589-1)
- [IV.26]: A. P. Mahorowala *et al.*, Line edge roughness reduction by plasma curing photoresists, Proc. Of SPIE 5753, 380 (2005)
- [IV.27]: E. Pargon *et al.*, Mechanisms involved in HBr and Ar cure plasma treatments applied to 193 nm photoresists, J. Appl. Phys 105, 094 902 (2009)
- [IV.28]: L. Azarnouche, "Défis liés à la réduction de la rugosité des motifs de résine photosensible 193 nm", Thèse de doctorat de l'université de Grenoble 2012, pp. 105-149
- [IV.29]: M. Brihoum, "Miniaturisation des grilles de transistors : Etude de l'intérêt des plasmas pulsés.", Thèse de doctorat de l'université de Grenoble 2013
- [IV.30]: J-T. Kim & M-C. Kim, Silicon wafer technique for infrared spectra of silica and solid samples (I), Korean J. of Chem. Eng., 3(1) (1986) 45-51
- [IV.31]: P. De Schepper *et al.*, The Influence of H₂ Plasma Treatment on LWR Mitigation: The Importance of EUV Photoresist Composition Plasma Process. Polym. (2014)

Conclusion générale

La rugosité de bord de ligne ou linewidth roughness (LWR) des motifs est aujourd'hui considérée comme un des critères limitant la miniaturisation des transistors pour les futurs nœuds technologiques inférieurs à 20 nm. En effet, les meilleures lithographies optiques génèrent des motifs de résine avec des rugosités au mieux de l'ordre de 4-5 nm, rugosité qui se transfère dans les empilements de grille lors des étapes de gravure par plasma suivantes. Les transistors obtenus présentent alors des LWR bien au-delà des exigences requises par l'ITRS pour les nœuds technologiques inférieurs à 20nm (<1.7 nm), compromettant alors les performances électriques du dispositif. Les nouvelles technologies de lithographie en cours de développement, notamment la lithographie électronique à multiples faisceaux doivent également répondre à ce critère de rugosité défini par l'ITRS. Dans le cas d'une lithographie électronique basse énergie (5 keV), le défi du contrôle de la rugosité à l'échelle du nanomètre est supposé encore plus critique, notamment à cause du bruit grenaille.

Les travaux présentés dans ce manuscrit ont porté sur la compréhension des phénomènes permettant de contrôler la rugosité de ligne des motifs de résine obtenus par lithographie électronique à moyenne (50 keV) et basse énergie (5 keV), mais également sur quelques stratégies de lissage de la rugosité des motifs après l'étape de lithographie.

Afin d'étudier la rugosité de bord des motifs après lithographie qui donne des valeurs de quelques nanomètres, il faut une métrologie précise s'affranchissant du bruit de mesure. Pour réaliser de telles mesures, je me suis inspiré du protocole développé par Azarnouche qui permet non seulement de retirer la composante de bruit de la valeur de LWR mais permet également d'obtenir une analyse fréquentielle du LWR (PSD). Ainsi, dans le cas d'une lithographie électronique à faisceau formé avec le Vistec SB3054, j'ai pu mettre en évidence l'influence négative des zones de raccord des tirs électronique dans la valeur de LWR et sur les PSD de LWR qui se voient déformées sur presque toute la gamme fréquentielle d'étude. En réadaptant le protocole avec des boites de mesures plus petites on peut limiter l'influence de l'équipement dans la valeur de rugosité.

La première partie des travaux expérimentaux relatée dans le chapitre III de ce manuscrit a porté sur la modification de l'image aérienne obtenue en lithographie électronique aux énergies d'accélération des électrons de 50 keV et 5 keV. La modification de l'image aérienne découle de l'utilisation d'une stratégie de dépôt d'énergie plus robuste qui consiste à réduire la zone exposée par le faisceau d'électrons. Cette dernière est applicable quelle que soit l'énergie d'accélération des électrons. L'amélioration des performances lithographiques avec cette technique a été prévue en partie par des simulations de dépôt d'énergie, mais également expérimentalement avec les deux outils de lithographie électronique mis à ma disposition. La technique permet d'accroître considérablement la stabilité du procédé de lithographie électronique ainsi que de diminuer la valeur de la rugosité après lithographie. Le LWR est diminué d'environ 35% au maximum et la technique permet de lisser toutes les composantes fréquentielles du LWR dans la gamme d'étude mais principalement dans le domaine des basses fréquences. Les principaux mécanismes liés à la baisse de la rugosité dans nos cas sont attribués à la diminution du bruit grenaille, c'est-à-dire l'incertitude sur le nombre de porteurs déposés et à l'amélioration du logarithme de la pente de l'image aérienne normalisé (NILS). Ce gain de LWR est obtenu au détriment de la dose d'exposition, ce qui pourrait a priori limiter son intérêt pour l'industrie. Néanmoins, le développement d'outils à multiples faisceaux pourra dans le futur palier à ce souci

d'augmentation de la dose à déposer par unité de temps. En général, la valeur de rugosité de ligne après lithographie est majoritairement due à ses composantes basses fréquences, ainsi le gain apporté dans le domaine des composantes basses fréquences de rugosité est clairement une bonne chose puisque les traitements de lissage après lithographie sont réputés n'apporter du lissage que dans le domaine des composantes hautes fréquences de rugosité.

Malgré une diminution notable du LWR par une optimisation de la stratégie d'écriture, la valeur de LWR obtenue reste supérieure aux 1.7 nm visées par l'ITRS. Ainsi, dans le chapitre IV, nous avons exploré d'autres voies pour minimiser toujours plus la rugosité, et notamment par l'introduction de traitements post-lithographiques tels que les recuits ou les traitements plasmas.

Les traitements thermiques permettent dans le meilleur des cas une réduction de LWR d'environ 10% mais nécessitent cependant une connaissance rigoureuse des températures caractéristiques des matériaux de résine. Les traitements plasmas explorés, plus rapidement mis en place que les recuits et décrits comme étant les plus efficaces pour réduire le LWR des lignes de résine 193nm dans la littérature, se sont révélés d'une efficacité limitée dans notre cas. Le meilleur traitement s'avère être le plasma de dihydrogène pour lequel une baisse de rugosité d'environ 10% est observée. Les analyses physicochimiques ont permis de montrer que la résine d'étude subissait des transformations similaires à celles observées avec les résine 193nm pour lesquelles les traitements avaient été mis au point, cependant les fortes réductions de LWR ne sont pas au rendez-vous. Il est possible que cette faible diminution de LWR provienne de plusieurs paramètres tels que la nature du polymère de résine et le faible volume des motifs à traiter.

Afin d'obtenir la valeur de rugosité la plus basse possible il a été envisagé de combiner la stratégie d'écriture de la première partie du manuscrit avec les meilleurs traitements après lithographie retenus. Finalement, une réduction de 41% du LWR a été obtenue avec la combinaison d'un biais des motifs de L/S 32nmhp de -50% et d'un plasma H₂. Les valeurs de rugosité obtenues après traitements restent malgré tout au deçà des préconisations de l'ITRS.

Ce manuscrit de thèse a proposé plusieurs voies pour optimiser la rugosité de ligne de motifs de résine. Premièrement, en limitant le bruit inhérent à l'utilisation d'électrons pour déposer de l'énergie à savoir le bruit grenaille, il permet de lisser fortement les composantes basses fréquences de rugosité souvent attribué aux phénomènes aléatoires (car non-corrélés). Et secondement en appliquant des traitements post-lithographiques aux motifs de ligne de résine, qui n'apportent que des gains dans le domaine des hautes fréquences de rugosité. Cependant, les composantes basses fréquences de rugosité dominent toujours la rugosité de nos lignes. Le procédé de lithographie dans sa définition actuelle est sujet à de nombreuses contributions aléatoires qui peuvent avoir un impact sur la rugosité basse fréquence. Parmi ces contributions aléatoires on trouve, l'incertitude sur le nombre de photo-générateur d'acide (PAG) par unité de volume dans la résine, le nombre de sites protégés par unité de volume, le nombre de sites réellement déprotégés et les phénomènes liés à la solubilisation des chaînes polymères dans le bain de développement. La nature chaotique de l'arrangement des chaînes polymère de résine peut être également liée à la rugosité basse fréquence observée. Il faudrait redéfinir totalement les matériaux utilisés à l'heure actuelle qui reposent sur un agencement aléatoire de leurs composants et développer des matériaux dans lequel l'ordre peut régner.

A l'heure actuelle, les technologies de lithographie à multiples faisceaux d'électrons sont toujours en développement comme leur concurrent direct la lithographie EUV. Ces technologies veulent répondre à la fois aux 3 composantes du compromis RLS. Cet objectif semble irréaliste dans l'état actuel de la lithographie. Cependant contrairement à la lithographie EUV, les technologies à multiples

faisceaux d'électrons peuvent à l'aide d'une stratégie d'écriture alternative proposée dans ce manuscrit et sans surcoût produire des lignes avec un LWR réduit sans trop impacter le débit de la technique (possible grâce à la flexibilité de la lithographie électronique). On est en droit de se poser la question, si l'avenir de la lithographie à multiples faisceaux d'électrons sera de se voir attribué le qualificatif de technique de production de masse ?

Glossaire

NA - numerical aperture

FWHM - full width half-maximum

nmhp - nanometer half-pitch

PAG - photoacid generator

LWR - linewidth roughness

LER - line edge roughness

CD - critical dimension

PSD - power spectrum density

PSF - point spread function

CDSEM - critical dimension scanning electron microscope

MEB - microscope à balayage

ATG - analyse thermogravimétrique

DSC - differential scanning calorimetry

SiARC - silicon containing antireflective coating

SoC - spin on carbon

D2S - dose to size

Résumé

Lithographie directe à faisceaux d'électrons multiples pour les nœuds technologiques sub-20 nm

Depuis de nombreuses années, l'industrie microélectronique s'est engagée dans une course à l'augmentation des performances et à la diminution des coûts de ses dispositifs grâce à la miniaturisation de ces derniers. La génération de ces structures de petites dimensions repose essentiellement sur l'étape de lithographie. Dans cette optique, plusieurs techniques de lithographie nouvelle génération (NGL) sont en cours de développement afin de pouvoir répondre aux besoins de l'industrie pour les nœuds technologiques inférieurs à 20 nm. Parmi elles, les solutions de lithographie à faisceaux d'électrons multiples semblent très prometteuses grâce à leur écriture directe sans masque (ML2), ainsi que leur coût et encombrement réduits. Le CEA-LETI s'est associé à l'entreprise Mapper Lithography basée aux Pays-Bas afin d'aider au développement d'une technologie de lithographie électronique à faisceaux d'électrons multiples basse énergie (d'énergie 5 keV). Les travaux de thèse de ce manuscrit visent à contribuer au développement de cette technologie qui pourrait à terme permettre de réaliser des dispositifs CMOS pour les nœuds technologiques actuels et futurs. L'intégration d'une nouvelle technique de lithographie dans l'industrie repose sur 3 grands critères du procédé lithographique, la production horaire (sensibilité), la résolution (taille minimale des structures réalisées) et la rugosité de ligne. La rugosité de ligne est devenue l'un des paramètres les plus critiques limitant à l'heure actuelle la miniaturisation et pour cause cette dernière impacte de manière négative les performances des dispositifs. Alors que l'ITRS préconise une rugosité de ligne inférieure à 1.7 nm pour les futurs nœuds technologiques inférieurs à 20 nm, les lithographies actuelles ne permettent pas d'obtenir des rugosités inférieures à 4-5 nm.

Les travaux de cette thèse visent la minimisation de la rugosité de ligne de résine imprimée par lithographie électronique en proposant des stratégies alternatives d'écriture ou encore par l'introduction de traitements post-lithographiques tels que des recuits thermiques ou des traitements plasma. Les études ont montré qu'en combinant une stratégie d'écriture et un traitement plasma à base de dihydrogène une réduction de 41% du LWR pouvait être obtenue.

Mots-clés: Lithographie, multifaisceaux, électron, basse énergie, rugosité de bord

Abstract

Multibeam lithography for sub-20 nm technological nodes

For decades, the growth of the Semiconductor Industry (SI) has been driven by the paramount need for faster devices at a controlled cost primarily due to the shrinkage of chip transistors. The performances of future CMOS technology generations still rely on the decrease of the device dimensions. However, the photolithography is, today, the limiting factor for pattern miniaturization and the technology has been at a standstill since the development of 193-nm water-based immersion lithography. Moreover, another parameter limiting further semiconductor scaling is the transistor gate linewidth roughness (LWR), i.e. the standard deviation of the gate critical dimension (CD) along the line. The LWR needs to be controlled at the nanometer range to ensure good electrical performances of the future CMOS device. The lithography step is again identified as the root cause of the gate LWR. Indeed, the significant LWR (4-5 nm) of the patterns printed by photolithography is transferred into the gate during the subsequent plasma etching steps, resulting in a final gate LWR far above the sub-2 nm LWR targeted for the sub-20 nm technological nodes. In order to continue scaling down feature sizes of devices, the semiconductor industry is waiting for the maturity of next generation lithographies (NGL). Among NGL, one can find the promising mask-less direct-write techniques (ML2) in which multiple electron beam lithography (multibeam lithography) is regarded as a serious candidate for providing high resolution structures at a low cost. The firm MAPPER Lithography, associated with CEA-LETI is working on the development of such a technology.

The aim of this work is to contribute to the development of a low energy (5 keV) multibeam technology and to focus on the improvement of the LWR of the printed patterns. Several process parameters have been investigated to decrease the LWR: the effect of a specific writing strategy and the introduction of post-lithographic treatments such as plasma treatments or thermal annealing. This work has shown that by combining a biased writing strategy with H₂ plasma treatment, a 41% LWR decrease could be obtained. Although this performance is still above the ITRS requirements, this work opens the pace for LWR optimization with multi-beam lithography.

Keywords: Lithography, multibeam, electron, low energy, Linewidth roughness (LWR)