



HAL
open science

Étude par microscopie à force atomique en trois dimensions de l'évolution de la rugosité de bord de ligne lors de la fabrication d'une grille de transistor MOS

Jérôme Thiault

► **To cite this version:**

Jérôme Thiault. Étude par microscopie à force atomique en trois dimensions de l'évolution de la rugosité de bord de ligne lors de la fabrication d'une grille de transistor MOS. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2007. Français. NNT: . tel-00321961

HAL Id: tel-00321961

<https://theses.hal.science/tel-00321961>

Submitted on 16 Sep 2008

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

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

THESE

présentée par

Jérôme THIAULT

pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITE
JOSEPH FOURIER DE GRENOBLE**

Spécialité : Micro et Nanoélectronique

**Etude par microscopie à force atomique en trois dimensions
de l'évolution de la rugosité de bord de ligne lors de la
fabrication d'une grille de transistor MOS**

soutenue le 6 décembre 2007

Directeur de thèse : Olivier JOUBERT

MEMBRES DU JURY :

Président	: Ahmad BSIESY	Professeur, Université Joseph Fourier de Grenoble
Rapporteurs	: Laïfa BOUFENDI Yvan SEGUI	Professeur, Université d'Orléans Directeur de recherche CNRS, LAPLACE, Toulouse
Examineurs	: Christophe CARDINAUD Erwine PARGON Olivier JOUBERT	Chargé de recherche CNRS, LPCM, Nantes Chargé de recherche CNRS, LTM, Grenoble Directeur de recherche CNRS, LTM, Grenoble
Invité	: Johann FOUCHER Pascal GOURAUD	Responsable Métrologie CEA-Leti, Grenoble Ingénieur ST Microelectronics, Crolles

Cette thèse a été préparée au **Laboratoire des Technologies de la Microélectronique (LTM/CNRS)**,
sur le site du CEA/LETI de Grenoble

THESE

présentée par

Jérôme THIAULT

pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITE
JOSEPH FOURIER DE GRENOBLE**

Spécialité : Micro et Nanoélectronique

Etude par microscopie à force atomique en trois dimensions de l'évolution de la rugosité de bord de ligne lors de la fabrication d'une grille de transistor MOS

soutenue le 6 décembre 2007

Directeur de thèse : Olivier JOUBERT

MEMBRES DU JURY :

Président	: Ahmad BSIESY	Professeur, Université Joseph Fourier de Grenoble
Rapporteurs	: Laïfa BOUFENDI Yvan SEGUI	Professeur, Université d'Orléans Directeur de recherche CNRS, LAPLACE, Toulouse
Examineurs	: Christophe CARDINAUD Erwine PARGON Olivier JOUBERT	Chargé de recherche CNRS, LPCM, Nantes Chargé de recherche CNRS, LTM, Grenoble Directeur de recherche CNRS, LTM, Grenoble
Invité	: Johann FOUCHER Pascal GOURAUD	Responsable Métrologie CEA-Leti, Grenoble Ingénieur ST Microelectronics, Crolles

Cette thèse a été préparée au Laboratoire des Technologies de la Microélectronique (LTM/CNRS),
sur le site du CEA/LETI de Grenoble

Remerciements

Pour débiter, je tiens à remercier l'ensemble des membres du jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail de thèse :

- Ahmad BSIESY pour m'avoir fait l'honneur de présider ce jury de thèse. Je le remercie particulièrement d'avoir accepté de suppléer à la dernière minute René-Louis INGLEBERT, qui était souffrant le jour de la soutenance. Je les remercie donc vivement tous les deux, pour les efforts qu'ils ont faits afin que je puisse soutenir mes travaux à la date prévue.

- Laïfa Boufendi pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail et au temps qu'il y a consacré. Je le remercie également pour sa sympathie et la grande confiance qu'il a portée en moi tout au long de mes études supérieures. Merci de m'avoir fait découvrir le monde de la recherche et du plasma...

- Yvan Segui pour l'évaluation de ce travail en qualité de rapporteur.

- Olivier Joubert, mon directeur de thèse, pour m'avoir accueilli dans son laboratoire et accepté de diriger ce travail de recherche. Je le remercie sincèrement pour la confiance entière et immédiate qu'il m'a donnée, son optimisme quotidien, sa disponibilité, ces nombreuses explications et tous les conseils pertinents qu'il m'a donnés durant toute cette période de thèse. Un homme exceptionnel pour la recherche et qui restera pour moi un exemple...Merci Olivier

- Pascal Gouraud pour avoir assisté à ce jury de thèse et apporter une dimension industrielle à ce sujet de thèse.

Dans les membres du jury, je tiens à remercier plus particulièrement deux personnes, qui ont encadré et vécu au quotidien ces trois années de thèse (ou plutôt quatre), je parle bien sûr, d'Erwine Pargon et de Johann Foucher, sans qui cette thèse aurait eu un saveur bien différente.

- Erwine, c'est bien entendu à toi que j'adresse mes plus forts remerciements. Ce n'est qu'un an et demi avant la fin de la thèse que tu es arrivé dans ma vie agitée de petit thésard. Un peu perturbée par le début, tu as su relever mon envie de science. Dès ton arrivée, tu as montré un fort enthousiasme pour le sujet et tu as su redonner un nouvel élan à ce travail de recherche. Ton dynamisme, ton écoute et ta sympathie m'ont vraiment permis de finaliser cette thèse brillamment. Je ne sais vraiment pas ce qu'aurait été cette thèse sans ton aide... Dans tous les cas, tu as assuré et j'ai eu énormément de plaisir à travailler et échanger avec toi. Aujourd'hui, la science a besoin de personnes comme toi et je suis sûr que tu feras une carrière exemplaire remplie de belles et grandes découvertes... Très bonne chance pour la suite et encore un grand grand merci

- Jojo, issu de la même école d'ing' et du même labo, tu m'as pris sous ton aile dès le début afin que l'on mette en place un nouvel outil de métrologie, le CD-AFM. Avec les différents problèmes que ceci implique, nous avons finalement réussi à mettre au point cette technique qui sera énormément utile pour les futures études sur le sujet. Je te remercie sincèrement pour ton aide, tes nombreux conseils et ta bonne humeur. Bonne chance pour la suite de tes recherches.

Je tiens maintenant à remercier chaleureusement toutes les personnes qui m'ont soutenues et aidées (de près comme de loin) à aboutir à ce titre de Dr :

- Jamal et Amandine, comment ne pas citer dans les remerciements ces collègues de promo de thèse qui vivent au même moment les mêmes choses que soi. Ce fut vraiment un plaisir de partager et de vivre cette période avec vous deux. Je retiens surtout les pauses café, les soirées, les méandres de l'administration, la conf à Marseille, les déprimés sur notre sort, nos

discussions très sérieuse (si, si,..) sur nos manips, l'avancement de nos thèses et la rédaction de nos manuscrits ... Finalement, on y est arrivé... alors bravo et merci à vous deux. Je vous souhaite une grande réussite professionnelle et personnelle car vous le valait bien...

- Mika, merci pour l'aide considérable que tu m'as apporté dans la compréhension de cet AFM3D et pour ta sympathie. Bonne chance pour la suite et doucement avec les voyages en Malaisie ...

- Raph, Ah mon collègue de bureau avec qui j'ai passé quasi mes trois années. Ca a été vraiment un plaisir de partager ce lieu avec toi. T'es vraiment un gars tranquille avec qui on a envie de passer du temps, comme un petit concert reggae ou une sortie snow par exemple (on remet ça quand tu veux). Merci de m'avoir supporté pendant ces trois années et plein de bonnes choses pour l'avenir.

- Thibaut, ha le carnaval de Dunkerque et la sympathie des ch'tis. J'ai passé de très supers moments à refaire la science avec toi ... Alors merci et plein de bonnes choses pour la suite.

- Malou et Coco, ah les meufs du labo toujours prêtes à te détendre et à te raconter une c..... sans elle le labo serait vraiment plus triste .. Continuez à garder cette bonne humeur riieuse ...

- Kevin, un gons' qui devrait y avoir dans chaque équipe, plein de bonne humeur et de sympathie. Alors merci à toi pour les bons moments de détente partagé ensemble.

- JH et Gilles, Merci pour votre aide, vos conseils et votre soutien.

- Mathew Lefevre de chez Veeco pour ses explications et ces maintenances sur l'équipement.

- Amandine Picon de chez Rohm and Haas pour les nombreuses discussions et échanges que l'on a eu sur les origines (bien complexe) de la rugosité de bord après lithographie.

- Fred Sidor, Merci pour les nombreuses manips que tu m'as faites, mais surtout pour ta sympathie et ta bonne humeur quotidienne... allez les bleus

- Titi, quelle bonne humeur !! Mais où vas-tu chercher tous ces powerpoints ? Merci pour ton aide et les conseils pour l'achat de l'appart. Et maintenant c'est bon, je crois que tu peux effacer toutes mes données du serveur.

- Et je n'oublie pas Bernard pour les contacts qu'il m'a donnés pour l'après thèse. Je le remercie donc vivement d'avoir soutenu ma candidature chez Thermofisher Scientific.

- Mais aussi, merci Anne-Laure, Fred Lazzarino (merci pour ton aide sur l'étude avec le carbone amorphe), Xavier (merci pour tes remarques pertinentes et ton soutien lors de mes répétitions de soutenance), David Fuard (Merci de l'aide pour les simulations Matlab), Seb decossas (Merci pour les explications en AFM), Anne, Vincent Farys, Tatiana, Karim, Florian (un petite coupe chez Gerard ?), Tanguy Maurice, Sylvaine, Agnès et Daniel Henry, Pauline LTM et Pauline CEA, Max Darnon et Max Besacier, David Peyrade, Thierry Baron, Nico Posseme, Philippe Vela, Jeremy Bilde, Stef Landis, et tous les personnes du LTM qui est vraiment un labo exceptionnel .

Un immense merci aussi à tous mes amis pour leurs soutiens, leur présence et les moments excellents que l'on a passé ensemble avant, pendant et j'espère encore très longtemps après la thèse. Parmi eux, je remercie particulièrement : Fago, Beufa, Bab's, Billy,

Cheper, Flo, Olive, Fred, JoJo, Carine, la Tomache, le Chaillou, Carole, Carlos, Zizou (enfin docteur mon pote), Walyd, Simon, Malou, Leno, Jorge, ...et ceux que j'aurais oublié....
Merci, car sans vous la vie serait nettement moins marrante !!!

Finalement, mes remerciements s'adresse à ma chérie Aurélie (ou plutôt Chouchette) avec qui je partage ma vie, mes hauts et mes bas. Un immense merci à elle pour son soutien dans les moments difficiles, sa présence, sa patience, ses excellentes compétences en orthographe et l'équilibre qu'elle m'apporte.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à mes parents et mon 'pti reuf ' Julien, qui ont toujours été là pour me soutenir et m'encourager tout au long de mes études. Sans eux, je n'en saurais pas la aujourd'hui ... alors Merci.

MERCI, MERCI, MERCI à tous

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	11
CHAPITRE 1. CONTEXTE TECHNOLOGIQUE.....	13
1.1. LA MICROELECTRONIQUE	14
1.2. LA TECHNOLOGIE CMOS	15
1.2.1. <i>Le principe de fonctionnement d'un transistor MOS</i>	15
1.2.2. <i>La réalisation d'un circuit intégré à technologie CMOS</i>	16
1.2.2.1. Le « Front End ».....	17
1.2.2.2. Le « Back End »	19
1.3. LA LITHOGRAPHIE.....	20
1.3.1. <i>La lithographie optique par projection</i>	20
1.3.1.1. Principe	20
1.3.1.2. Le système optique	21
1.3.1.3. La formation de l'image	22
1.3.1.4. L'ouverture numérique.....	23
1.3.1.5. La résolution.....	24
1.3.1.6. La profondeur de champ	24
1.3.2. <i>Les résines à amplification chimique</i>	25
1.3.2.1. Composition	25
1.3.2.2. Les principes réactionnels lors du procédé lithographique	26
1.3.2.3. Propriétés.....	27
1.3.3. <i>Les techniques de lithographie de « nouvelle générations »</i>	29
1.3.3.1. La lithographie 193nm à immersion.....	29
1.3.3.2. La lithographie par faisceau d'électrons.....	29
1.3.3.3. La lithographie extrême ultraviolet (EUV).....	31
1.3.3.4. La nanoimpression	32
1.4. LA GRAVURE PLASMA.....	34
1.4.1. <i>Les enjeux de la gravure par plasma</i>	34
1.4.1.1. La sélectivité	35
1.4.1.2. L'anisotropie	35
1.4.1.3. Le contrôle de la dimension critique.....	35
1.4.1.4. L'uniformité macroscopique	36
1.4.1.5. L'uniformité microscopique.....	37
1.4.1.6. Les résidus de gravure.....	37
1.4.2. <i>Les mécanismes de gravure</i>	38
1.4.2.1. La gravure chimique.....	38
1.4.2.2. La gravure physique	38
1.4.2.3. La gravure plasma	39
1.5. LES DEFIS TECHNOLOGIQUES LIES A LA MINIATURISATION DES COMPOSANTS.	42
1.5.1. <i>La réalisation d'une grille de transistors MOS</i>	42
1.5.2. <i>Les exigences requises</i>	44
1.5.3. <i>La problématique de la rugosité de bord</i>	45
1.6. OBJECTIFS DE LA THESE	47
1.7. BIBLIOGRAPHIE.....	48
CHAPITRE 2. METROLOGIE DE LA RUGOSITE DE BORD DE LIGNE.....	53
2.1. RAPPELS DE STATISTIQUES	54
2.2. DEFINITION DE LA RUGOSITE DE BORD.....	56
2.3. LES OUTILS DE MESURES.....	58
2.3.1. <i>La microscopie électronique à balayage</i>	58
2.3.1.1. L'interaction électrons matière	58
2.3.1.2. Les types de microscope électronique à balayage	59
2.3.1.3. Limitations pour la mesure de la rugosité de bord.....	61
2.3.2. <i>La scattérométrie</i>	61
2.3.3. <i>La microscopie à force atomique</i>	62
2.3.3.1. Principe de fonctionnement	62
2.3.3.2. Forces d'interaction	63

2.3.3.3.	Mode de fonctionnement	64
2.3.3.4.	Le microscope à force atomique en 3 Dimensions	66
2.3.4.	<i>Conclusion</i>	68
2.4.	LE DIMENSION X3D DE CHEZ VEECO INSTRUMENTS	69
2.4.1.	<i>Principales caractéristiques</i>	69
2.4.1.1.	La tête AFM	70
2.4.1.2.	Les équipements associés	71
2.4.1.3.	Les pointes de mesures	71
2.4.2.	<i>Protocole de mesure sur l’X3D</i>	73
2.4.2.1.	La qualification des pointes de mesures	73
2.4.2.2.	La Mesure.....	75
2.4.2.3.	La validité de la mesure et le traitement des données.....	75
2.4.3.	<i>Test des performances de l’AFM 3D</i>	77
2.4.3.1.	La précision de la mesure du CD.....	77
2.4.3.2.	La mesure de LWR.....	78
2.4.3.3.	Le choix des pointes de mesures	81
2.4.4.	<i>Difficultés et limitations des mesures</i>	82
2.4.4.1.	La zone d’ombre en bas du motif	82
2.4.4.2.	La dérive du plateau de mesure lors de l’acquisition de l’image	83
2.4.4.3.	La prise de particule sur la pointe.....	83
2.4.4.4.	Le raccord de champ en lithographie par faisceau d’électrons	84
2.4.4.5.	L’usure des pointes de mesures sur des matériaux durs	85
2.4.4.6.	Le diamètre des pointes de mesures	85
2.5.	BIBLIOGRAPHIE.....	87

CHAPITRE 3. LA RUGOSITÉ DE BORD DE LA RESINE 90

3.1.	IMPACT DE L’ETAPE DE LITHOGRAPHIE OPTIQUE.....	91
3.1.1.	<i>Le procédé de lithographie optique par projection</i>	91
3.1.2.	<i>Etat de l’art sur les origines de la rugosité de bord</i>	92
3.1.3.	<i>Étude expérimentale</i>	95
3.1.3.1.	Protocole expérimental	95
3.1.3.2.	Influence de la dose d’exposition	95
3.1.3.3.	Influence du focus	97
3.1.3.4.	Influence de la taille du masque	97
3.1.4.	<i>Conclusion</i>	98
3.2.	IMPACT D’UN PROCÉDE PLASMA SUR LA RUGOSITE DE BORD DE LA RESINE	100
3.2.1.	<i>Protocole expérimental</i>	100
3.2.2.	<i>Aspect chimique de la gravure plasma</i>	102
3.2.2.1.	Plasma en O ₂	103
3.2.2.2.	Plasma en SF ₆	105
3.2.2.3.	Plasma en CH ₂ F ₂	108
3.2.3.	<i>Aspect physique de la gravure plasma</i>	110
3.2.3.1.	Plasma O ₂ avec puissance d’auto polarisation.....	110
3.2.3.2.	Plasma SF ₆ avec puissance d’autopolarisation	112
3.2.3.3.	Plasma d’Argon.....	114
3.3.	EVOLUTION DE LA RUGOSITE DE BORD DE LIGNE LORS D’UN PROCÉDE INDUSTRIEL DE TRAITEMENT DE LA RESINE	117
3.4.	CONCLUSION	120
3.5.	BIBLIOGRAPHIE.....	122

CHAPITRE 4. TRANSFERT DE LA RUGOSITE DE BORD DE LIGNE LORS D’UN PROCÉDE DE GRAVURE GRILLE. 125

4.1.	INTRODUCTION	126
4.1.1.	<i>Etat de l’art</i>	126
4.1.2.	<i>Protocole expérimental</i>	126
4.1.2.1.	Reconstitution de l’évolution du profil de la ligne après chaque étape de gravure.....	128
4.1.2.2.	Protocole de mesure de l’épaisseur de la couche de passivation et du CD _{bias}	129
4.1.2.3.	Mesure de LWR	129
4.2.	EVOLUTION DE LA RUGOSITE DE BORD APRES OUVERTURE DU BARC ET GRAVURE DE LA GRILLE... 130	
4.2.1.	<i>Evolution de la rugosité de bord de la résine après ouverture du BARC</i>	130
4.2.1.1.	Contrôle dimensionnel.....	131
4.2.1.2.	Evolution de LWR.....	133
4.2.2.	<i>Evolution de la rugosité de bord de la grille finale lors de l’étape de gravure de la grille</i>	136

4.2.2.1.	Influence de la concentration d'oxygène	136
4.2.2.2.	Influence de la chimie de gravure de la grille.....	143
4.2.2.3.	Influence de l'ajout d'une étape d'atterrissage sur l'oxyde et de sur gravure.....	146
4.2.2.4.	Conclusion.....	148
4.3.	ETUDE DU TRANSFERT COMPLET DE LA RUGOSITE DE BORD AVEC DIFFERENTS MASQUES DE GRAVURE	148
4.3.1.	<i>Influence du procédé d'ouverture du BARC sur la rugosité de bord de la grille finale, gravée avec un masque résine.....</i>	148
4.3.1.1.	Contrôle dimensionnel.....	149
4.3.1.2.	Transfert de LWR.....	151
4.3.2.	<i>Transfert de la rugosité de bord avec un masque dur en SiO₂.....</i>	153
4.3.2.1.	Contrôle dimensionnel.....	155
4.3.2.2.	Transfert de LWR.....	156
4.3.3.	<i>Transfert de la rugosité de bord avec un masque en Carbone.....</i>	156
4.3.3.1.	Contrôle dimensionnel.....	159
4.3.3.2.	Transfert de LWR.....	160
4.3.3.3.	Conclusion.....	162
4.4.	CONCLUSION	162
4.5.	BIBLIOGRAPHIE.....	163
CONCLUSION GENERALE		164

Introduction générale

Téléphone portable, ordinateur, lecteur MP3, console de jeux, appareil photo numérique, clé USB, GPS ... Quel est le point commun à tous ces appareils qui peuplent aujourd'hui notre quotidien ? Le circuit intégré.

Depuis leur apparition dans les années soixante, les circuits intégrés n'ont cessé de se miniaturiser, de se complexifier et de remplir des fonctions toujours plus ambitieuses. Cette progression a permis le développement de l'informatique, des moyens de communication, de la sécurité automobile et l'amélioration considérable de nos connaissances dans le domaine des sciences du vivant afin d'accomplir de véritables prouesses dans le traitement de certaines maladies. Cette fulgurante évolution est le résultat d'une croissance exceptionnelle de l'industrie de la microélectronique, qui joue aujourd'hui un rôle important dans de nombreux secteurs économiques et industriels. La clé de ce succès repose sur le seul objectif que s'est fixé depuis plus de trente ans l'industrie de la microélectronique : doubler la densité d'intégration des circuits tous les deux ans. Durant toutes ces années, les ingénieurs et chercheurs ont assuré cette performance en réduisant les dimensions du transistor MOS (Metal Oxide Semi-conductor en anglais), brique élémentaire de la technologie CMOS (complementary metal oxyde Semi-conductor, en anglais). Cependant, nous approchons actuellement des limites physiques, technologiques et économiques de la miniaturisation du transistor. En effet, un consensus général prévoit que la technologie CMOS aura atteint ces limites autour de 2020. Ce sera alors l'ère des nanotechnologies. Mais avant cela, un défi plus urgent nous attend : mener la technologie CMOS jusqu'à ses dimensions ultimes. C'est dans ce contexte de miniaturisation que s'inscrit ce travail de thèse.

La première difficulté de la miniaturisation est qu'actuellement les exigences en termes de dimensions des grilles de transistor vont au-delà des possibilités de la lithographie, étape clé qui définit la dimension du composant. Par exemple, la lithographie doit être capable en 2010 de réaliser des motifs de résine de 30nm avec une variation de sa dimension de $\pm 8\%$. Ces critères dimensionnels concernent également l'étape de gravure qui doit assurer le transfert de la dimension du motif de résine dans les couches actives du dispositif. Ainsi, en 2010 la longueur de la grille du transistor après gravure doit être de 18nm avec une variation de sa dimension de 1,4nm. Avec les techniques actuelles de fabrication et pour des longueurs de grilles inférieures à 30nm, les variations moyennes de la longueur de la grille de transistor, appelées rugosité de bord, entraînent des fluctuations électriques dans le transistor qui ne sont évidemment pas acceptables pour le bon fonctionnement des futures générations de transistor. Dans le but de continuer la progression de la technologie CMOS, il convient donc de réduire la rugosité de bord de la grille de transistor. Pour réussir ce défi technologique et contrôler ce paramètre, il est essentiel de le mesurer avec précision pour pouvoir ensuite comprendre ses origines et son évolution après chaque étape technologique de fabrication.

L'objectif de ce travail de thèse est donc, dans un premier temps, de trouver un protocole de caractérisation de la rugosité de bord afin, dans un second temps, de comprendre ses origines et étudier son évolution lors des différentes étapes technologiques de fabrication d'une grille de transistors MOS.

Le chapitre 1, rappelle les principes de bases du transistor MOS, ainsi que les différentes étapes nécessaires à la fabrication d'un circuit intégré et plus particulièrement celles de lithographie et de gravure plasma. Les défis technologiques liés à la miniaturisation du transistor sont également abordés afin de comprendre les objectifs de ce travail de thèse.

Le chapitre 2 est destiné à la métrologie de la rugosité de bord. Dans le but de définir mathématiquement ce paramètre, nous débuterons par quelques rappels de statistiques. Par la suite, les différents outils de métrologie potentiellement capables de fournir une valeur de la rugosité de bord seront décrits, et plus particulièrement, le microscope atomique en trois dimensions, une technique récente et prometteuse que nous avons choisie pour effectuer nos études sur la rugosité de bord. La dernière partie de ce chapitre est consacrée aux différents tests de performances et au protocole de caractérisation de la rugosité de bord mis au point avec ce nouvel outil.

Le chapitre 3 est dans un premier temps consacré à la compréhension des origines de la rugosité de bord d'une ligne de résine réalisée par lithographie optique. Cette étude comporte un état de l'art sur le sujet et un aspect expérimental. Dans la seconde partie de ce chapitre, nous avons étudié l'impact d'un procédé de gravure plasma sur la rugosité de bord d'une ligne de résine en isolant l'aspect chimique et physique de la gravure par plasma. Cette étude nous a permis de mettre en évidence certains mécanismes d'évolution de la rugosité de bord d'un motif de résine.

Le chapitre 4 est destiné à l'étude du transfert de la rugosité de bord de ligne lors des différentes étapes de fabrication d'une grille de transistor MOS. Cette étude a été réalisée avec différents masques de gravure afin d'identifier et d'évaluer l'influence de chaque étape de gravure. Ce travail nous a permis de déterminer les paramètres importants qui contrôlent la rugosité de bord de la grille finale.

Chapitre 1.

Contexte technologique

L'objectif de ce chapitre est de situer le sujet cette thèse dans le contexte technologique actuel de la microélectronique. Dans une première partie, nous présenterons le principe de fonctionnement d'un transistor MOS et la fabrication d'un circuit intégré CMOS. Par la suite, nous rappellerons les principes de base des étapes de lithographie et de gravure par plasma, utilisées dans l'industrie de la microélectronique pour la fabrication des circuits intégrés. Finalement, nous aborderons les défis technologiques liés à la miniaturisation des composants afin de comprendre les objectifs de ce travail de thèse.

1.1. La microélectronique

De l'informatique à la communication, en passant par les loisirs, les circuits intégrés dans les appareils électroniques font aujourd'hui partie de notre vie quotidienne. Depuis leur apparition dans les années soixante, ils ne cessent de se miniaturiser, de se complexifier, de remplir des fonctions toujours plus ambitieuses et ceci de plus en plus rapidement. Cette évolution est le résultat d'une croissance exceptionnelle de l'industrie de la microélectronique.

La microélectronique débute en 1947 avec l'invention du transistor par John Bardeen, Walter Brattain et William Shockley des *Bells laboratories*. Cette découverte se poursuit en 1958, avec la réalisation du premier circuit intégré par Jack Kilby de *Texas Instruments*. Sur un même morceau de silicium, il élabore un montage électronique composé d'un transistor, de quatre diodes et quelques résistances. La microélectronique est née. En 1968, Robert Noyce met au point la technologie « planar » qui permet la réalisation de circuits intégrés utilisant l'association de transistors MOS (Metal – Oxyde – Semi-conducteur) de conduction différente (type N et P), pour effectuer des fonctions logiques. Cette innovation technique, appelée technologie CMOS, (semi-conducteur d'oxyde métallique complémentaire) est certainement à l'origine du développement industriel des circuits intégrés, et est encore actuellement largement prédominante. Dès lors, l'industrie de la microélectronique connaît une croissance exceptionnelle, tant en terme de performances des circuits intégrés qu'en terme de réduction des coûts de fabrication. Cette évolution remarquable est fortement liée à la réduction en dimension du transistor MOS, rendue possible par une meilleure maîtrise des matériaux semi-conducteurs (notamment du silicium) et des procédés de fabrication (lithographie, gravure plasma, ...). En effet, la miniaturisation des dispositifs a entraîné :

- ✓ Une hausse de la vitesse de fonctionnement des dispositifs qui est inversement proportionnelle à sa dimension.
- ✓ Une augmentation de la densité d'intégration, correspondant au nombre de composants par puce.
- ✓ Une réduction des coûts de fabrication d'une fonction élémentaire.

Dès 1965, Gordon Moore, ingénieur et co-fondateur d'*Intel*, prévoit un doublement de la densité d'intégration des circuits électroniques tous les 18 mois [Moore 65]. Depuis maintenant quatre décennies, l'industrie de la microélectronique progresse au rythme de cette loi dite « de Moore ». Aujourd'hui, dans l'optique de se tenir à cette loi, le SIA (Semiconductor Industry Association), ensemble d'industriels, de fabricants, de fournisseurs, d'organisations gouvernementales et d'universités, publie chaque année la feuille de route ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors) [ITRS]. Ce guide fixe l'ensemble des spécifications techniques (dimensions, matériaux, performances, équipements, architecture...) nécessaires au bon fonctionnement des futures générations de circuits intégrés.

Pour les dix années à venir, l'évolution des performances des circuits intégrés réside encore dans la diminution en dimension de ses éléments constitutifs. C'est dans ce contexte technologique que s'inscrit ce travail de thèse. Cependant, la miniaturisation des composants fait apparaître de nouvelles contraintes (baisse de la tension d'alimentation, effet de canaux courts, courant de fuite par effet tunnel). Une simple réduction d'échelle n'est alors plus possible pour les générations de transistors au delà de 2013 et des ruptures technologiques commencent à être envisagées ; nouveaux matériaux pour l'oxyde de grille et la grille, nouvelles architectures du transistor MOS (transistor sur substrat SOI [Cristoloveanu], transistor à grille multiples [Rhew 02, Mouis 01],...). Certains projets futuristes émergent

également pour remplacer la microélectronique silicium qui devrait atteindre ces limites d'ici une quinzaine d'années. Parmi ceux-ci, nous pouvons citer l'électronique moléculaire [Dupuy 02, Aviram 74, Lenfant 03, Joachim 02, Joachim 00, Reed 01], l'ordinateur optique [Demarthon 02] ou encore la nanoélectronique avec les nanotubes de carbone [Derycke 01, Rueckes 00] et l'ordinateur quantique [Grabert, Gorter 51, See 03].

1.2. La technologie CMOS

Actuellement, la technologie CMOS est dominante dans la fabrication des microprocesseurs, des mémoires et des circuits spécifiques. Le transistor est l'élément de base de ces circuits intégrés. Le premier circuit intégré, utilisant cette technologie, fut un inverseur, contenant seulement deux transistors. Aujourd'hui, les circuits CMOS logiques comportent de l'ordre de 100 millions de transistors. Cette progression est le résultat d'une meilleure maîtrise des matériaux semi-conducteurs (notamment du silicium) et du développement de nouveaux procédés de fabrication (lithographie et gravure plasma).

Cette partie présente le principe de fonctionnement d'un transistor MOS et la fabrication d'un circuit intégré à technologie CMOS.

1.2.1. Le principe de fonctionnement d'un transistor MOS

Le transistor MOS est le composant actif le plus utilisé dans la plupart des circuits intégrés. De manière idéale, son principe de fonctionnement est comparable à celui d'un interrupteur. En effet, il permet le passage ou non du courant suivant la tension qu'on lui applique. Le transistor MOS est composé de trois éléments essentiels :

- ✓ La **source** et le **drain** qui correspondent à des réservoirs de charges. Ce sont des régions du substrat en silicium dopées N (excès d'électrons libres) ou P (excès de trous).
- ✓ La **grille** qui correspond à l'électrode de commande. Elle permet de contrôler le courant qui circule à travers le canal de conduction, entre la source et le drain.
- ✓ L'**oxyde de grille** qui isole électriquement la grille du transistor de la source et du drain.

Le principe de fonctionnement du transistor MOS est basé sur la modulation d'une densité de charges dans une couche semi-conductrice, via un champ électrique qui lui est appliqué perpendiculairement. La création par effet de champ de porteurs de charges dans le canal de conduction (électrons pour un transistor de type N et trous pour un transistor de type P) est régie par la polarisation (V_g) de l'électrode de commande (grille) à travers une couche isolante (oxyde de grille). Le transport des porteurs dans le canal se fait sous l'impulsion d'une différence de potentiel (V_{ds}) entre les deux réservoirs de charges (source et drain), établissant un courant de drain (I_d), figure 1-1.

Le transistor assure donc la transition d'un état bloqué ($V_g \leq 0V$) pour lequel le courant de drain équivaut au courant de fuite I_{off} , à un état passant pour lequel la polarisation de grille V_g est égale à celle de drain V_d ($V_g = V_d = V_{dd}$), permettant le passage du courant de drain I_{on} , figure 1-2. Le passage du premier état au second est effectif lorsqu'un nombre suffisant de porteurs est présent dans le canal, c'est-à-dire quand une tension de grille (V_g), supérieure à la tension dite de seuil (V_t), est appliquée.

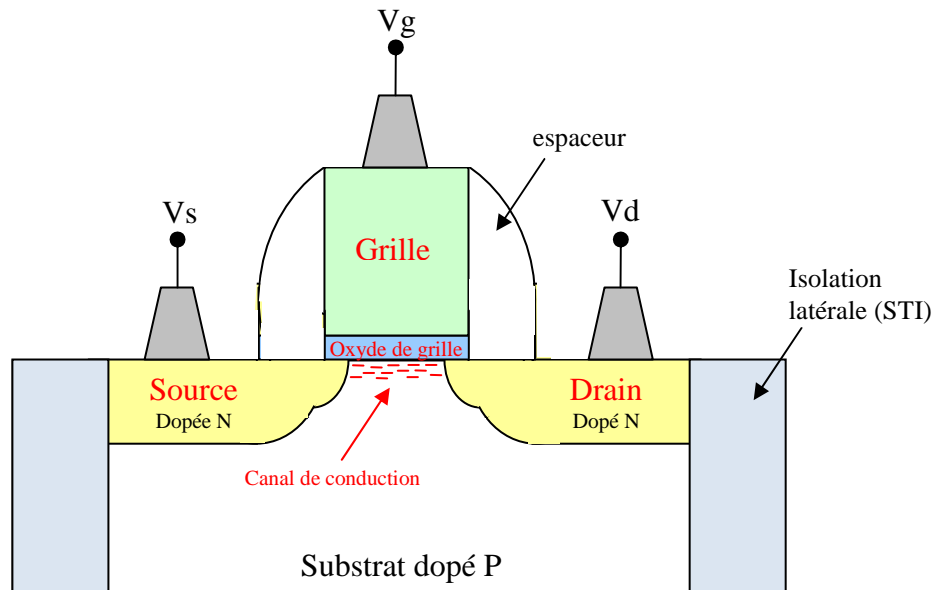


Figure 1-1 : Schéma représentant un transistor à effet de champ NMOS

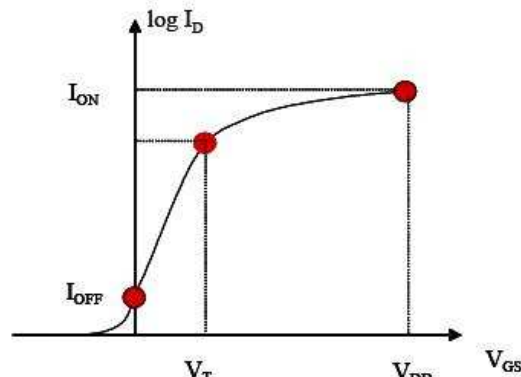


Figure 1-2 : Caractéristique de sortie I_D (V_{GS}) d'un transistor NMOS

Le paramètre principal qui contrôle la vitesse de fonctionnement d'un transistor MOS est le temps que mettent les électrons (ou les trous) à parcourir la distance source-drain. Le temps de réponse du transistor MOS est donc directement lié à la distance source-drain : plus celle-ci est courte, plus la vitesse de fonctionnement du transistor MOS est grande. On comprend pourquoi un des objectifs en microélectronique est la miniaturisation de la grille de transistor.

Pour une description plus détaillée du principe de fonctionnement d'un transistor MOS, le lecteur pourra faire référence à l'ouvrage de S.M.Sze [Sze 81] ou à la revue de technique de l'ingénieur [Skotnicki].

1.2.2. La réalisation d'un circuit intégré à technologie CMOS

Le circuit intégré est l'association d'une puce et d'un boîtier de protection. La puce, cœur du circuit intégré, est composée de plusieurs millions de composants élémentaires (des résistances, des diodes, des condensateurs et surtout des transistors) qui sont intégrés sur le même substrat (souvent en silicium) et reliés entre eux de manière à constituer des fonctions logiques (inverseur, portes « et », « ou »...). L'association de ces différentes fonctions permet ainsi de réaliser des fonctions complexes de calculs. La fabrication d'un circuit intégré nécessite plusieurs centaines de traitements différents : dépôt de couches minces isolantes ou conductrices, gravure, attaque chimique, recuit thermique approprié, dopage par implantation d'atomes... Lorsque l'ensemble des traitements est effectué, la tranche de silicium, qui

Chapitre 1 : Contexte technologique

regroupe une à plusieurs centaines de fois le même circuit intégré, est découpée en pastilles. Chaque pastille ou puce est ensuite montée dans un boîtier de protection en céramique ou en plastique, muni de pattes de connexion pour pouvoir l'intégrer sur une carte électronique. Une fois encapsulées, certaines puces fabriquées sont contrôlées individuellement et celles qui s'écartent des spécifications attendues sont rejetées.

La fabrication d'un circuit intégré nécessite de nombreuses étapes qui peuvent être regroupées en deux catégories : les étapes technologiques qui concernent la réalisation des dispositifs actifs (étapes dit de «Front End») et celles qui concernent la réalisation des interconnexions entre ces dispositifs afin de réaliser la fonction logique voulue (étapes dit de «Back End»).

1.2.2.1. Le « Front End »

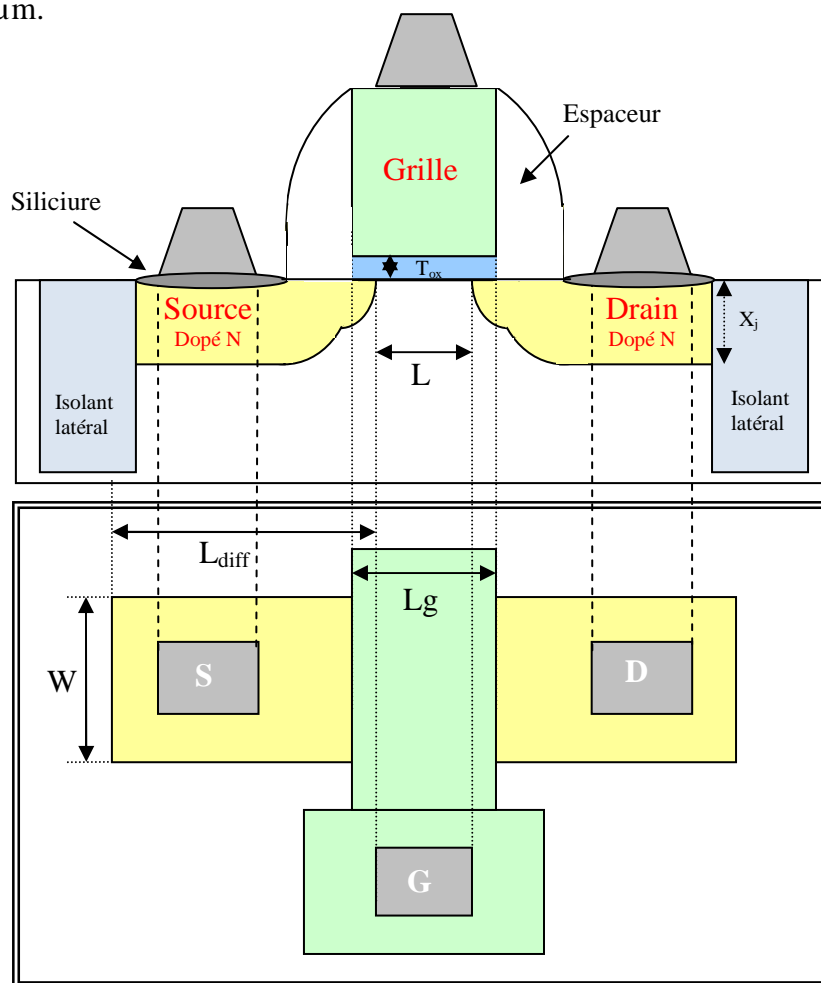
Le substrat de départ est une plaque de silicium monocristallin. Actuellement, les industriels travaillent sur des plaques de 200 et 300mm de diamètre. Les étapes qui permettent de réaliser les transistors MOS du circuit intégré sont les suivantes et le résultat final est schématisé sur la figure 3.

- ✓ **Formation de l'isolement entre les dispositifs.** Cette étape permet d'isoler électriquement les zones actives des différents composants, par des tranchées remplies d'oxyde. L'isolement actuellement utilisé est l'isolement par tranchées peu profondes, nommé Shallow Trench Isolation (STI).
- ✓ **Implantation des caissons N (phosphore) ou P (bore).** Ce sont des îlots où le type de conduction est opposé à celui du transistor qui y sera élaboré.
- ✓ **Formation de l'oxyde mince de grille en SiO₂.** Cette étape s'effectue par procédé d'oxydation thermique à 900°C et 1000°C. La qualité (structurale et électrique) de l'oxyde de grille est primordiale pour assurer une bonne isolation de la grille, du reste du transistor. A chaque génération de transistors, l'oxyde de grille est aminci. Actuellement, cet oxyde est épais de 1,2nm, mais en dessous de 1nm, cet oxyde perd ses propriétés isolantes du fait de l'effet tunnel, ce qui détériore les performances du transistor. De nombreuses études sont actuellement en cours pour remplacer l'oxyde de silicium par des diélectriques à plus forte permittivité, dits « High K », comme par exemple le HfO₂, ou le ZrO₂ qui pour des épaisseurs plus grandes présentent la même capacité équivalente d'oxyde. En effet, la capacité C d'un matériau est définie par :
$$C = \frac{\epsilon S}{e}$$
 où ϵ est la permittivité du matériau, S la surface de la capacité et e l'épaisseur.
- ✓ **Formation de l'électrode de grille.** Elle est actuellement en silicium polycristallin, mais il est prévu pour les futures générations de transistor de revenir à des grilles en métal, telles que le TiN ou le TaN, afin d'éviter le phénomène de déplétion de grille [Legouil 06]. Les étapes d'élaboration de la grille en polysilicium sont détaillées dans la section 1.5.1, les problèmes liés à la réalisation de la grille faisant l'objet de ce travail de thèse.
- ✓ **Formation des jonctions source-drain.** Les jonctions sont réalisées par une implantation ionique en deux fois. Lors de cette étape, les zones non implantées sont protégées du plasma par un masque en résine. Une première implantation ionique de dopants est réalisée avec des faibles doses (10^{13} atomes/cm²), et la deuxième est réalisée avec des doses plus fortes (10^{15} atomes/cm²) après formation des espaceurs.

Chapitre 1 : Contexte technologique

- ✓ **Formation des espaceurs.** Ils sont constitués d'un matériau diélectrique comme le SiO_2 ou le Si_3N_4 . Cette étape a été introduite entre les deux étapes d'implantation pour limiter la diffusion de dopants sous la grille, et ainsi éviter que les extensions des jonctions source-drain sous la grille soient trop profondes.
- ✓ **Interconnexions locales.** Les jonctions, avant d'être interconnectées, sont siliciurées (élaboration d'une couche de siliciure - actuellement du CoSi_2 - au dessus des zones drain/source et grille) pour réduire la résistance de contact. Les différentes zones actives sont connectées par un premier niveau métal. Ces connexions sont souvent en tungstène qui est moins affecté par les forts courants (10^6 A.cm^{-2}) mis en jeu à ce niveau des interconnexions (phénomène d'électromigration).

La figure 1-3 donne un aperçu des dimensions géométriques définissant la structure d'un transistor MOS ainsi que de quelques valeurs caractéristiques pour une filière technologique CMOS de $0.18\mu\text{m}$.



- ✓ Longueur de grille : $L_g = 180 \text{ nm}$
- ✓ Longueur du canal : $L = 130 \text{ nm}$
- ✓ Longueur des régions des diffusions : $L_{\text{diff}} = 550 \text{ nm}$
- ✓ Epaisseur de l'oxyde de grille : $T_{\text{ox}} = 4 \text{ nm}$
- ✓ Profondeur des jonctions source-drain : $X_j = 150 \text{ nm}$
- ✓ Largeur du transistor : $W = 350 \text{ nm}$
- ✓ Concentration des impuretés dans le substrat : $N_b = 5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

Figure 1-3 : Schéma de la structure d'un transistor NMOS dans une technologie CMOS avec quelques valeurs caractéristiques pour une filière CMOS $0.18\mu\text{m}$ [Skotnicki].

Chapitre 1 : Contexte technologique

1.2.2.2. Le « Back End »

Le « Back-End » correspond aux étapes qui vont permettre de réaliser les interconnexions métalliques entre les différents éléments actifs du circuit. La figure 1-4 présente la coupe d'un circuit intégré et permet de visualiser les différents niveaux d'interconnexions métalliques. On trouve aujourd'hui plus de 8 (voire 12) niveaux d'interconnexions métalliques. Outre les interconnexions entre les différents éléments, il est également nécessaire d'isoler les éléments actifs qui n'ont pas à être connectés au moyen de tranchées isolantes. Le couple métal/isolant est choisi de telle sorte que le temps de réponse des interconnexions, qui correspond à la vitesse de propagation du signal, soit minimale. Ce temps est égal au produit RC avec R la résistance du métal, proportionnelle à sa résistivité, et C la capacité de l'oxyde, proportionnelle à sa permittivité. Actuellement, on cherche donc des métaux à faible résistivité et des isolants à faible permittivité ainsi que des matériaux qui puissent facilement être intégrés pour l'élaboration des interconnexions. Depuis 2001-2002, l'aluminium ($2.7\mu\Omega.cm^{-1}$) qui était le métal le plus utilisé, a été remplacé par le cuivre de résistivité plus faible ($1.67\mu\Omega.cm^{-1}$). L'oxyde de silicium (de permittivité relative égale à 4) a, quant à lui, été remplacé par des matériaux de plus faible permittivité, dits « low-K », comme le SiOC (permittivité relative égale à 3). Le problème de l'introduction de ces nouveaux matériaux, et notamment du cuivre, est une remise en cause des procédés de gravure. En effet, l'approche classique avec l'aluminium était de graver des trous et des vias dans le métal et de remplir ces espaces avec l'oxyde isolant. Le cuivre étant très difficile à graver, cette technique ne peut plus être appliquée. Une nouvelle stratégie a donc dû être mise au point pour introduire le cuivre comme métal : le procédé damascène. Cette méthode consiste à graver d'abord des tranchées dans le diélectrique, puis à les remplir de cuivre. Ensuite, l'excédent de cuivre est « raboté » de la surface du diélectrique par polissage mécano-chimique (CMP), de manière à ne laisser du métal que dans les tranchées.

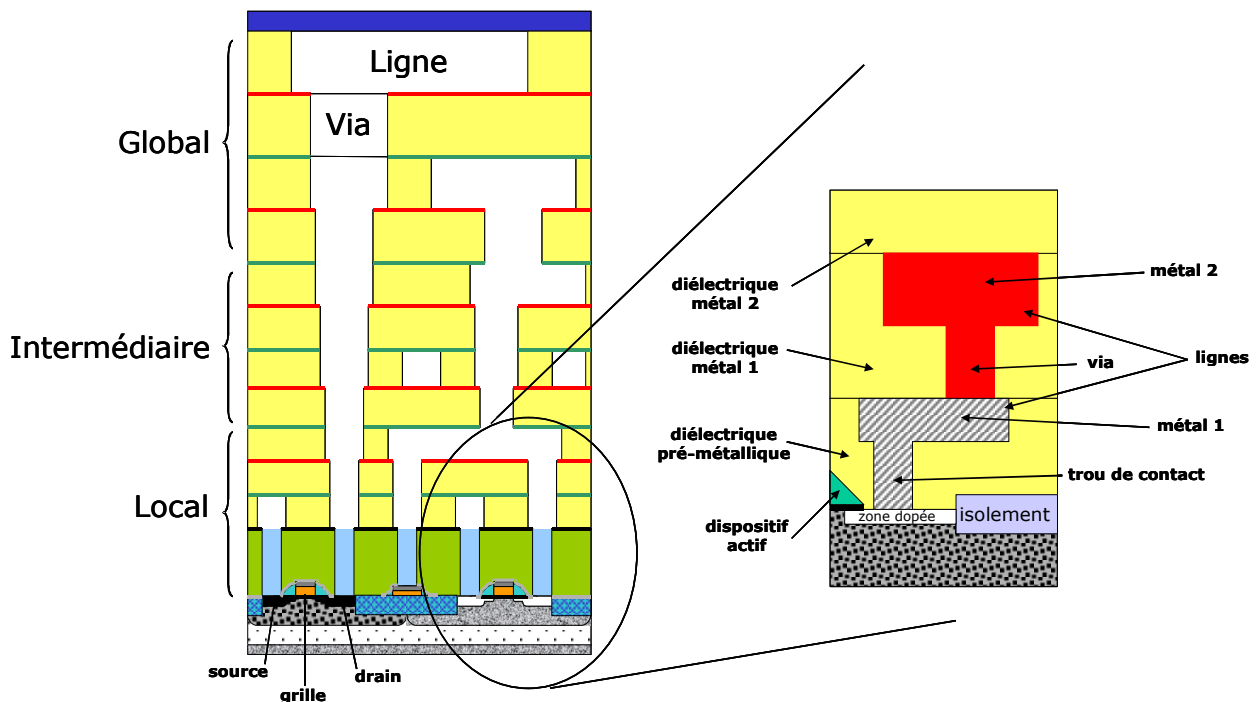


Figure 1-4 : Coupe schématique d'une architecture CMOS à 6 niveaux d'interconnexions.

1.3. La lithographie

Dans la croissance exceptionnelle de l'industrie de la microélectronique, la lithographie joue un rôle majeur. En effet, c'est la première étape dans la conception d'un circuit intégré : elle définit la taille et la période des motifs à fabriquer. C'est donc elle qui permet l'augmentation du nombre de composants par puces et la réduction en dimension nécessaire à l'amélioration des performances des dispositifs. En outre, elle intervient à quasiment chaque niveau de fabrication, aussi bien en « front end » qu'en « back end ». C'est son évolution permanente qui gouverne encore aujourd'hui la miniaturisation des composants.

A ce jour, les techniques lithographiques les plus utilisées sont les lithographies optiques fonctionnant aux longueurs d'onde de 248 nm et de 193 nm (Ultra Violet Profond, DUV en anglais). Moyennant quelques optimisations (systèmes optiques, masques, illumination, résine, ...), les outils de lithographie optique DUV vont permettre encore pendant quelques années de satisfaire la loi de Moore. Cependant l'augmentation de la résolution s'accompagne de contraintes technologiques de plus en plus complexes à satisfaire. Pour accomplir la réalisation des futurs nœuds technologiques, il est donc nécessaire de développer de nouveaux procédés de lithographie (outil d'exposition, résine, ...). S'il est désormais très probable que la réalisation du nœud technologique 45 nm se fera grâce à la lithographie 193 nm à immersion, les lithographies candidates pour la réalisation des futures générations de composants sont plus nombreuses, et restent pour l'instant concurrentielles. Parmi elles, on compte principalement :

- ✓ La lithographie Extrême Ultra Violet (EUV) à 13,5 nm.
- ✓ La lithographie électronique.
- ✓ La nanoimpression.

Le but de cette partie est de rappeler le rôle et les enjeux de la lithographie dans l'industrie de la microélectronique, ainsi que de présenter les techniques de lithographie actuelles et futur.

1.3.1. La lithographie optique par projection

Depuis les débuts de l'industrie de la microélectronique, la lithographie optique est la technique de lithographie utilisée pour la fabrication de masse des circuits intégrés.

1.3.1.1. Principe

Le principe de cette technique est d'imager les motifs inscrits sur un masque par une optique de projection sur une résine photosensible, préalablement étalée sur une plaquette de silicium. Un outil de lithographie optique par projection est composé d'une source d'illumination, d'un masque contenant le dessin du circuit intégré, et d'un système optique de projection. Lors de l'insolation, les parties de la résine qui ont reçu de la lumière sont modifiées chimiquement. Ensuite, la résine est recuite puis développée. Dans le cas de résine positive, c'est la partie insolée qui est retirée, au contraire des résines négatives pour lesquelles la partie non insolée est dissoute dans le développeur. Après développement, la résine est alors structurée selon les motifs du masque. Ces motifs de résine vont alors servir de masque pour la gravure des matériaux sous jacents, figure 1-5.

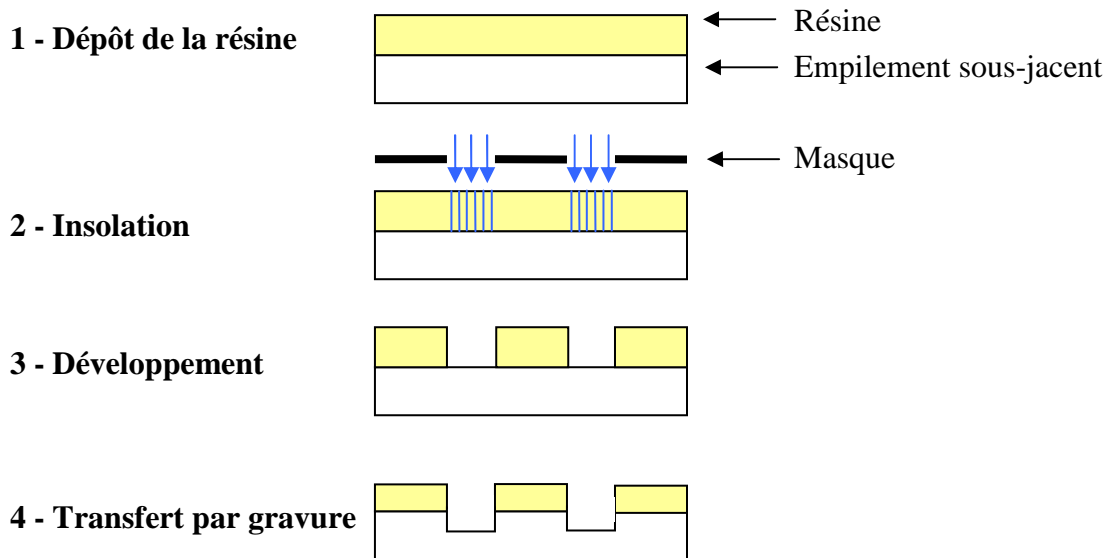


Figure 1-5 : Schéma de principe du procédé lithographique.

1.3.1.2. Le système optique

Auparavant, l'imagerie s'effectuait par contact ou par proximité, mais depuis les années 90 la lithographie par projection s'est imposée [Thompson 83]. Dans cette technique, le masque se trouve séparé du substrat de plusieurs centimètres, évitant ainsi la dégradation du masque liée au contact direct avec la résine. La figure 1-6 présente un schéma de fonctionnement d'un outil d'exposition. Une source émet des rayonnements à la longueur d'onde appropriée. Actuellement, les deux longueurs d'ondes d'exposition utilisées par l'industrie sont 248 nm, et 193 nm. La lumière passe alors dans un condenseur qui permet de mettre en forme le flux incident sur le masque. Les rayons lumineux traversent ensuite un masque contenant les informations à transférer dans le substrat. Comme les dimensions des motifs présents sur le masque sont faibles par rapport à la longueur d'onde d'insolation, les rayons lumineux sont diffractés selon plusieurs directions. C'est pourquoi il est nécessaire de placer à la sortie du masque, un système optique dit « de projection » constitué de plusieurs lentilles convexes ou concaves (environ 20) qui permet de collecter les ordres de diffraction, et de focaliser le flux lumineux sur le substrat couvert de résine photosensible.

Contrairement aux lithographies par contact et par proximité qui utilisaient des masques à l'échelle 1, la lithographie par projection a permis d'introduire le facteur de réduction des dimensions du masque qui est aujourd'hui de 4 ou 5. Ainsi, les contraintes de fabrication du masque ont été relâchées puisqu'il n'est plus nécessaire d'avoir les motifs du masque de la même dimension que les motifs à imprimer. Le masque est réalisé sur un substrat transparent aux longueurs d'onde d'exposition 248nm et 193nm et les motifs sont définis en chrome, matériaux opaques à ces longueurs d'onde. Le masque ne comporte que les motifs correspondants à une puce élémentaire. L'exposition de la totalité d'un substrat de diamètre 200 mm ou 300 mm se fait donc par répétition (ou répétition et balayage) du masque sur le substrat. C'est pourquoi ces appareils portent le nom de photo-répétiteurs.

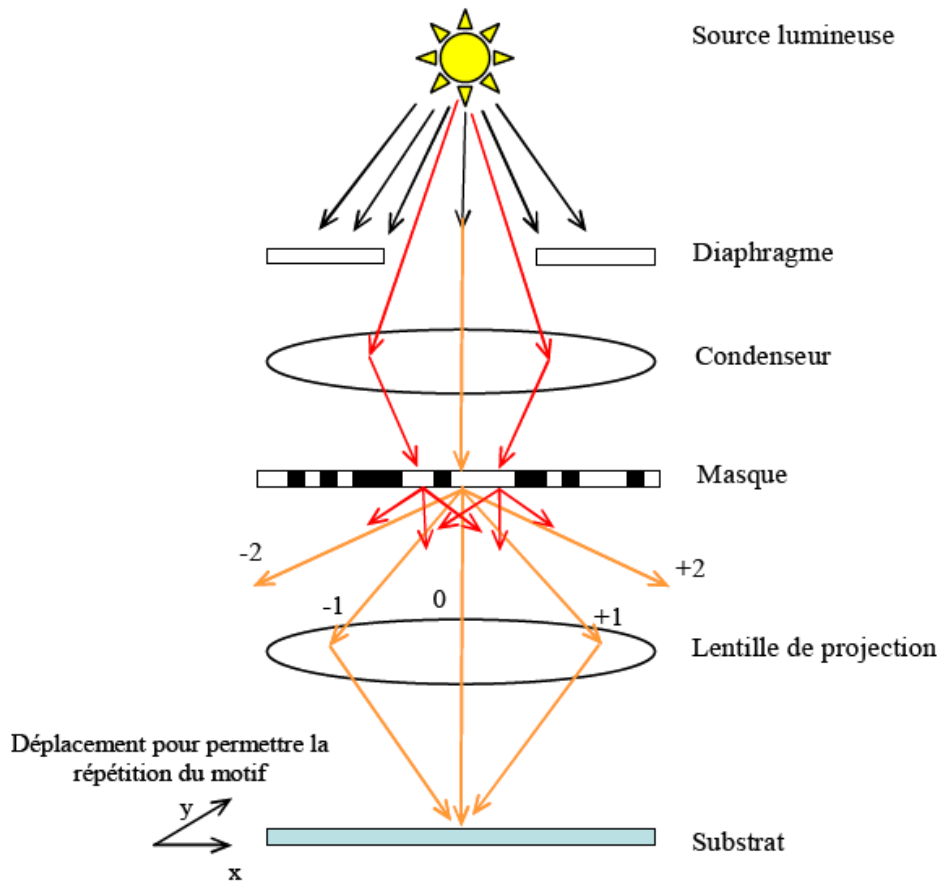


Figure 1-6 : Schéma de principe d'un outil de lithographie optique par projection.

1.3.1.3. La formation de l'image

Comme mentionné dans le paragraphe précédent, la lumière qui traverse le masque est diffractée selon plusieurs directions, figure 1-6. Les phénomènes de diffraction de la lumière monochromatique d'exposition peuvent être décrits par la diffraction de Fraunhofer. Si l'on considère le masque comme un réseau de période $2W$, sa figure de diffraction est la transformée de Fourier du réseau. L'intensité lumineuse présente donc une série de maxima et de minima à des angles parfaitement définis. Les maxima d'intensité se forment aux angles α_m tels que :

$$\sin \alpha_m = \pm m \frac{\lambda}{2W} \quad (1)$$

avec m l'ordre de diffraction correspondant et λ la longueur d'onde d'insolation.

On appelle **image aérienne** d'un outil d'exposition la répartition spatiale de l'intensité lumineuse correspondant à l'image du masque (motifs en 2D) projetée sur la résine photosensible. L'image aérienne formée est idéale (c'est à dire fidèle aux structures présentes sur le masque) si tous les ordres de diffraction participent à la formation de l'image. Cependant, du fait de la dimension finie des lentilles de projection, seule une parties des ordres diffractés est collectée. Il y a alors perte d'une partie de l'information et les motifs du masque ne sont pas reproduits à l'identique. En pratique, seuls deux ou trois ordres participent à la formation de l'image, et l'image aérienne d'un masque à motifs rectangulaires est une

Chapitre 1 : Contexte technologique

sinusoïde. La figure 1-7 présente l'image aérienne d'un réseau de lignes périodiques, capté par le système optique de projection. L'utilisation de résine dites « à seuil », telles que les résines à amplification chimique, est indispensable pour compenser ces limitations optiques et obtenir des motifs rectangulaires. Le fonctionnement d'une telle résine est expliqué dans la partie suivante (cf : section 1.3.2).

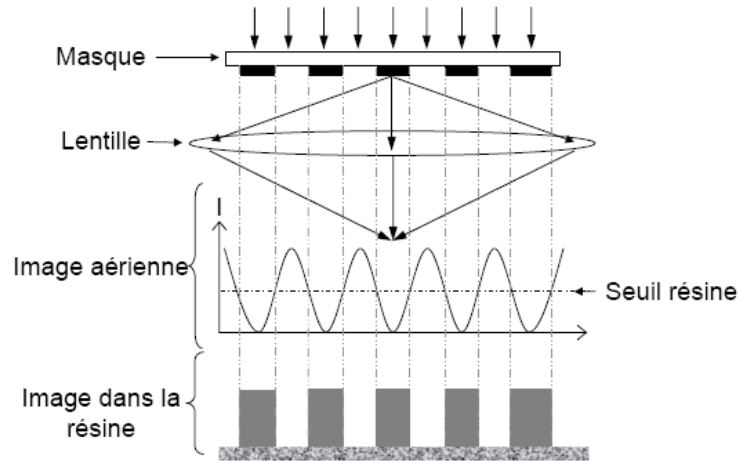


Figure 1-7 : Schéma de formation d'une image dans la résine.

1.3.1.4. L'ouverture numérique

La lentille de projection qui est toujours précédée d'un diaphragme, permet de collecter la lumière arrivant avec un angle inférieur ou égale à 2α par rapport à l'axe optique du système, figure 1-8. La capacité de la lentille de projection à collecter les rayons incidents diffractés est appelée Ouverture Numérique (NA pour « Numerical Aperture » en anglais) et est définie par la formule suivante :

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

Avec n indice optique du milieu, et α_{\max} le demi angle maximale d'ouverture del'objectif.

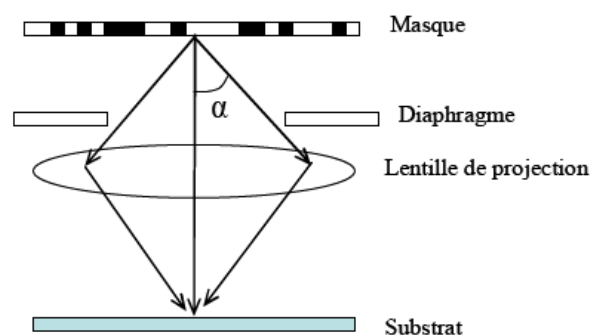


Figure 1-8: Schéma du système de projection.

D'après la relation 2, le nombre d'ordre de diffraction qui peut être collecté augmente avec une hausse de l'ouverture numérique, ce qui améliore la qualité de l'image aérienne et de la résolution, comme nous le verrons dans le prochain paragraphe.

Chapitre 1 : Contexte technologique

1.3.1.5. La résolution

Le terme résolution est très employé en lithographie mais prête souvent à confusion. En effet, il désigne la moitié de la plus petite période imprimable et la plus petite dimension d'un motif (un espace ou un trou) qu'un photo-répéteur est capable d'imprimer dans un film de résine. Il faut donc bien distinguer la dimension critique (ou CD, pour Critical Dimension en anglais) qui correspond à la dimension d'un motif imprimé et détermine les caractéristiques et performances du transistor, de la période des motifs qui détermine le nombre de transistor qu'une puce peut contenir. Bien que liés, ces deux paramètres ne sont pas contrôlés de la même façon par l'outil de lithographie.

En lithographie, il est commun d'exprimer la résolution R , par la demi-période résolvable. Elle est donnée par le critère de Rayleigh, qui décrit en optique la condition de résolution de deux sources lumineuses ponctuelles proches (système purement optique). Pour la lithographie, ce critère a été adapté afin de prendre en compte la contribution de la résine. La résolution R du procédé lithographique est alors donnée par l'équation suivante

$$R = k_1 \frac{\lambda}{NA} \quad (3)$$

Avec λ la longueur d'onde d'exposition, NA l'ouverture numérique du système, k_1 une constante classiquement comprise entre 0,5 et 1 qui traduit la dépendance de R vis à vis de la résine et du système optique.

Au travers de cette équation, il apparaît que la résolution peut être améliorée soit en diminuant la longueur d'onde d'exposition ou la constante k_1 , soit en utilisant des systèmes à forte ouverture numérique.

1.3.1.6. La profondeur de champ

La profondeur de champ (ou Depth of Focus, DOF en anglais) telle qu'elle est définie en lithographie est la distance autour du plan focal image pour laquelle la dimension du motif imprimé après développement de la résine (CD) est égale à la dimension visée à $\pm 10\%$, figure 1-9.

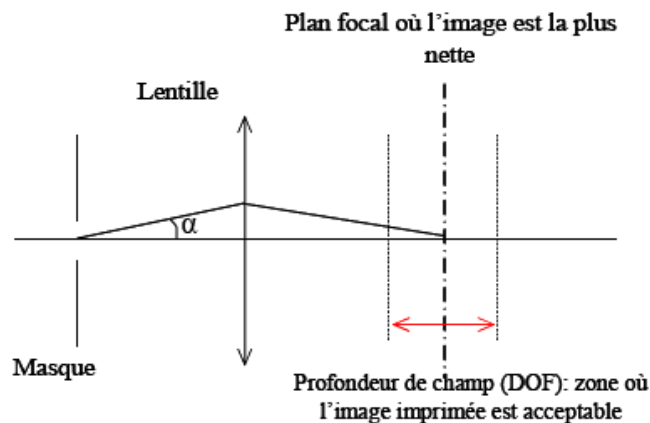


Figure 1-9 : Schéma de la profondeur de champ d'un outil lithographique.

Comme pour la résolution, la profondeur de champ est donnée par le critère de Rayleigh :

$$DOF = k_2 \frac{\lambda}{NA^2} \quad (4)$$

Chapitre 1 : Contexte technologique

Avec λ la longueur d'onde d'exposition, NA l'ouverture numérique du système, k_2 une constante qui dépend de l'outil lithographique et de la résine.

Ce critère est particulièrement important en lithographie car il caractérise la stabilité d'un procédé par rapport aux variations de certains paramètres tels que la position du foyer image ou « focus », l'épaisseur de résine, ou la planéité du substrat. Dans les outils d'exposition actuels, la profondeur de champ est de l'ordre de quelques microns.

1.3.2. Les résines à amplification chimique

L'objectif du procédé lithographique est de transférer l'image d'un masque dans un film de résine préalablement déposé sur le substrat. Les résines employées dans l'industrie de la microélectronique sont constituées de polymères ayant des propriétés filmogènes (formation d'un film) et photosensibles (sensibilité à une radiation par la présence de sites chromophores). Le type de résine le plus fréquemment utilisé aujourd'hui et qui répond le mieux aux critères de sensibilité, de résolution et de résistance est celui des résines à amplification chimique. L'insolation de ces résines sous un rayonnement monochromatique conduit à des modifications chimiques locales des macromolécules et modifie la solubilité de la résine dans le développeur. Selon la tonalité de la résine, ces modifications photo-induites peuvent rendre le matériau soluble ou insoluble. Ainsi, après l'étape de développement, l'image que l'on obtient peut être la réplique exacte de celle du masque ou son négatif, figure 1-10.

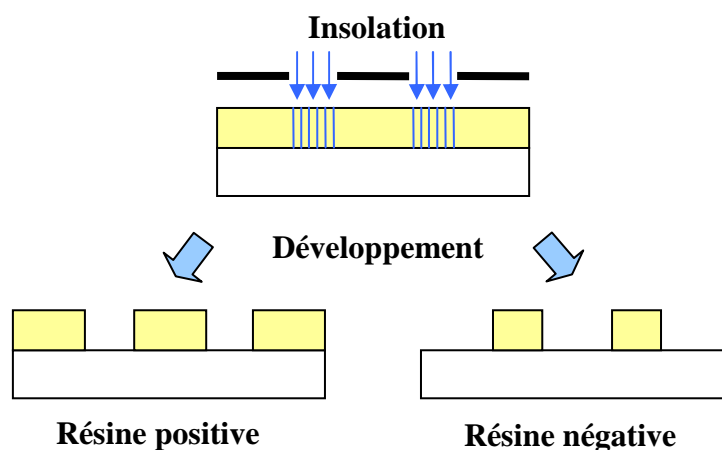


Figure 1-10 : Polarité d'une résine lithographique.

Le choix de la tonalité de la résine dépend de la géométrie des structures à transférer. Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes particulièrement intéressés à des résines à amplification chimique de tonalité positive. La prochaine partie présente d'une façon générale la composition et les propriétés de ces résines à amplification chimique.

1.3.2.1. Composition

D'une façon très générale, une résine photosensible à amplification chimique est constituée de plusieurs composés :

- ✓ **Un solvant** : Il donne à la solution les propriétés filmogènes nécessaires pour une répartition homogène de la résine sur le substrat. Après dépôt de la résine, il est éliminé

Chapitre 1 : Contexte technologique

par évaporation (recuit) et n'intervient plus dans le procédé lithographique. Le solvant représente plus de 85% du poids total de la solution initiale de résine.

- ✓ **Un polymère (ou matrice polymère) :** Il s'agit du squelette de la résine. Il représente plus de 90% de la masse solide contenue dans la solution de résine. Ce « squelette » polymère doit présenter les qualités de transparence, de résistance à la gravure et de stabilité thermique requises par les étapes post-lithographiques.
- ✓ **Un composé photosensible,** aussi appelé photogénérateur d'acide (ou PAG, de l'anglais PhotoAcid Generator). Ce composé possède un groupe chromophore sensible à la longueur d'onde d'exposition. Sa photo-transformation génère un acide qui réagit avec la matrice polymère, modifiant ainsi, dans la zone exposée, la solubilité de la matrice polymère au développeur. Le composé est présent en faible quantité, environ 2 à 3% de la masse solide de la solution.
- ✓ **Un groupement protecteur (spécifique aux résines positives) :** il s'agit d'un radical qui est greffé partiellement (de l'ordre de 30%) à la matrice polymère. Il a pour but de bloquer la solubilité de la matrice polymère aux développeurs basiques, et doit réagir avec l'acide photo-généré afin de rendre la matrice polymère soluble au développeur.
- ✓ **Un agent réticulant (spécifique aux résines négatives).** Ce composé a pour rôle de créer des ponts entre les chaînes du polymère afin de rendre la matrice polymère insoluble au développeur. Cette réaction est catalysée par l'acide photogénéré.
- ✓ **Divers additifs :** Les résines photosensibles commerciales possèdent de nombreux additifs présents en très faibles quantités, permettant d'améliorer les propriétés filmogènes de la résine, l'adhérence du film de résine sur le substrat, ou de modifier les propriétés optiques de la résine (colorants)...

1.3.2.2. Les principes réactionnels lors du procédé lithographique

Pendant le procédé lithographique, les résines subissent une succession d'étapes :

- ✓ **La préparation du substrat** qui consiste en un traitement thermique et chimique de la surface du substrat pour améliorer l'adhérence du film.
- ✓ **Le dépôt de la résine** qui consiste à étaler la résine par centrifugation sur le substrat. L'épaisseur du film formé dépend de la viscosité de la solution et de la vitesse de rotation du substrat selon l'équation: $e = a \times v^{-1/2}$ avec e : épaisseur du film de résine (en nm), v : vitesse de rotation du substrat (en rotation par minute, rpm) et a : coefficient qui dépend de la viscosité de la résine.
- ✓ **Le recuit après dépôt ou PAB** (pour Post Applied Bake, en anglais) qui a pour but de compacter le film de résine par l'évaporation du solvant résiduel.
- ✓ **L'exposition** qui consiste à générer l'image latente du masque dans la résine.
- ✓ **Le recuit après exposition ou PEB** (pour Post Exposure Bake, en anglais) qui est une étape capitale pour les résines à amplification chimique. Elle a pour but de déclencher la réaction de déprotection (résine positive) ou de catalyser la réaction de réticulation (résine négative) de la matrice polymère.
- ✓ **Le développement** qui consiste à révéler l'image du masque dans la résine. Cette étape est réalisée dans une solution aqueuse basique.

Sous l'action du flux d'exposition, le PAG génère un acide qui, sous montée en température durant le PEB, diffuse à travers le film de résine. Dans le cas des résines positives, l'acide photogénéré réagit avec la matrice polymère, en détachant le groupement protecteur, ce qui rend le polymère soluble dans le développeur basique. On parle alors de

Chapitre 1 : Contexte technologique

réaction de déprotection. En fin de réaction l'acide se régénère et peut poursuivre la déprotection de la matrice, d'où l'appellation d'amplification chimique. Dans le cas des résines négatives, l'acide photogénéré réagit avec l'agent réticulant pour donner un site très réactif. Ce dernier réagit alors très rapidement avec la matrice polymère en pontant les macromolécules de la matrice polymère et en régénérant un acide. La matrice polymère devient ainsi insoluble au développeur aqueux basique, et l'acide régénéré peut continuer à catalyser la réaction de réticulation.

Pour des informations plus détaillées sur les mécanismes réactionnels des résines à amplification chimique, le lecteur pourra se référer à la thèse de Laurent Pain [Pain 96].

1.3.2.3. Propriétés

Pour être intégrable dans un procédé lithographique complet, les résines à amplification chimique doivent répondre à certains nombres de critères.

✓ La résolution

Une propriété importante des résines est un fort pouvoir résolvant. Pour un outil d'exposition donné, la capacité d'une résine à imprimer des motifs de faibles dimensions dépend très fortement de sa formulation chimique, et des paramètres appliqués lors du procédé lithographique.

✓ La photosensibilité

La photosensibilité d'une résine est l'énergie par unité de surface (ou dose) qu'un photorépéteur doit fournir pour obtenir, après développement, un transfert de l'image du masque. Plus la résine est photosensible, plus la dose d'exposition à appliquer pour obtenir une image sera faible, ce qui équivaut à un temps d'exposition plus court et donc une productivité accrue.

✓ Le contraste

Pour récupérer la perte d'information due aux ordres de diffraction non collectés par les optiques de projection (figure 1-6), les résines à amplification chimique doivent avoir un **comportement à seuil**, c'est-à-dire que les réactions chimiques doivent s'amorcer à partir d'une énergie incidente précise. Le contraste de la résine traduit alors l'efficacité de ce comportement. Dans le but d'obtenir une meilleure réplique des motifs du masque dans le film, il faut que les résines photosensibles exposées aient le meilleur contraste possible (valeur de contraste élevée). Cette propriété est déterminée en mesurant l'épaisseur de résine restante après exposition et développement en fonction de la dose d'exposition [Levinson 01]. L'exemple d'une courbe de contraste d'une résine positive est reportée figure 1-11. Au-delà d'une dose d'exposition seuil E la photodégradation de la résine est induite, ce qui se traduit par une diminution rapide de son épaisseur.

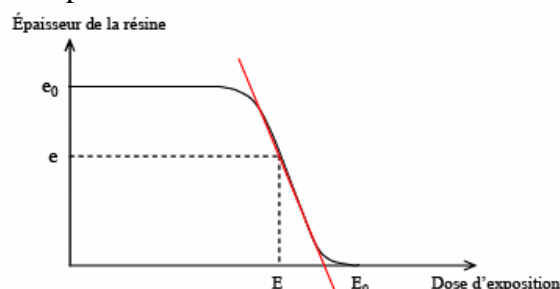


Figure 1-11 : Courbe de contraste d'une résine à amplification chimique [Levinson 01].

Chapitre 1 : Contexte technologique

Le contraste γ d'une résine (de tonalité positive ou négative) représente la pente de cette courbe selon l'équation suivante :

$$\frac{e(E)}{e_0} = \gamma \ln \left(\frac{E_0}{E} \right) \quad (3)$$

Où e est l'épaisseur de résine après exposition et développement, e_0 est l'épaisseur de résine initiale, E est la dose d'exposition appliquée et E_0 est la dose à laquelle toute l'épaisseur du film est développée. Pour les résines à amplification chimique utilisées en lithographie optique à 193nm, les valeurs de contraste sont classiquement proches de 5 [Choudhury 97]. La valeur du contraste dépend également des conditions thermiques appliquées au cours du procédé lithographique.

✓ La résistance à la gravure

Les formulations des résines photosensibles doivent être adaptées aux procédés de gravure mis en œuvre pour transférer fidèlement les motifs imprimés dans la couche sous-jacente. Au cours de ces étapes post-lithographiques, les motifs de résines sont exposés soit à des procédés de gravure par plasma (gravure sèche), soit à des bains de solutions chimiques (gravure humide). La résine (et donc principalement la matrice polymère) doit être assez résistante vis-à-vis de ces traitements, de sorte que le motif de résine soit très peu consommé. Dans le cas contraire, les motifs transférés sont dégradés (sommets arrondis, perte de verticalité), ce qui altère les performances des dispositifs. Des procédés plasma sont actuellement utilisés pour renforcer la résistance à la gravure des résines utilisées pour la lithographie 193nm. Un de ces procédés est étudié dans le chapitre 3.

✓ La rugosité de bord de ligne

Les variations de la longueur moyenne du motif, appelé rugosité de bord de ligne, figure 1-12, doivent présenter les plus faibles valeurs possibles. En effet, comme nous le verrons par la suite, la rugosité de bord de la résine peut être partiellement transférée dans les couches sous-jacentes et impacter les performances électriques du dispositif final (cf : section 1.3.3). En lithographie, les valeurs de la rugosité de bord dépendent de la résine et de son mécanisme réactionnel, ainsi que du système lithographique. Cette problématique fait l'objet de ce travail de thèse, nous reviendrons donc plus en détail sur ce sujet dans les chapitres suivants.

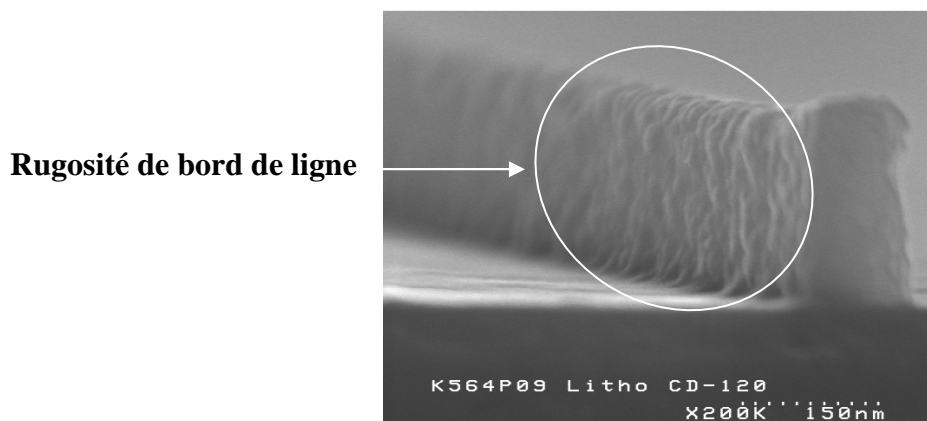


Figure 1-12 : Image MEB montrant la rugosité de bord de ligne de la structure de résine.

1.3.3. Les techniques de lithographie de « nouvelle générations »

Les techniques de lithographie de nouvelles générations sont des méthodes alternatives, pressenties pour la fabrication des générations de composants de 45 nm et au delà. Parmi les plus prometteuses, on trouve la lithographie 193nm à immersion, la lithographie par faisceau d'électrons, la lithographie extrême ultraviolet et la nanoimpression. Dans cette partie, nous décrirons le principe et définirons les avantages et les inconvénients de chacune de ces techniques.

1.3.3.1. La lithographie 193nm à immersion

La lithographie par immersion apparaît comme une des solutions les plus prometteuses pour prendre le relais de la lithographie optique à 193nm. Cette technique consiste à introduire un film d'eau entre la dernière lentille de projection et le substrat. Comme l'indice de réfraction de l'eau ($n_{\text{eau}} = 1,44$) est supérieur à celui de l'air ($n_{\text{air}} = 1$), l'ouverture numérique du système, équation 2, est alors augmentée. D'après l'équation de Rayleigh, cette augmentation permet, pour une même longueur d'onde d'exposition, une amélioration de la résolution. Par conséquent, l'immersion présente l'avantage d'accéder à de meilleures résolutions tout en conservant la même source d'exposition que pour la lithographie optique à 193nm.

Aujourd'hui cette technique représente le choix de très nombreux groupes industriels pour atteindre les nœuds technologiques 65 et 45 nm. Cependant, elle comporte encore de nombreux défauts et des doutes subsistent à l'heure actuelle quant à sa capacité à résoudre des dimensions proches de 32 nm. Pour des informations plus détaillées sur cette technique, le lecteur pourra se référer à la thèse d'Anne-Laure Charley [Charley 06].

1.3.3.2. La lithographie par faisceau d'électrons

Cette technique consiste à balayer la surface d'une résine avec un faisceau d'électrons dont l'énergie peut varier entre 1 et 200 keV. Ces équipements sont constitués d'une colonne semblable à celle des microscopes électroniques à balayage, d'un mécanisme de déflexion électromagnétique du faisceau et d'une platine porte-échantillon dont la position est contrôlée par interférométrie laser [McCord 97], figure 1-13. Les motifs sont ainsi dessinés directement dans le film de résine avec une résolution qui dépend du diamètre du faisceau incident (moins de 10nm pour les équipements fonctionnant entre 50 et 100 keV), des interactions entre les électrons et la matière (la diffusion des électrons dans la résine et la rétrodiffusion par le substrat), mais aussi des conditions du procédé de développement. La vitesse d'écriture de ce type d'outil est extrêmement faible (2,4h pour l'écriture d'une plaque de 200mm [Pain 02], ce qui empêche son utilisation en production. Néanmoins, la résolution est excellente et il est possible de réaliser des motifs dont la taille est inférieure à la dizaine de nanomètres [Chen 97]. Pour cette raison, cet outil est couramment utilisé dans les laboratoires de recherche pour la réalisation de structures à l'échelle nanométrique.

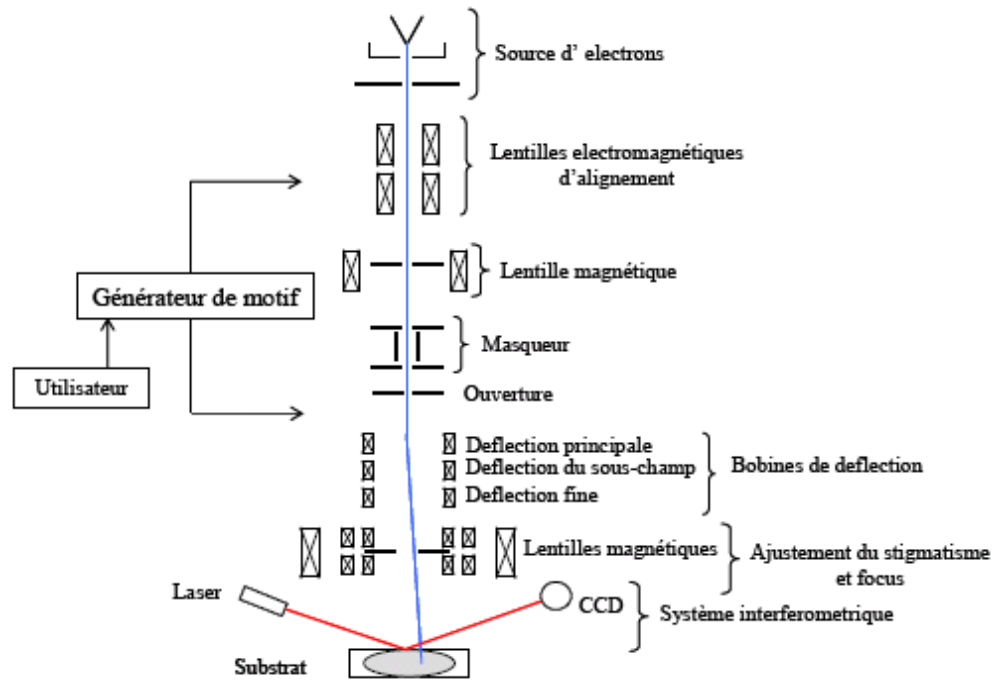


Figure 1-13 : Schéma du fonctionnement d'une colonne d'un outil de lithographie électronique.

Il existe différents types d'outil de lithographie par faisceau d'électrons. Cette partie présente ces différentes techniques.

✓ Faisceau gaussien

Avec cette technique, la dimension du faisceau est faible, et le motif est obtenu par déflexion progressive du faisceau afin qu'il expose toute la surface du motif voulu « point par point », figure 1-14a). La densité électronique a une forme de gaussienne, d'où le nom de la méthode, figure 1-14b).

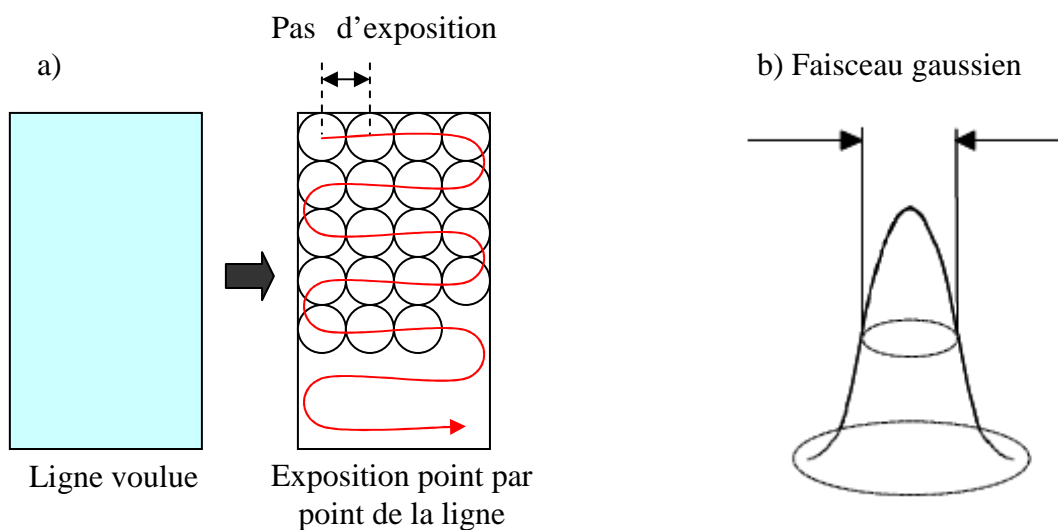


Figure 1-14 : a) création d'une ligne avec un faisceau gaussien, b) représentation d'un faisceau gaussien.

Chapitre 1 : Contexte technologique

L'avantage de cette technique est la résolution, ainsi que la grande variété des motifs pouvant être imprimés. Cependant ce mode d'exposition est très lent et ne permet pas d'envisager son utilisation en production.

✓ Faisceau formé

Dans le cas de la lithographie à faisceau formé, le faisceau est défléchi au travers d'une série de masqueur qui permet de créer des formes basiques comme des rectangles ou des triangles. Le faisceau formé passe ensuite par une lentille qui permet de réduire ses dimensions. Cette technique permet ainsi d'obtenir des motifs composés de ces formes basiques, figure 1-15.

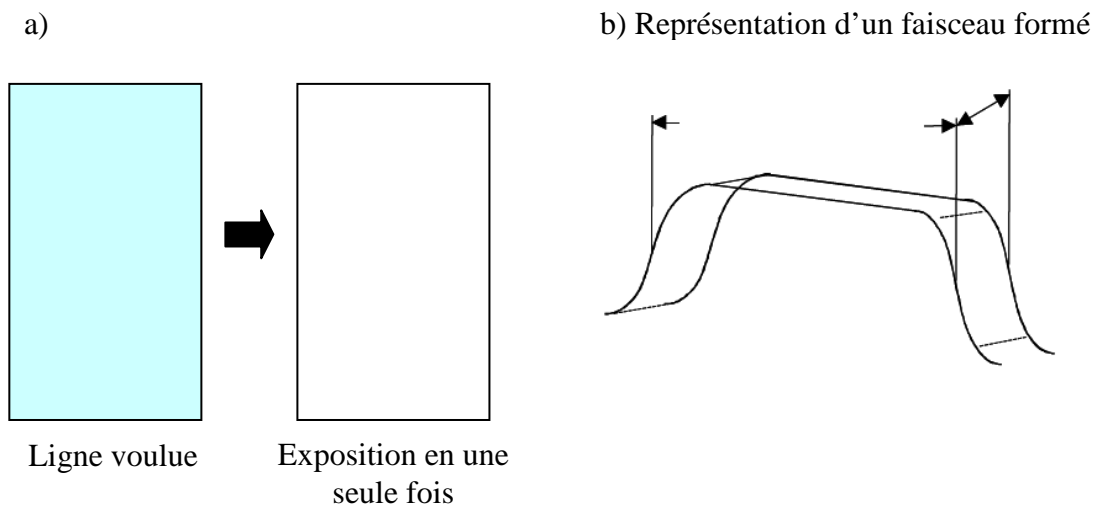


Figure 1-15 : a) Création d'une ligne avec un faisceau formé, b) Représentation d'un faisceau formé.

Ce mode d'exposition est plus rapide que l'exposition « point par point » d'un outil à faisceau gaussien. C'est pourquoi cette technique est actuellement utilisée dans l'industrie pour fabriquer des petites séries de circuits qui demande une bonne résolution. Cependant, la résolution est plus limitée (aujourd'hui à environ 50 nm) et les outils sont plus complexes que les outils à faisceau gaussien (ajout de lentille de déflexion, de masqueurs).

✓ Multi faisceau.

Cette technique récente consiste à placer dans un même outil plusieurs colonnes électroniques similaires permettant d'écrire simultanément plusieurs puces du substrat en parallèle. Du fait de son rendement important, la production de masse semble possible avec cette technique, mais son coût est encore très élevé.

1.3.3.3. La lithographie extrême ultraviolet (EUV)

La lithographie EUV est une technique de lithographie optique de projection qui permet d'obtenir une meilleure résolution par la réduction de la longueur d'onde d'exposition à 13,5 nm. A cette longueur d'onde, tous les matériaux utilisés habituellement sont très absorbants ; le système optique fonctionne donc uniquement en réflexion. Le schéma de l'outil est représenté sur la figure 1-16. Il est composé de miroirs de Bragg, un multicouche

Chapitre 1 : Contexte technologique

molybdène/silicium conçue pour maximiser la réflectivité à la longueur d'onde d'utilisation. Les masques sont réalisés avec ce même empilement recouvert en surface d'un matériau absorbant qui définit le motif à imprimer [Gwyn 98]. Cette technique de lithographie optique est vue comme un bon candidat pour poursuivre la diminution des CD à partir du nœud 32 nm et au-delà puisqu'elle peut atteindre des dimensions bien inférieures à 50 nm.

Cependant il reste un certain nombre de points techniques à optimiser pour rendre possible son entrée en production. En effet, la puissance et la stabilité des sources restent encore insuffisante, les résines doivent être développées pour contrôler la rugosité de bord et améliorer la sensibilité. Finalement, beaucoup d'efforts restent à fournir pour fabriquer des masques avec un faible taux de défauts et pour contrôler la contamination et la détérioration des optiques.

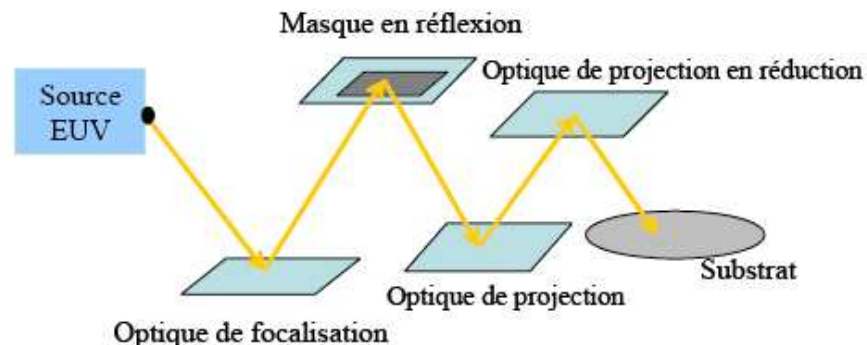


Figure 1-16 : Schéma de principe de la lithographie optique extrême ultraviolette [Sarroukhi 05].

1.3.3.4. La nanoimpression

La nanoimpression est une technique de lithographie non conventionnelle. Elle consiste à structurer un polymère par réplication d'un moule sur lequel sont définis les motifs à imprimer. Il existe deux méthodes : la nanoimpression thermique et la nanoimpression assistée par UV.

✓ Thermique

Cette technique, initiée en 1995 par S.Chou [Chou95], consiste à l'emboutissage d'un moule rigide (en silicium ou en quartz), ou souple (polydiméthylsiloxane PDMS...) à moyenne pression (de 5 à 15 bar) dans un polymère préalablement chauffé au dessus de sa température de transition vitreuse, T_g . Au delà de T_g , le matériau à structurer passe à l'état caoutchoutique et peut ainsi remplir les cavités du moule. Après emboutissage, le polymère est refroidi pour retrouver sa rigidité, et suit une étape de démoulage laissant libre les motifs imprimés. Le principe de fonctionnement est présenté sur la figure 1-17.

Cette technique a déjà démontré ses capacités d'impression de structure sub-25 nm [Chou 95], et de trous de contacts de 10 nm [Chou 97]. Bien que prometteuse pour l'industrie de la microélectronique, elle nécessite de nombreux développements pour pouvoir être utilisée en production, en particulier concernant l'uniformité de pressage sur grande surface, les problèmes d'adhésion entre moule et polymère, le contrôle du temps de cycle (montée en température, impression, refroidissement) et l'usure des moules. En outre, il est important de signaler que cette technique fonctionne à l'échelle 1, c'est à dire que la résolution des motifs imprimés est égale à la résolution du masque. Or les masques sont fabriqués grâce aux techniques de lithographies conventionnelles.

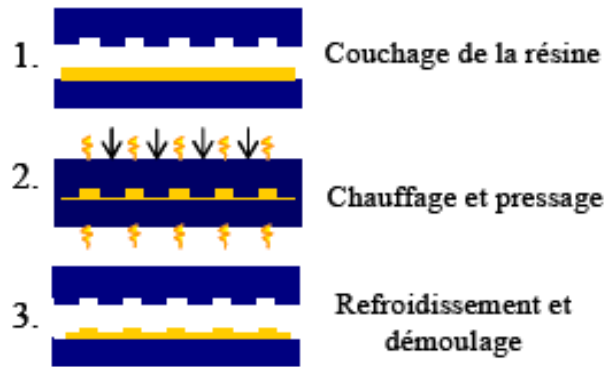


Figure 1-17 : Schéma de principe du fonctionnement de la nanoimpression thermique.

✓ Assistée par ultraviolet

Cette technique est proche de la nanoimpression thermique. Cette variante est utilisée avec des polymères très peu visqueux qui vont remplir le moule sans application de pression, ni de montée en température. C'est la capillarité qui permet le remplissage. Le moule transparent aux ultraviolets permet, par le biais de l'insolation, la réticulation du polymère en fin de pressage [Colburn 99]. Le principe de fonctionnement est schématisé sur la figure 1-18.

Cette technologie a été fortement développée ces dernières années et permet à l'heure actuelle de s'approcher des exigences de la microélectronique [Resnick 03]. En effet, comme cette technique ne nécessite pas de montée en température ou en pression, l'impression est rapide. De plus, elle permet d'aligner le pressage sur des motifs déjà présents sur la plaque, grâce à son moule transparent. Cependant, de nombreux points restent encore valider avant son entrée en production, en particulier en ce qui concerne la défektivité et les possibilités d'alignement.

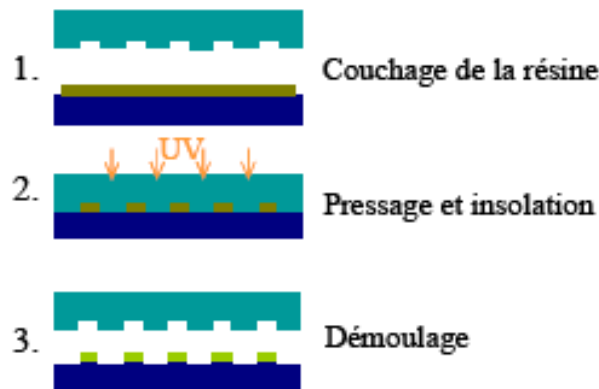


Figure 1-18 : Schéma de principe du fonctionnement de la nanoimpression assistée par ultraviolet.

Dans la poursuite des objectifs de miniaturisation fixés par la feuille de route ITRS la lithographie doit être capable de réaliser, en 2013, des structures de 21nm avec une variation de la longueur moyenne de 1,7nm [ITRS]. Ces exigences vont au delà des capacités actuelles de la lithographie. Il est donc clair que l'industrie microélectronique a besoin de développer en parallèle des outils d'exposition, et des résines photosensibles capables d'imprimer de telles résolutions. Les résines envisagées pour ces futures générations de composants doivent satisfaire des critères encore plus pointus, en terme de rugosité de bord, de résistance à la

Chapitre 1 : Contexte technologique

gravure, de facteur de forme. A ces dimensions, tous les paramètres deviennent critiques, en particulier, celui de la rugosité de bord de ligne de la résine qui n'est plus négligeable devant la dimension de la structure. Il convient donc de comprendre clairement les origines de la rugosité de bord de ligne afin de pouvoir la contrôler et ainsi obtenir des structures qui répondent aux exigences requises. Nous nous sommes particulièrement intéressés à ce sujet dans le chapitre 3.

1.4. La gravure plasma

On appelle plasma un milieu gazeux ionisé globalement neutre qui contient des ions (négatifs et positifs), des électrons, et des neutres (atomes, molécules, ou radicaux) qui sont soumis à des interactions collectives. Ce terme plasma a été proposé par Langmuir en 1923. Le plasma est connu comme étant le quatrième état de la matière et compose 99% de la matière de l'univers sous une forme plus ou moins dense. On distingue plusieurs catégories de plasma suivant leur taux de dissociation et surtout leur température : les plasmas dits « chauds » (plasma thermonucléaire dont la température est de l'ordre de 5.10^7 K) et les plasmas dits « froids » (dont la température est inférieure à 50 000 K). Pour classer les plasmas froids, on utilise la notion d'Equilibre Thermodynamique Local (ETL). L'ETL est obtenu dans le cas où les températures respectives des ions, des électrons et des neutres sont voisines. Parmi les plasmas froids, on peut donc distinguer deux catégories :

- ✓ les plasmas thermiques en équilibre thermodynamique local tel que les arcs électriques ou les torches plasma.
- ✓ les plasmas hors ETL dans lesquels la température électronique (quelques 10^5 K) est nettement supérieure à la température des ions et des neutres (~ 300 K). Les plasmas utilisés pour la gravure en microélectronique font partie de cette catégorie.

L'utilisation des plasmas a fortement contribué à l'évolution de la technologie CMOS. En effet, ils permettent le dopage par implantation ionique, le dépôt de matériaux à basse température et surtout la gravure anisotrope des matériaux.

1.4.1. Les enjeux de la gravure par plasma

Depuis son introduction dans les années 70, la gravure par plasma occupe une place prépondérante dans les étapes de fabrication des circuits intégrés à base de silicium, aussi bien en « front-end » qu'en « back-end ». En effet, elle permet de définir des motifs à l'échelle nanométrique dans tous les types de matériaux (semi-conducteurs, isolants ou conducteurs). Elle consiste à transférer des motifs initialement définis par la lithographie dans les couches actives des dispositifs, comme le montre le schéma de la figure 1-19.

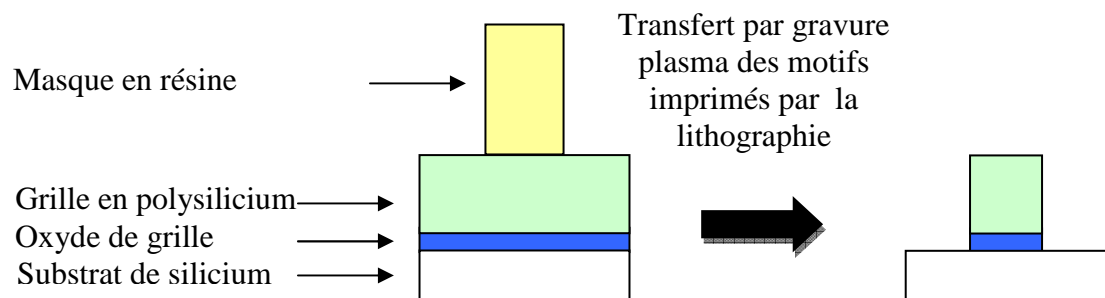


Figure 1-19 : Schéma de principe du transfert par gravure plasma des motifs imprimés par la lithographie.

Chapitre 1 : Contexte technologique

La miniaturisation des composants et l'émergence de nouveaux matériaux et de nouvelles structures engendrent de nombreux problèmes pour les technologies de gravure par plasma, à savoir, la réduction en dimension des structures à graver et l'émergence de tout un ensemble de nouveaux matériaux et de nouvelles structures nécessitant la mise au point de procédés de plus en plus pointus. Il apparaît donc que, quelle que soit l'application visée, les étapes de gravure par plasma doivent répondre à des critères très sévères de contrôle des profils gravés dans des dimensions inférieures à 50 nm, avec des facteurs d'aspect de plus en plus importants, des couches d'arrêt de plus en plus fines, et ce, dans les nouveaux matériaux de la microélectronique. Les critères requis pour les procédés de gravure par plasma sont décrits dans les sous parties suivantes :

1.4.1.1. La sélectivité

L'étape de gravure consiste à éliminer une couche mince sélectivement par rapport à une ou plusieurs autres. Dans l'exemple de la gravure d'une grille en polysilicium avec un masque résine et arrêt sur oxyde de grille, la sélectivité S s'exprime sous la forme du rapport des vitesses de gravure de deux matériaux différents :

$$S = \frac{V(\text{silicium})}{V(\text{masque})} \quad \text{et} \quad S = \frac{V(\text{silicium})}{V(\text{oxyde de grille})}$$

Une bonne sélectivité est telle que $S \gg 1$.

1.4.1.2. L'anisotropie

Elle est mesurée par $1 - \frac{V_H}{V_V}$ où V_H est la vitesse de gravure horizontale et V_V la vitesse de gravure verticale. Une anisotropie de gravure parfaite correspond à une vitesse de gravure horizontale nulle et à un profil de grille finale vertical. La vitesse de gravure latérale est la résultante de deux composantes : une gravure latérale des flancs des motifs par les neutres du plasma (les ions bombardant très peu les flancs des motifs) et la formation d'une couche de passivation protectrice sur les flancs (cf : section 1.2.3.5). La nature et l'épaisseur de cette couche dépendent de la chimie de gravure, de la nature du masque (résine, masque dur SiO_2 , masque en carbone), du matériau à graver. Dans le cas de la gravure de la grille en polysilicium, avec une chimie du type $\text{HBr}/\text{Cl}_2/\text{O}_2$, il a été montré qu'une couche très fine (2 nm) du type SiO_xCl_y se dépose sur les flancs du silicium et permet d'assurer l'anisotropie de gravure en protégeant les flancs du silicium des espèces neutres du plasma [Bell 97].

1.4.1.3. Le contrôle de la dimension critique

La dimension nominale (dimension initialement envisagée) est fixée par l'étape de lithographie. L'objectif de la gravure est tout d'abord de réduire la dimension nominale puis de transférer aussi fidèlement que possible cette dimension avec une tolérance maximale de 8%. L'écart par rapport à la dimension nominale est appelée dimension critique (CD). Cette norme industrielle qui impose un contrôle de la dimension à 8% près devient un vrai défi dans la réalisation des transistors à grille ultime. En effet, si l'on considère une dimension nominale de 20 nm, il faut transférer cette dimension à +/- 1.8 nm près. Or, les procédés de gravure grille élaborés jusqu'à maintenant (et adaptés à des tailles nominales de 50 nm

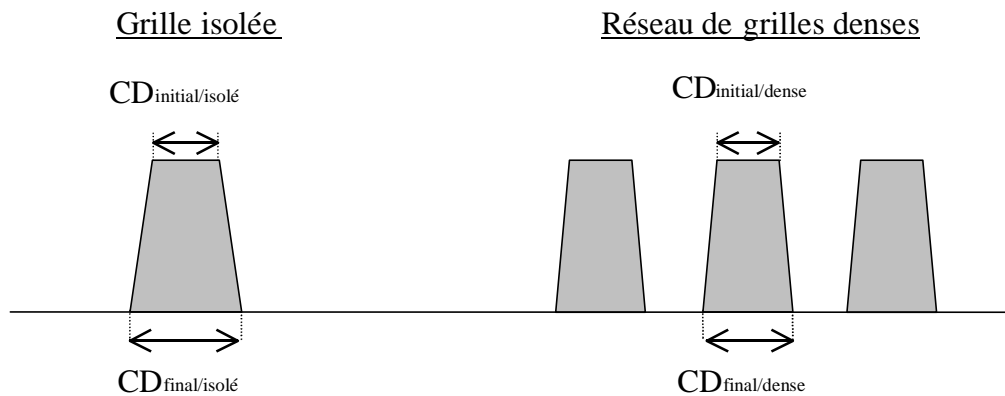
Chapitre 1 : Contexte technologique

environ) engendrent au minimum 5 nm de déviation de dimension. On voit bien à travers cet exemple qu'il va falloir repenser les procédés de gravure grille utilisés pour les générations actuelles de transistor afin de les adapter à la gravure des plus petites grilles.

Pour qualifier la qualité de contrôle de la dimension des structures, on définit le terme de CD_{bias} , qui correspond à la différence entre la dimension initiale CD_I (définie par la lithographie) et la dimension finale CD_F (prise au pied de la structure gravée) :

$$CD_{bias} = CD_F - CD_I.$$

Le CD_{bias} peut être très différent si l'on grave un motif isolé ou des motifs denses en réseaux. En effet, la vitesse de gravure peut dépendre de la proportion locale de matériaux à graver. Ainsi, les structures denses seront gravées moins rapidement que des structures isolées, même si elles présentent la même dimension [Hedlund 94]. Cet effet est appelé « microloading ». Pour chiffrer cette différence, on définit le terme de $CD_{microloading}$ qui correspond à la différence entre le CD_{bias} des motifs isolés et le CD_{bias} des motifs en réseaux. Le $CD_{microloading}$ est un paramètre important à minimiser lors du contrôle du procédé de gravure grille pour obtenir le même contrôle dimensionnel entre les zones denses et isolées. Ces deux définitions sont schématisées dans le cas de la gravure d'une grille en silicium sur la figure 1-20.



$$CD_{bias} = CD_{final} - CD_{initial}$$

$$CD_{microloading} = CD_{bias} (isolée) - CD_{bias} (dense)$$

Figure 1-20 : Définition du CD_{bias} et du $CD_{microloading}$.

1.4.1.4. L'uniformité macroscopique

La gravure doit être la même en tout point du substrat, actuellement de 300 mm de diamètre. On parle aussi de « **loading effect** » ou « **macroloading** », paramètre qui caractérise la dépendance de la vitesse de gravure moyenne avec le taux de couverture du matériau à graver sur l'ensemble de la tranche. Un schéma explicatif du phénomène est présenté sur la figure 1-21. Les vitesses de gravure tendent à diminuer avec l'augmentation de la surface à graver. Un moyen de minimiser les effets de macroloading est de travailler avec des flux de gaz élevés dans le réacteur.

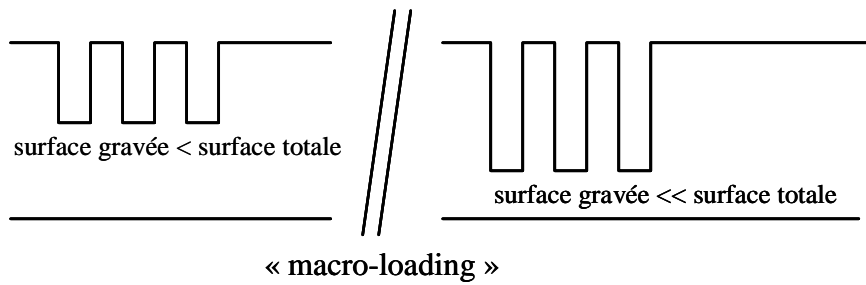


Figure 1-21 : Représentation schématique du phénomène de macroloading.

1.4.1.5. L'uniformité microscopique

Des problèmes d'uniformité de gravure peuvent apparaître selon la taille et la densité des motifs [Gottsho 92]. Comme nous l'avons mentionné précédemment, la vitesse de gravure peut dépendre de la proportion locale de matériaux à graver, il s'agit du microloading. La vitesse de gravure peut également dépendre du facteur d'aspect (AR) de la structure à graver [Sahqfeh 89], il s'agit du phénomène d'ARDE, pour Aspect Ratio Dependent Etching en anglais. Ce terme a été introduit pour traduire la plus faible vitesse de gravure des structures ayant un rapport profondeur/largeur plus important. Cet effet est caractéristique d'une gravure limitée par le flux des espèces neutres réactives dans les structures ; la vitesse de gravure est alors fortement corrélée à l'angle solide de collection de ces neutres et donc hautement dépendante du facteur d'aspect des structures. Le schéma de la figure 1-22 illustre cet effet.

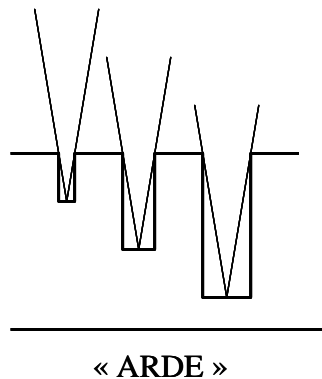


Figure 1-22 : Représentation schématique du phénomène d'ARDE.

1.4.1.6. Les résidus de gravure

Les procédés de gravure conduisent parfois à la formation de résidus de gravure non volatils (produits de réaction de la gravure). Ces produits non volatils peuvent venir se déposer sur les flancs de motifs du matériau gravé pour former une couche de passivation (cf. section 1.2.3.2) ou sur les parois du réacteur [McNevin 97]. Or, une modification de l'état de surface des parois du réacteur peut avoir des conséquences sur la reproductibilité et donc sur le contrôle des procédés [O'Neill 95, Font 98]. Ce problème majeur pour les industriels est connu de longue date et fait actuellement l'objet de nombreux travaux de recherches. Pour cela, une caractérisation de la nature chimique des couches se déposant sur les parois réacteur est réalisée [Joubert 04]. La connaissance du dépôt formé sur les parois du réacteur permet alors de développer des procédés de nettoyage des parois afin de garantir la reproductibilité des procédés de gravure.

1.4.2. Les mécanismes de gravure

La gravure par plasma est basée sur une synergie ions/neutres mise en évidence par J. Coburn et H.F. Winters en 1979 [Coburn 79]. En effet, elle met en jeu deux types de gravure aux effets complémentaires :

- ✓ **la gravure chimique** qui correspond à l'action des espèces neutres [Winters 83].
- ✓ **la gravure physique** qui est régie par le bombardement énergétique et directionnel des ions [Sigmund 69, Harper 89].

1.4.2.1. La gravure chimique

Elle ne dépend que de l'interaction entre le matériau à graver et les espèces réactives générées dans le plasma. Cette réaction de gravure spontanée n'est possible que si la réaction est thermodynamiquement réalisable, i.e. si le bilan énergétique de la réaction de gravure est exothermique. Le mécanisme d'une gravure chimique peut se décomposer en quatre étapes élémentaires décrites ci-après et appuyées sur l'exemple de la gravure du silicium par un plasma à base de CF_4 [Flamm 81, Flamm 90] (les lettres g ou s indiquent l'état, gaz ou solide, des produits concernés) :

- ✓ **Création d'espèces chimiquement réactives dans le plasma**
ex : $\text{CF}_4(\text{g}) + \text{e}^- \longrightarrow \text{C}(\text{g}) + 4\text{F}(\text{g}) + \text{e}^-$
- ✓ **Adsorption des espèces réactives à la surface**
ex : $\text{Si}(\text{s}) + \text{F}(\text{g}) \longrightarrow \text{SiF}(\text{s})$
- ✓ **Formation des produits de réaction volatils**
ex : $4 \text{F}(\text{g}) + \text{Si}(\text{s}) \longrightarrow \text{SiF}_4(\text{g})$
- ✓ **Désorption et pompage hors de l'enceinte des produits de réaction** (d'où réalisation de la gravure).

Il est important que le produit de gravure (SiF_4 dans l'exemple) soit **volatil** et **stable** afin qu'il puisse rapidement quitter la surface, puis être évacué du milieu par le système de pompage. Le gaz, ou le mélange de gaz, est donc choisi pour chaque matériau en fonction de la volatilité et de la stabilité du produit de gravure. Par exemple, les chimies à base d'halogènes sont souvent utilisées dans la gravure du silicium car elles permettent la formation de produits de réaction volatils de type SiX_4 (où $\text{X} = \text{F}, \text{Cl}, \text{ou Br}$). De même, la réaction de l'oxygène atomique sur la résine aboutit à la formation de CO , CO_2 et H_2O . Ces réactions sont spontanées, et sélectives puisqu'elles ne dépendent que de l'interaction entre le matériau et le réactif.

L'avantage de la gravure chimique est donc sa **sélectivité**. De plus, elle ne provoque pas de dommage en volume du matériau en cours de gravure. En revanche, elle présente l'inconvénient d'être une gravure lente (quelques nm/s) et totalement **isotrope**. Elle est donc inadaptée à la réalisation de motifs sub-micrométriques pour laquelle une attaque latérale sous le masque est inacceptable.

1.4.2.2. La gravure physique

Elle correspond au bombardement du substrat par les ions du plasma dont l'énergie est ajustable entre le potentiel plasma (15 eV) et quelques centaines d'eV. Lorsque ces ions

Chapitre 1 : Contexte technologique

entrent en collision avec les atomes de la surface, ces derniers peuvent gagner assez d'énergie sous l'impact ionique pour quitter ainsi la surface de l'échantillon. Cette gravure est aussi appelée **pulvérisation physique par bombardement ionique**. Sigmund est un des premiers à avoir proposé un modèle pour la pulvérisation [Sigmund 69].

Les ions extraits du plasma et accélérés vers la surface arrivent sur celle-ci avec une certaine énergie. Lors de l'interaction ion-surface, l'ion est neutralisé et se fragmente s'il s'agit d'un ion moléculaire (dans ce cas, l'énergie se répartit entre les différents fragments en fonction de leur masse). Le transfert d'énergie de l'ion au solide ne peut être efficace que si la masse de l'ion ou des fragments est voisine de celle des atomes du solide. Les principaux phénomènes résultant de l'impact d'un ion sur la surface sont généralement classés en fonction de l'énergie :

- ✓ Migration d'atomes adsorbés : $E_i \sim 0,01$ à $0,2$ eV,
- ✓ Désorption d'espèces : $E_i \sim 0,1$ à 10 eV,
- ✓ Déplacement d'atomes : $E_i > 10$ eV,
- ✓ Pulvérisation : $E_i > E_{\text{seuil}} \sim 20$ à 50 eV.

Le seul mécanisme direct conduisant à une gravure est donc la pulvérisation, lorsque les ions sont assez énergétiques. Ce processus est défini par un rendement (nombre d'atomes éjectés par ion incident), ce rendement suit théoriquement la relation [Matsunami 84, Steinbrüchel 89] :

$$Y = A \left[\sqrt{E_i} - \sqrt{E_{\text{seuil}}} \right] \text{ pour } E_i > E_{\text{seuil}} \quad (5)$$

Le facteur de proportionnalité A et l'énergie seuil (E_{seuil}) dépendent du matériau, de l'état de la surface, de la masse de l'ion et de l'angle d'incidence des ions. Il faut cependant noter que les variations sont relativement faibles, rendant ainsi la gravure par pulvérisation physique peu sélective. La gravure en plasma de gaz rare est l'exemple type de gravure purement ionique et physique. Les autres processus induits par les ions cités ci-dessus ne portent effet que par action combinée avec une attaque chimique (cf. section 1.2.3.2).

La gravure physique présente le grand intérêt d'être la plupart du temps **anisotrope** du fait de la directivité du flux d'ions. Cependant, elle souffre généralement d'une **absence de sélectivité** (faible différence entre les rendements de pulvérisation des différents matériaux couramment utilisés en micro-électronique) et peut induire dans les matériaux des dégradations conséquentes en raison de l'énergie assez élevée des particules incidentes.

1.4.2.3. La gravure plasma.

La grande force de la gravure plasma est qu'elle combine les effets des gravures chimique et physique. Elle possède les qualités de ces deux procédés (anisotropie de gravure et sélectivité) tout en minimisant leurs inconvénients. En combinant ces deux types de gravure, les vitesses obtenues par plasma sont 10 à 30 fois supérieures aux vitesses obtenues par gravure chimique ou physique séparément, d'où l'intérêt d'utiliser les plasmas pour la fabrication des circuits intégrés.

La synergie ions (aspect physique du plasma)/ neutres (aspects chimique du plasma) se traduit par deux types de mécanismes de gravure :

Chapitre 1 : Contexte technologique

✓ La gravure chimique assistée par les ions ou gravure chimique réactive

Ce mécanisme de gravure a été évoqué la première fois par J. Coburn et H.F. Winters [Coburn 1979]. C'est un processus par lequel les ions accélèrent les cinétiques de gravure des étapes élémentaires de la gravure chimique :

- ✓ **Adsorption** : le bombardement ionique favorise l'incorporation d'espèces réactives dans la couche de surface,
- ✓ **Réaction** : en créant des défauts de structures et des liaisons pendantes à la surface, le bombardement ionique augmente la probabilité de réaction des molécules gazeuses incidentes. De plus, l'apport énergétique des ions accroît les réactions chimiques (migration des atomes adsorbés, activation des espèces en surface...),
- ✓ **Désorption** : le bombardement ionique stimule la désorption des produits de réaction, pulvérise des espèces faiblement liées, et « nettoie » la surface d'espèces inhibitrices de gravure ou précurseur de dépôt.

✓ La pulvérisation activée chimiquement ou gravure ionique réactive

La gravure ionique réactive se situe à mi-chemin entre gravure physique et gravure chimique [Schwartz 76] : les ions, se neutralisant à l'approche de la surface du substrat [Hagstrom 61] deviennent alors des neutres réactifs hautement énergétiques qui participent directement à la gravure chimique de l'échantillon. Elle ne peut avoir d'importance que si le flux d'ions sur la surface est comparable au flux de neutres, cette situation exigeant un plasma à basse pression (1 à 10 mTorr) et à haute densité (10^{11} à 10^{12} cm⁻³).

La gravure ionique réactive diffère de la gravure chimique réactive par le fait que les ions deviennent des neutres réactifs. Pour la gravure chimique réactive, les ions apportent seulement de l'énergie par bombardement mais ne réagissent pas avec le matériau gravé.

La gravure anisotrope du matériau est possible car les ions sont accélérés quasi perpendiculairement au substrat grâce à la gaine électrostatique. Cependant, la composante latérale de la gravure, due essentiellement à l'aspect chimique, n'est pas négligeable, et 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 réactifs, le plasma peut aussi produire des molécules dites inhibitrices. Ces molécules peuvent alors 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, en isolant le matériau des espèces réactives du plasma.

La passivation (ou le blocage) des flancs, qui permet de limiter la gravure latérale des motifs par les espèces chimiquement réactives du plasma, peut provenir à la fois :

- ✓ de l'introduction intentionnelle d'espèces additionnelles dans le mélange gazeux du plasma afin de déposer une barrière protectrice sur les flancs des structures gravées. Par exemple, l'introduction de gaz fluorocarbonés (CF₄, CH₂F₂, CH₃Br..) qui permettent la formation d'un dépôt du type polymère (C_xH_yF_z) est souvent utilisée pour assurer l'anisotropie de gravure des trous de contacts en SiO₂ [Fang 96, Sowa 00, Standaert 04].
- ✓ du dépôt de produits de gravure peu volatils par pulvérisation physique de l'échantillon à graver qui viennent se re-déposer.

✓ Cas de la gravure d'une grille en polysilicium :

Les mécanismes de formation des couches de passivation sur les flancs de la grille de silicium, gravée avec une chimie $\text{HBr}/\text{Cl}_2/\text{O}_2$ ont fait l'objet de nombreux articles scientifiques [Guinn 95, Bell 97, Desvoires 01, Hamaguchi 01, Oehrlein 90, Arnold 94]. Des analyses par XPS des flancs des motifs après gravure [Guinn 95, Bell 97, Desvoires 01] indiquent que la nature chimique de ces couches est du type SiO_xCl_y , et qu'elle peut évoluer selon la nature du masque utilisé (masque dur ou masque résine [Bell 97]). De plus, il a été montré que ces couches sont d'autant plus épaisses que la densité d'oxygène dans le plasma est importante. Partant de ces observations, deux types de mécanismes ont été proposés pour expliquer leur formation, comme schématisés sur la figure 1-23.

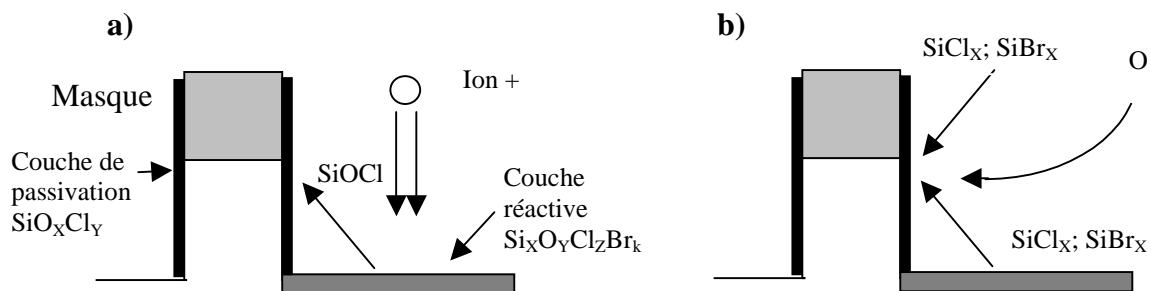


Figure 1-23 : Mécanismes possibles de formation des couches de passivation sur les flancs de la grille en silicium en chimie $\text{HBr}/\text{Cl}_2/\text{O}_2$. a) Pulvérisation de produits SiOCl du fond des tranchées et re-dépôt direct sur les flancs des motifs, b) Re-dépôt de produits de gravure volatils (SiCl_x) provenant du plasma, suivi d'oxydation de ces produits sur les flancs.

Dans le premier mécanisme, figure 1-23a), la couche réactive qui se forme au fond des motifs, sous la double influence du bombardement ionique et de l'adsorption d'atomes d'halogène, est pulvérisée par bombardement ionique [Guinn 95]. Parmi les produits de gravure résultant de ce mécanisme, des espèces de type SiOCl sont susceptibles de se redéposer directement sur les flancs du motif, menant à la croissance de la couche de passivation.

Dans le second mécanisme, figure 1-23b), ce sont directement les produits de gravure du silicium (SiCl_x et SiBr_x), présents dans la phase gazeuse, qui se re-déposent sur les flancs [Hamaguchi 01, Oehrlein 90]. Ce re-dépôt d'espèces SiCl_x ne peut pas être considéré comme une couche de passivation protectrice car cette couche peut elle-même être gravée par les atomes de chlore (Cl) et de brome (Br) issus du plasma. Cependant, les surfaces exposées au plasma sont également soumises à un flux d'oxygène atomique qui peut oxyder les produits SiCl_x , SiBr_x qui se re-déposent. Ces produits oxydés ne pouvant être gravés par Br ou Cl en l'absence de bombardement ionique, la couche peut ainsi croître.

Dans les deux cas, la couche de type SiO_xCl_y qui se forme sur les flancs des motifs bloque la composante de gravure latérale du silicium en isolant ce dernier des espèces réactives présentes dans le plasma. Il est probable que les deux mécanismes décrits ci-dessus cohabitent sans que l'on puisse facilement quantifier leurs contributions respectives.

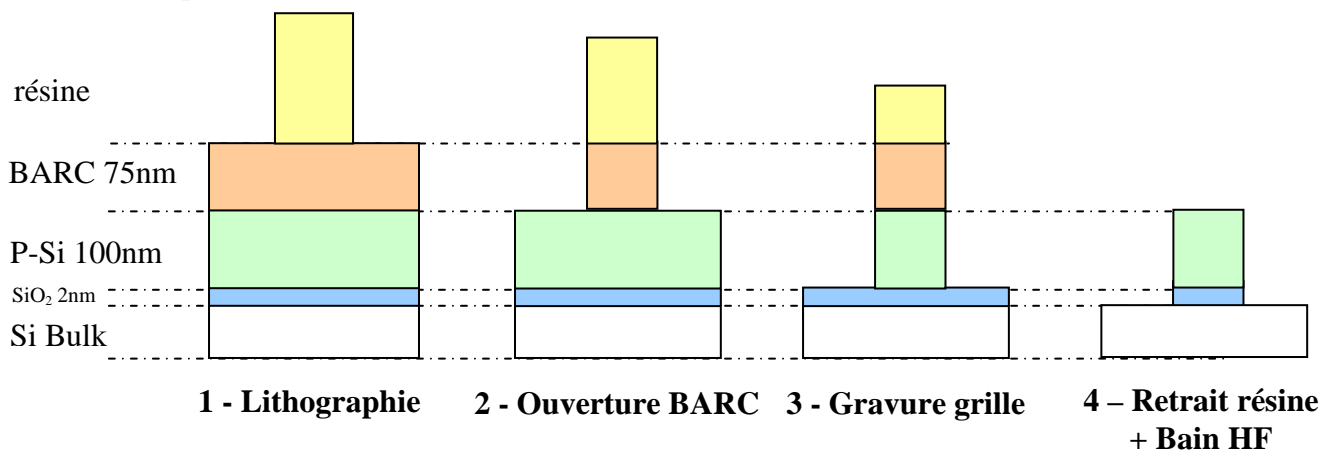
Pour résumer, la gravure anisotrope par plasma résulte de la synergie entre gravure chimique et physique, et d'une compétition entre gravure chimique par des neutres réactifs et dépôt de produits de gravure formant une couche de passivation.

1.5. Les défis technologiques liés à la miniaturisation des composants.

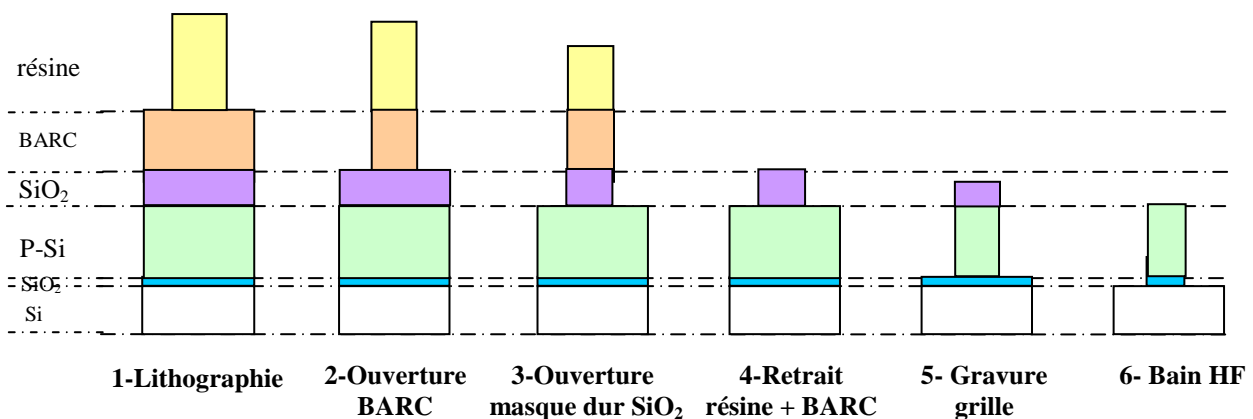
1.5.1. La réalisation d'une grille de transistors MOS.

Le principe de base de la réalisation d'une grille de transistor est nommé « approche top-down ». Elle consiste à réaliser un masque dans un matériau X et de le transférer ensuite dans le matériau à graver. Dans le cas de la réalisation de grilles de transistors en poly-silicium, ce principe est utilisé pour transférer les motifs du masque dans les différentes couches minces nécessaires à la fabrication de la grille. On trouve aujourd'hui trois types de masque pour graver la grille en silicium : le masque résine, le masque dur en SiO_2 et le masque carbone. Dans le cas du masque résine, on utilise directement le motif de résine comme masque pour la gravure de la grille. Pour le masque dur en SiO_2 et masque carbone, le masque en résine est d'abord transféré dans une couche – en SiO_2 pour le masque dur et en Carbone amorphe pour le masque Carbone - qui sert ensuite de masque pour la gravure de la grille. Pour les trois types de masque, les différentes étapes nécessaires à la fabrication d'une grille de transistor, sont schématisées sur la figure 1-24.

a) Masque résine



b) Masque dur en SiO_2 .



Chapitre 1 : Contexte technologique

c) Masque carbone

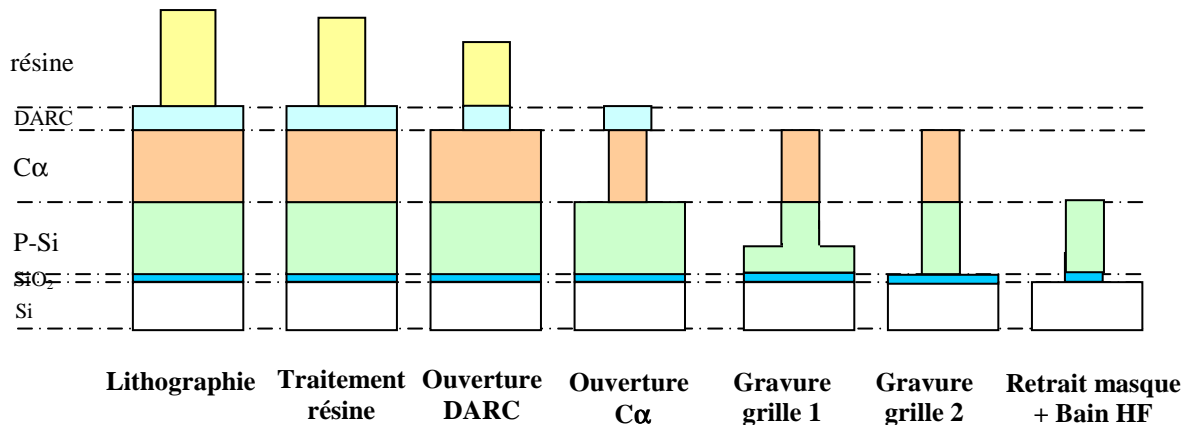


Figure 1-24 : Schéma de l'enchaînement des étapes technologiques avec : a) un masque résine, b) masque dur en SiO₂, c) masque en carbone.

Pour chaque type de masques, l'étape de gravure de la grille doit respecter la dimension définie par la lithographie et s'arrêter sélectivement sur l'oxyde de grille. Pour cela, la gravure de la grille se passe toujours en quatre étapes :

- ✓ **Étape de perçage de l'oxyde natif, appelée « breaktrough » (BT)** qui permet d'éliminer l'oxyde natif présent en surface du silicium (1-2nm). C'est une étape typiquement de 5s, où le bombardement est très énergétique.
- ✓ **Étape de gravure principale, appelée « Main Etch » (ME)** qui consiste à graver en grande partie la grille et à s'arrêter peu avant de déboucher sur l'oxyde de grille (~10-15nm de l'oxyde).
- ✓ **Étape d'atterrissage sur l'oxyde, appelée « Soft landing » (SL)** qui consiste à finir de graver le polysilicium et atterrir en douceur (conditions plasmas douces) sur l'oxyde de grille. Les chimies de gravure utilisées sont plus sélectives vis-à-vis de l'oxyde de grille que l'étape de ME et le bombardement ionique présente une faible énergie afin de ne pas endommager l'oxyde de grille.
- ✓ **Étape de surgravure, appelée « over etch » (OE)** qui permet de terminer la gravure des résidus de silicium sur l'oxyde de grille et d'homogénéiser les zones denses et isolées. C'est une étape où le bombardement ionique est faiblement énergétique.

L'étape suivante, appelée « stripping », consiste à retirer le masque de gravure. Dans le cas du masque résine et carbone, cette étape est réalisée par plasma d'oxygène pur. Dans le cas du masque dur, cette étape est réalisée par immersion dans un bain d'acide fluorhydrique (HF). Finalement, pour chaque type de masque utilisé, la définition de la grille se termine par le retrait de la couche de passivation présente sur les flancs de la grille et de l'oxyde de grille dans un bain d'acide fluorhydrique (HF).

Lors de la gravure avec un masque en résine, le carbone (BARC, résine) présent lors de l'étape de gravure de la grille peut commencer à graver l'oxyde de grille et consommer du silicium sous-jacent [Vallier 99]. L'épaisseur de l'oxyde diminuant avec la réduction en dimension des transistors, il convient donc d'utiliser des chimies de gravure de la grille très sélectives vis-à-vis de cet oxyde, pour la fabrication des transistors de futures générations. Pour cela le masque dur a été introduit dans l'industrie de la microélectronique. En effet, cette stratégie présente l'avantage de ne pas comporter de composé carboné lors de l'étape de gravure de la grille et donc d'être plus sélective sur l'oxyde de grille que la stratégie avec un masque résine. Par ailleurs, elle permet de diminuer le facteur d'aspect du masque et ainsi

Chapitre 1 : Contexte technologique

obtenir une gravure moins dépendante du facteur de forme (phénomène d'ARDE). Cette stratégie est aujourd'hui largement utilisée pour la réalisation de grille de transistor pour les nœuds technologiques inférieurs à 90nm.

Finalement, une gravure avec un masque en carbone a récemment été introduite dans l'industrie de la microélectronique pour répondre aux besoins des nœuds technologiques inférieurs à 45nm. Le masque en carbone amorphe présente un double avantage. Il peut être utilisé à la fois comme couche anti-réfléctive pour l'étape de lithographie - propriétés anti-réfléctives équivalentes aux couches anti-réfléctives standards - et comme masque dur pour la gravure de la grille. En effet, avec les chimies de gravure à base de fluor couramment utilisées pour la gravure de la grille, le carbone amorphe présente une grande sélectivité vis-à-vis du poly-silicium, de l'oxyde de silicium ou du nitrure de silicium, comparé aux couches anti-réfléctives classiques. En outre, ce masque peut être facilement retiré par plasma d'oxygène. Ce double avantage permet d'envisager le développement de technologie de lithographie hybride sur une même puce ; la lithographie par faisceau d'électrons pour réaliser les motifs les plus fins et la lithographie optique à 193nm pour les motifs de taille supérieure. Dans le cadre de ce projet de recherche, ces trois types de masque de gravure ont été expérimentés et comparés.

1.5.2. Les exigences requises

Les objectifs fixés par l'ITRS pour les générations futures de transistors sont de plus en plus contraignants. Le tableau 1-1 présente les principaux critères dimensionnels requis pour la lithographie, le « front end » et la métrologie, pour les six années à venir, dans le cas de circuits intégrés destinés à des microprocesseurs.

Année de production	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Génération technologique			hp65			hp45			hp32
MPU longueur de grille dans la résine (nm)	53	47	42	38	33	30	27	24	21
MPU longueur de grille après gravure (nm)	32	28	25	22	20	18	16	14	13
Line Width Roughness (nm, 3sigma) < 8% du CD dans la résine	4,2	3,8	3,4	3	2,7	2,4	2,1	1,9	1,7
Line Width Roughness (nm, 3sigma) < 8% du CD après gravure	2,6	2,2	2	1,8	1,6	1,4	1,3	1,1	1
Précision des outils de métrologie du CD (nm) pour LWR	0,52	0,44	0,4	0,36	0,32	0,28	0,25	0,22	0,2

	solutions industrielles existent et sont à optimiser
	solutions industrielles sont connues
	solutions provisoires sont connues
	solutions industrielles ne sont pas connues

Source : metrology and lithography ITRS roadmap update2006

Tableau 1-1 : Exigences requises par la feuille de route ITRS en terme de dimensions de la grille de transistor [ITRS].

Dans ce contexte de miniaturisation des composants, les exigences de l'ITRS requièrent par exemple, pour le nœud technologique de 45nm (2010), une longueur de grille de transistor de 18nm, avec une variation moyenne de sa dimension de 1,4nm. Ces exigences, en termes de dimensions des grilles de transistors, vont au-delà des possibilités technologiques actuelles, aussi bien en lithographie, qu'en gravure ou métrologie. Avec les techniques actuelles de

fabrication, des travaux ont montré que pour des longueurs de grille inférieures à 30nm, la rugosité de bord de la grille (variation moyenne de la longueur de grille), figure 1-25, était la cause de variation aléatoire du courant dans le transistor et d'une augmentation du courant de fuite [Oldiges 00, Diaz 01, Kaya 01, Croon 02, Linton 02]. Ces effets ne sont bien sûr pas acceptables pour le bon fonctionnement de futures générations de transistors. Il convient donc de comprendre clairement les origines de cette rugosité de bord afin de pouvoir la contrôler. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail de thèse.

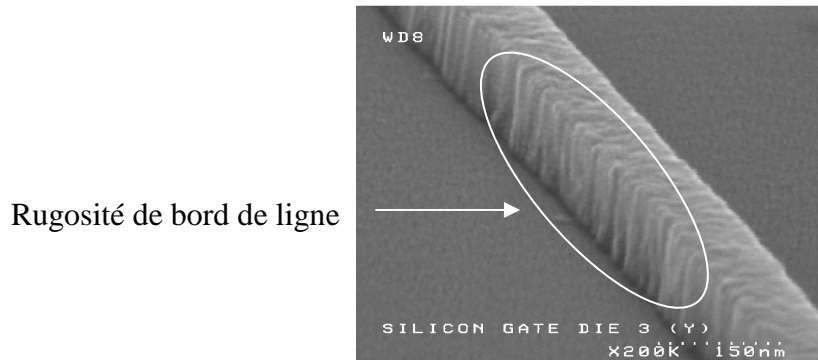


Figure 1-25 : Image MEB du flanc d'une grille de transistor en polysilicium.

1.5.3. La problématique de la rugosité de bord

La rugosité de bord de la grille de transistor causes des fluctuations de la longueur moyenne de la grille ce qui dégrade les performances électriques des dispositifs. Cette problématique a fait l'objet de travaux de recherche de simulation et expérimentaux.

Oldiges montre par simulation que la rugosité de bord de la grille de transistor affecte les performances électriques des dispositifs de dimensions inférieures à 100nm [Oldiges 00]. En effet, il met en évidence qu'une augmentation de la rugosité de bord de la grille de transistor de 80nm entraîne une hausse du courant de fuite (I_{off}) et une variation importante de la tension de saturation. Finalement, il remarque que la rugosité de bord peut causer autant ou plus de fluctuations électriques dans les composants que la distribution aléatoire des dopants [Asenov 98, Stolk 98]. Par la suite, toujours à l'aide de simulations, Diaz [Diaz 01] et Kaya [Kaya 01] indiquent que le courant de fuite (I_{off}) et le courant de commande (I_d) du transistor sont très sensibles à la rugosité de bord. Croon montre que l'effet de la rugosité de bord sur les paramètres électriques des dispositifs, peut devenir dominant pour des longueurs de grilles de 32nm [Croon 02, Croon 03]. Et finalement, Linton recommande que pour des dispositifs de 34nm, la rugosité de bord (à 3σ) soit égale à 3nm afin de conserver les mêmes caractéristiques électriques que les dispositifs de 70nm [Linton 02].

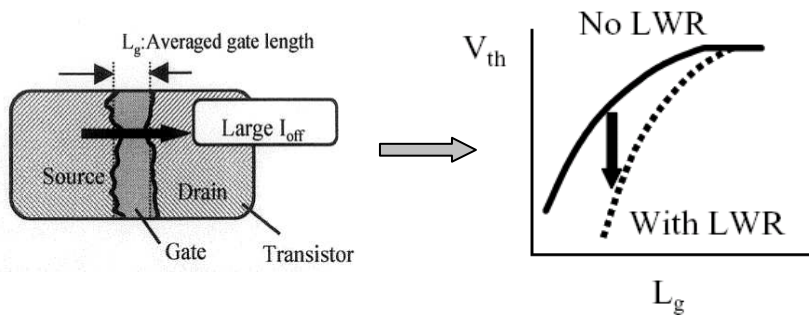
Quelques travaux expérimentaux ont également souligné que la rugosité de bord augmente les variations du courant de fuite quand la longueur de grille diminue [Kim 04, Lee 04]. Les travaux de simulation et expérimentaux de Yamaguchi résument les effets de la rugosité de bord sur les performances du transistor, suivant les fréquences spatiales de cette dernière [Yamaguchi 03, Yamaguchi 04]. Il montre que la rugosité de bord, avec de longues périodes spatiales, cause des fluctuations de la longueur moyenne de la grille du transistor, ce qui entraîne un décalage de la courbe I-V du transistor, figure 1-26b). Les périodes spatiales courtes, génèrent, quant à elles, des dégradations des performances du transistor, par une augmentation des courants de fuites et un décalage de la tension de seuil, figure 1-26a). Les travaux de Xiong et al [Xiong 04] soulignent que les procédés d'implantation et de diffusion

Chapitre 1 : Contexte technologique

des dopants lissent les périodes spatiales courtes de la rugosité de bord. Ainsi, Yamaguchi en conclue que l'effet des longues périodes de la rugosité de bord sur les performances électriques des transistors est plus important que celui des périodes courtes [Yamaguchi 03].

Une exigence importante requise par l'ITRS est la mesure de la rugosité de bord, qui doit être plus précise que la mesure de la dimension [ITRS]. Les effets de la rugosité de bord devenant de plus en plus apparents sur les performances des dispositifs, il est important d'adapter les outils de métrologie pour obtenir une mesure précise de cette variation. Par ailleurs, il n'y a pas de méthode de mesure standard pour déterminer la valeur de la rugosité de bord. Il convient donc d'établir un protocole de mesure commun pour optimiser la métrologie de la rugosité de bord, et ainsi mieux quantifier les effets de la rugosité de bord sur les performances des dispositifs.

a) Courte période spatiale de la rugosité de bord



b) Longue période spatiale de la rugosité de bord

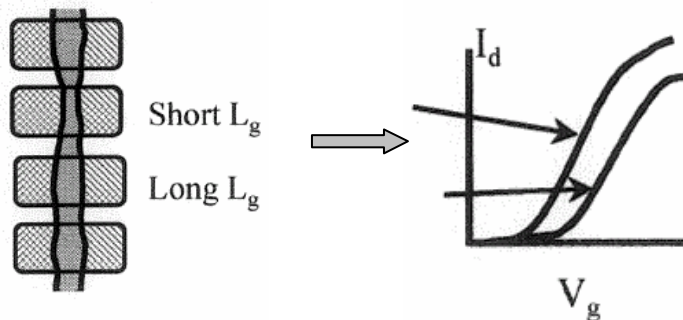


Figure 1-26 : Effets de la rugosité de bord de ligne sur les performances des dispositifs [Yamaguchi 03, Yamaguchi 04]

1.6. Objectifs de la thèse

Dans le contexte de la miniaturisation des composants en microélectronique, l'objectif de ce travail de thèse est de contrôler la rugosité de bord d'une grille de transistors. Dans un premier temps, il est essentiel de trouver un protocole de caractérisation de la rugosité de bord, pour dans un second temps pouvoir étudier l'évolution de la rugosité de bord lors des différentes étapes technologiques de fabrication d'une grille de transistors.

Pour mener à bien ce projet de recherche, il a, tout d'abord, été nécessaire de mesurer avec précision cette variation de la longueur moyenne de la grille. Actuellement, trois techniques de métrologie sont disponibles pour mesurer la dimension des dispositifs fabriqués. On trouve deux techniques qui sont largement utilisées dans l'industrie de la microélectronique, la microscopie électronique à balayage et la scattérométrie, et une troisième technique plus récente et très prometteuse, la microscopie à force atomique en trois dimensions. Ces différentes techniques complémentaires, et le choix du CD-AFM pour la conduite nos études, sont expliqués dans le chapitre 2. Actuellement, aucune méthode standard de mesure de la rugosité de bord de ligne n'est définie. C'est pourquoi, après analyse des capacités du CD-AFM, nous avons mis au point, avec cet équipement, un protocole expérimental de caractérisation de la rugosité de bord de ligne, décrit dans le chapitre 2.

Cette méthode de mesures par CD-AFM nous a alors permis d'étudier l'influence de plusieurs paramètres du procédé de fabrication d'une grille de transistor MOS, sur la rugosité de bord de ligne. Une première étude a été menée sur le motif de résine après l'étape de lithographie, afin de comprendre les origines de la rugosité de bord. Ces expériences, exposées dans le chapitre 3, nous ont permis de souligner l'influence de certains paramètres du procédé lithographique sur la rugosité de bord de la résine et ainsi de mieux comprendre les causes de ce phénomène.

A partir du motif de résine, des procédés plasma sont utilisés pour graver les couches sous-jacentes et obtenir la grille finale en silicium. La gravure plasma est une combinaison de gravure physique, régie par le bombardement ionique, et chimique, correspondant à l'action des neutres du plasma. Nous avons donc examiné l'influence de ces deux aspects de la gravure plasma sur la rugosité de bord du motif de résine. Cette étude, présentée dans le chapitre 4, nous a permis de mettre en évidence certains mécanismes d'évolution de la rugosité de bord.

Par la suite, nous nous sommes intéressés à l'évolution de la rugosité de bord lors de l'enchaînement des étapes de fabrication d'une grille de transistor, décrite en figure 22, afin d'identifier et évaluer l'influence de chaque étape de gravure (traitement de la résine, ouverture du BARC, ouverture du masque de gravure et gravure de la grille). Ce travail, présenté au chapitre 5, a été réalisé avec trois masques de gravure différents - masque résine, masque dur en SiO_2 et masque carbone - et nous a permis de déterminer les paramètres importants qui contrôlent la rugosité de bord de la grille finale en silicium.

1.7. Bibliographie

- [Arnold 94] **J.C. Arnold, H.H. Sawin, M. Dalvie, et S. Hamaguchi,**
J. Vac. Sci. Technol. A 12, pp. 620, 1994.
- [Asenov 98] **A.Asenov,**
IEEE Trans. Electron Device, Vol. 45, pp. 2505-2513, Dec 1998.
- [Aviram 74] **A.Aviram et M.A.Ratner,**
Chem. Phys. Lett, 29(2), pp.277-283, 1974.
- [Bell 97] **F.H. Bell et O. Joubert,**
J. Vac. Sci. Technol. B 15, pp. 88, 1997.
- [Charley 06] **A.L. Charley,**
Thèse de l'Institut Nationale Polytechnique de Grenoble, 2006.
- [Chou 95] **S.Y. Chou, P.R. Krauss, et P. Renstrom,**
Appl. Phys. Lett., Vol. 67(21), pp. 3114, 1995.
- [Chou 97] **S.Y. Chou, P.R. Krauss, W. Zhang, L. Guo, L. Zhuang,**
J. Vac. Sci. Technol. B 15(6), pp. 2897, 1997.
- [Choudhury 97] **P.Rai-Choudhury,**
“Handbook of Microlithography, Micromachining, and
Microfabrication -Volume 1: Microlithography”, SPIE Press, 1997.
- [Coburn 79^a] **J.W. Coburn et H.F. Winters,**
J. Appl. Phys. 50, pp 3189-3196, 1979.
- [Coburn 79^b] **J.W. Coburn et H.F. Winters,**
J. Vac. Sci. Technol. B 16, pp. 391, 1979.
- [Colburn 99] **M. Colburn, S. Johnson, M. Stewart, S. Damle, T. Bailey, B.J. Choi,
M. Wedlake, T.Michaelson, S.V.Screenivasan, J.Ekerdt, G.Wilson,**
Proc. SPIE, Vol.3676, pp. 379, 1999.
- [Croon 02] **J.A.Croon, G. Storms, S. Winkelmeier, I. Pollentie, M.Ercken,
S. Decoutere, W. Sansen, et H.E.Maes,**
Proc. IEDM, pp. 307-310, 2002.
- [Croon 03] **J.A.Croon, L.H.A. Leunissen, M. Jurczak, M. Benndorf,
R. Rooyackers, K. Ronse, S. Decoutere, W. Sansen, et H.E.Maes,**
Proc. ESSDERC, pp. 227-230, 2003.
- [Cristoloveanu] **S. Cristoloveanu et F.Balestra,**
“Technologie silicium sur SOI”, technique de l'ingénieur, E 2 380.

- [Demarthon 02] **F. Demarthon,**
“Le jour où le photon détrônera l’électron”
Les défis du CEA n°91, pp. 15, Mai-Juin 2002.
- [Derycke 01] **V.Derycke, R.Martel, J. Appenzeller, et P. Avouris,**
Nano Lett, 1(9), pp453-456, 2001.
- [Diaz 01] **C.H.Diaz, H.J.Tao, Y.C.Ku, A.yen, et K.Young**
IEEE Electron Device Lett, Vol22, pp. 287-289, Juin 2001.
- [Desvoisvres 01] **L.Desvoisvres, L.Vallier et O. Joubert,**
J. Vac. Sci. Technol. B 19, pp. 420, 2001.
- [Dupuy 02] **F. Dupuy-Maury,**
“L’électronique moléculaire prépare la relève”
Les défis du CEA n°91, pp. 10, Mai-Juin 2002.
- [Flamm 81] **D. L. Flamm, V. M. Donnelly et J. A. Mucha,**
J. Appl. Phys. 52, pp 3633-3639, 1981.
- [Flamm 90] **D.L. Flamm,**
Pure and Appl. Chem. 62, pp. 1709, 1990
- [Font 98] **G.I. Font, I.D. Boyd, et J. Balakrishnan,**
J. Vac. Sci. Technol. A 16, pp. 2057, 1998.
- [Gorter 51] **C.J.Gorter,**
Physica 17, pp. 777, 1951.
- [Gottsho 92] **R.A. Gottsho, C.W. Jurgensen, et D.T. Vitkavage,**
J. Vac. Sci. Technol. B 10, pp. 2133, 1992.
- [Grabert] **H.Grabert, et M.H. Devoret,**
“Single Charge Tunneling”,
Nato ASI Series B, Physic volume 294.
- [Guinn 95] **K.V. Guinn, C.C. Cheng, et V.M. Donnelly,**
J. Vac. Sci. Technol. B 13, pp. 214, 1995.
- [Gwyn 98] **C. W. Gwyn, R. Stulen, D. Sweeney, et D. Attwood,**
J. Vac. Sci. Technol. B 16 (6), pp. 3142-3149, 1998.
- [Hagstrom 61] **H. Hagstrom,**
Phys. Rev. 122, pp. 83-113, 1961.
- [Hamaguchi 94] **S. Hamaguchi and M. Dalvie,**
J. Vac. Sci. Technol. A 12, pp. 2745, 1994.

Chapitre 1 : Contexte technologique

- [Harper 89] **J.M.E.Harper**,
“Plasma etching- an introduction“,
D.M.manos and D.L.Flamm editions,
Academic Press, San Diego, pp. 391, 1989.
- [Hedlund 94] **C. Hedlund, H.O. Blom, et S. Berg**,
J. Vac. Sci. Technol. A 12, pp. 1962, 1994.
- [ITRS] **International Technology Roadmap for Semiconductors**,
Consultable sur : <http://www.itrs.net>.
- [Joachim 00] **C. Joachim, J.K. Gimzewski, et A. Aviram**,
Nature, 408(6812), pp. 541-548, Nov 2000.
- [Joachim 02] **C. Joachim**,
Nanotechnology, 13, R1-R7, 2002.
- [Joubert 04] **O. Joubert, G. Cunge, B. Pellisier, L. Vallier, M. Kogelschatz, et E.Pargon**.
J. Vac. Sci. Technol. B 22, pp. 553-563, 2004.
- [Kaya 02] **S. Kaya, A.R. Brown, A. Asenov, D. Magot, et T. Linton**,
Proc. SISPAD, pp. 78-81, 2002.
- [Kim 04] **H.W. Kim, J.Y. Lee, J. Shin, S.G. Woo, H.K. Cho, et J.T. Moon**,
IEEE Trans. Electron Device, Vol. 51, pp. 1984-1988, Dec 2004.
- [Lee 04] **J.Y. Lee, J. Shin, H.W. Kim, S.G. Woo, H.K. Cho, W.S. Han, et J.T.Moon**
Proc SPIE, Vol5376, pp. 426-433, 2004.
- [Legouil 06] **A. Legouil**
Thèse de l’université Joseph Fourier de Grenoble, 2006.
- [Lenfant 03] **S.Lenfant, C.Krzeminski, C. Delerue, G. Allan, et D. Vuillaume**,
Nano Lett. 3(6), pp. 741-746, 2003.
- [Levinson 01] **H.J. Levinson**,
“Principle of lithography“, SPIE Optical Engineering Press, 2001.
- [Linton 02] **T. Linton, M. Chandhok, B.J. Rice, G.Schrom**,
Proc IEDM, pp. 303-306, 2002.
- [Matsunami 84] **M.Matsunami, Y.Yamamura, Y.Itikawa, et H.Tawara**,
At. Data Nucl. Data Tables 31, 1, 1984.
- [McCord 97] **M.A. Cord, et M.J. Rooks**,
Handbook of microlithography : microfabrication and microsystems.
P.Rai-Choudhury, SPIE Press, pp. 139-250, Washington, 1997.

Chapitre 1 : Contexte technologique

- [McNevin 97] **S.C.McNevin, K.V.guinn, et J.A.Taylor,**
J. Vac. Sci. Technol. B 15, pp. 214, 1997.
- [Moore 65] **G.Moore,**
Cramming more components onto integrated circuits, Electronic,
Vol 38 (8), 1965.
<ftp://download.intel.com/research/silicon/moorespaper.pdf>.
- [Mouis 01] **M.Mouis et A.Poncet,**
ESSDERC'2001, pp. 211-214, Nuremberg, sept 2001.
- [Oehrlein 90] **G.S. Oehrlein, J.F. Rembetski and E.H. Payne,**
J. Vac. Sci. Technol. B 8, pp. 1199, 1990.
- [Oldiges 00] **P. Oldiges, Q. Lin, K. Petrillo, M. Sanchez, M. Jeong, M. Hargrove,**
Proc. SISPAD, pp.131-134, 2000.
- [O'Neill 95] **J.A. O'Neill et J.Singh,**
J. Appl. Phys. 77, pp. 497, 1995.
- [Pain 96] **L. Pain,**
Thèse de l'Institut Nationale Polytechnique de Grenoble, 1996.
- [Pain 02] **L. Pain, M. Charpin, Y. Laplanche, et D. Henry,**
Proc. SPIE, 4688, pp. 607-618, 2002.
- [Reed 01] **M.A. Reed, J. Chen, A.M. Rawlett, D.W. Price,**
Appl. Phys. Lett, 78 (23), pp3735-3737, 2001.
- [Resnik 03] **D.J. Resnick, W.J. Dauksher, D. Mancini, K.J. Nordquist, T.C.
Bailey, S. Johnson, N. Stacey, J.G. Ekerdt, C.G. Wilson,
S.V. Sreenivasan, et N. Schumaker,**
J. Vac. Sci. Technol. B 21(6), pp. 2624-2631, 2003.
- [Rhew 02] **J.H. Rhew, Z. Ren, et M.S. Lundstrom,**
Solid-State Electron,46 (11), pp. 1899-1906, 2002.
- [Rueckes 00] **T. Rueckes, K. Kim, E. Joselevich, G.Y.Tseng, et C.M. Lieber,**
Science, 289 (5476), pp.94-97, Juil 2000.
- [Sarroukhi 05] **O.Sarroukhi,**
Thèse, Université d'Orléans, discipline : physique des plasmas, 2005.
- [Schwartz 76] **G.C.Schwartz, L.B. Zielinski et T. Schopen,**
Electrochem. Soc. Symp. Series, Electrochem Soc, Princeton, N.J,
pp. 122-132, 1976.
- [See 03] **J.Sée, P. Dollfus, S. Galdin, et P. Hesto,**
J. Appl. Phys. 94(8), pp. 5053-5063, 2003.

Chapitre 1 : Contexte technologique

- [Shaqfeh 89] **E.S.G. Shaqfeh et C.W. Jurgensen,**
J. Appl. Phys. 66, pp. 4664, 1989.
- [Sigmung 69] **P. Sigmund,**
Phys.Rev, 184, pp. 383-416, 1969.
- [Stolk 98] **P.A. Stolk, F.P. Widdershoven, et D.B.M. Klaasen**
IEEE Trans. Electron Device, Vol. 45, pp. 1960-1971, Sept 1998.
- [Skotnicki] **T. Skotnicki,**
“Transistor MOS et sa technologie de fabrication“,
technique de l’ingénieur, E 2430.
- [Steinbrüchel 89] **C. Steinbrüchel,**
Appl. Phys. Lett. 55, pp. 1960, 1989.
- [Sze 81] **S.M. Sze,**
Physics of Semiconductor Devices, 2nd edition, John Wiley & Sons,
New-York, 1981.
- [Thompson 83] **L.F. Thompson et al,**
«Introduction to Microlithography», *ACS Symposium*, Series 219, 1983.
- [Vallier 99] **L. Vallier, L. Desvoivres, M. Bonvalot, et O. Joubert,**
Appl. Phys. Lett. 75, pp. 1069, 1999.
- [Winters 83] **H.F. Winters, J.W. Coburn, et T.J. Chuang,**
J. Vac. Sci. Technol. B 1, pp. 469, 1983.
- [Xiong 02] **S. Xiong, J. Bokor, Q. Xiang, P.Fisher, I.M. Dudley, et P. Rao,**
Proc SPIE, Vol 4689, pp. 733-741, 2002.
- [Xiong 04] **S.Xiong, et J. Bokor,**
IEEE Trans. Electron Device, Vol. 51(2)), pp. 228-232, Fev 2004.
- [Xiong 04] **S. Xiong, J. Bokor, Q.Xiang, P.Fisher, I.M.Dudley, P.Rao,
H. Wang, et B.En,**
IEEE Trans. Semiconductors. Manufacturing, Vol. 17(3),
pp. 357-361, Aout 2004.
- [Yamaguchi 03] **A. Yamaguchi, R. Tsuchiya, H. Fukuda, O. Komuro, H. Kawada,
et T. Iizumi,**
Proc. SPIE, Vol 5038, pp. 689-698, 2003.
- [Yamaguchi 04] **A. Yamaguchi, K. Ichinose, S. Shimamoto, H. Fukuda, R. Tsuchiya,
K. Ohnishi, H. Kawada, et T. Iizumi,**
Proc. SPIE, Vol 5375, pp. 468-476, 2004.

Chapitre 2.

Métrologie de la rugosité de bord de ligne

Ce chapitre est destiné à la métrologie de la rugosité de bord de ligne. Ce paramètre devenant critique pour le bon fonctionnement des transistors de futures générations, il est aujourd'hui indispensable de mesurer avec précision la rugosité de bord de ligne afin de la minimiser lors des procédés de gravure plasma. Dans un premier temps, nous introduirons quelques rappels de statistique afin de comprendre la définition mathématique de la rugosité de bord de ligne. Dans une seconde partie, les différents outils de métrologie potentiellement capables de fournir une valeur de la rugosité de bord seront décrits, et plus particulièrement, le microscope à force atomique en trois dimensions (CD-AFM) que nous avons principalement étudié et utilisé dans le cadre de cette thèse pour mesurer la rugosité de bord de ligne. Finalement, nous présenterons les différents tests de performances que nous avons effectués et le protocole de mesure de la rugosité de bord mis au point pour obtenir une mesure précise et statiquement fiable de la rugosité de bord.

2.1. Rappels de statistiques

La métrologie correspond à la science de la mesure au sens le plus large. La mesure est l'opération qui consiste à donner une valeur à une observation. Dans notre cas, il s'agit de mesurer la rugosité de bord de ligne. Cette opération commence par l'acquisition d'un profil auquel on applique un traitement mathématique pour en extraire différents paramètres. Suivant le profil que l'on choisit, les filtres que l'on applique et les aspérités auxquelles on s'intéresse, il est possible d'obtenir différents résultats : la moyenne des valeurs, ou la différence entre la valeur minimale et maximale, ou l'écart moyen par rapport à la moyenne des hauteurs,... la rugosité est donc un paramètre statistique que l'on peut interpréter de différente façon suivant le critère qui nous intéresse.

En statistiques, on est en général en présence d'un grand nombre de valeurs. Or, si l'intégralité de ces valeurs forme l'information, il n'est pas aisé de manipuler plusieurs centaines voire milliers de chiffres, ni d'en tirer des conclusions. Il est donc nécessaire de calculer des valeurs caractéristiques de l'échantillon afin d'analyser et d'interpréter les données. En métrologie, on calcule généralement deux valeurs : la **moyenne**, qui représentera la « valeur » de la mesure, et l'**écart type**, qui représente l'étalement des valeurs autour de la moyenne et permet d'estimer une valeur de la rugosité ou de l'erreur de mesure.

La **valeur moyenne** μ est exprimée mathématiquement comme la somme des valeurs mesurées x_i , divisée par le nombre de ces valeurs N , équation 1.

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

L'**écart type** σ est exprimé mathématiquement, équation 2, comme la racine carrée de la variance V , celle-ci mesurant la distribution des valeurs autour de la moyenne. La variance est définie comme étant la moyenne des carrés des différences entre les valeurs mesurées et la moyenne, équation 3.

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

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

En mesure physique, on utilise généralement une répartition gaussienne pour représenter un phénomène aléatoire. Si l'on réitère N fois une même mesure, pour lequel il existe une incertitude aléatoire (c'est-à-dire que les N résultats sont statistiquement indépendants), les mesures se répartissent, lorsque N croît, selon une courbe de Gauss, figure 2-1, caractérisé par sa valeur moyenne μ et son écart type σ , dont l'expression mathématique est la suivante, équation 4 :

$$n(x) = \frac{N}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad \text{Eq (4)}$$

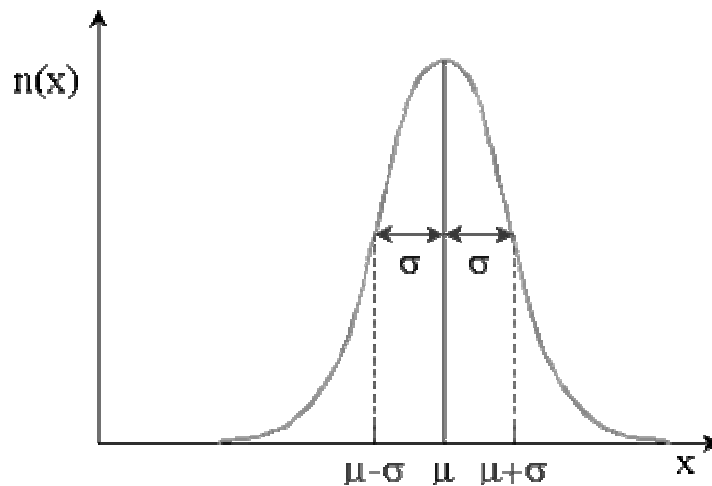
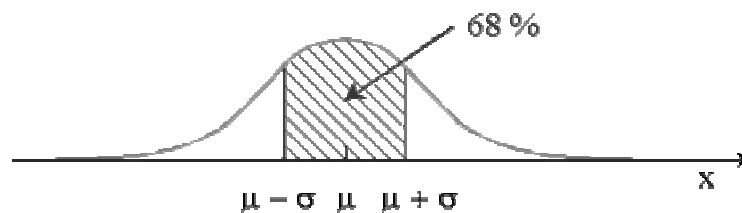


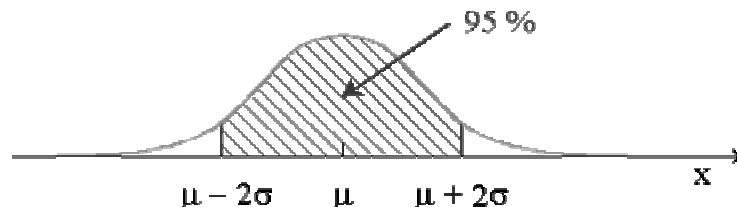
Figure 2-1 : Courbe de Gauss

Dans le cas d'une répartition gaussienne, l'écart type prend tout son sens, puisqu'il permet de donner un intervalle au résultat mesuré avec une certaine probabilité. Ceci signifie que si l'on fait une mesure, il existe une probabilité précise qu'elle figure dans un intervalle donné par l'écart type, figure 2-2.

a) 68% des valeurs se trouvent dans l'intervalle $[\mu - \sigma; \mu + \sigma]$



b) 95% des valeurs se trouvent dans l'intervalle $[\mu - 2\sigma; \mu + 2\sigma]$,



c) 99,7% des valeurs se trouvent dans l'intervalle $[\mu - 3\sigma; \mu + 3\sigma]$,

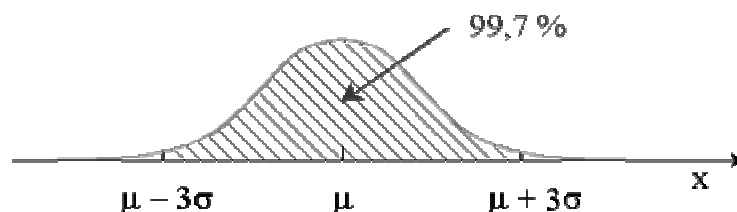


Figure 2-2 : Probabilité que la mesure figure dans un intervalle donnée par : a) 1σ , b) 2σ , c) 3σ

Pour une estimation de la rugosité de bord totale de la ligne, il est nécessaire de regrouper la majorité des valeurs de la dimension de la ligne (CD, pour Critical Dimension en anglais). L'écart type à 3σ qui représente 99,7% est donc généralement pris pour évaluer cette rugosité.

2.2. Définition de la rugosité de bord

La rugosité de bord de ligne est généralement définie par deux paramètres : le Line Edge Roughness (LER) et le Line Width Roughness (LWR), figure 2-3.

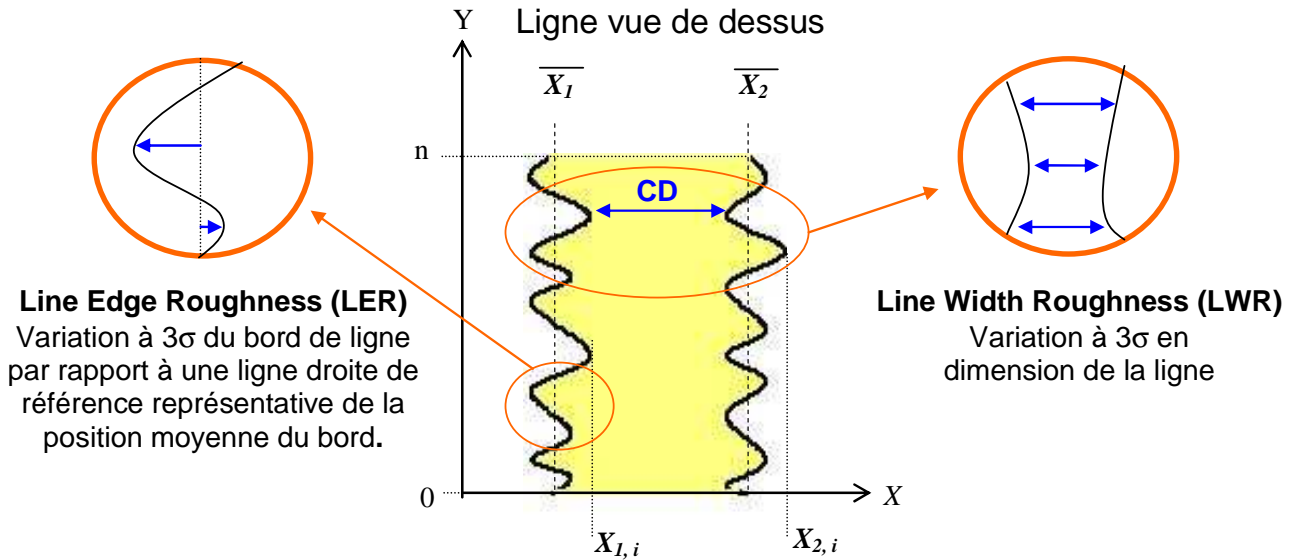


Figure 2-3 : Définition du Line Edge Roughness (LER) et du Line Width Roughness (LWR)

- ✓ Le **LWR** est exprimée mathématiquement comme l'écart type à 3σ de la dimension de la ligne, équation 5. Ce paramètre regroupe donc 99,7% des valeurs de CD de la ligne, ce qui représente une bonne estimation de la rugosité de bord totale de la ligne.

$$LWR = 3 \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (CD_i - \overline{CD})^2}{n}} \quad \text{Eq. (5)}$$

- ✓ Le **LER**, équivalent de LWR pour un seul bord, correspond à l'écart type à 3σ de la distance entre le bord de ligne et une ligne droite de référence représentative de la position moyenne du bord. Pour une ligne, on peut donc distinguer une valeur de LER à gauche, LER_L , équation 6, et une à droite, LER_R , équation 7.

$$LER_L = 3 \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (X_{1,i} - \bar{X}_1)^2}{n}} \quad \text{Eq. (6)}$$

$$LER_R = 3 \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (X_{2,i} - \bar{X}_2)^2}{n}} \quad \text{Eq. (7)}$$

Chapitre 2 : Métrologie de la rugosité de bord de ligne

Statistiquement, si on considère que les deux bords de ligne sont indépendants l'un de l'autre, le LWR est relié mathématiquement au LER par la formule $LER = \frac{LWR}{\sqrt{2}}$ [Bunday 04].

En effet, d'après la définition de LWR, équation 5,

$$LWR^2 = \frac{\sum_{i=0}^n [(X_{1,i} - X_{2,i}) - (\bar{X}_1 - \bar{X}_2)]^2}{n} = \frac{\sum_{i=0}^n [(X_{1,i} - \bar{X}_1) - (X_{2,i} - \bar{X}_2)]^2}{n} \quad \text{Eq. (8)}$$

$$= \frac{\sum_{i=0}^n (X_{1,i} - \bar{X}_1)^2}{n} + \frac{\sum_{i=0}^n (X_{2,i} - \bar{X}_2)^2}{n} - 2 \frac{\sum_{i=0}^n [(X_{1,i} - \bar{X}_1)(X_{2,i} - \bar{X}_2)]}{n}$$

On reconnaît ici les définitions du LER_L et LER_R . Par substitution, l'équation 8 devient

$$LWR^2 = LER_L^2 + LER_R^2 - 2 \frac{\sum_{i=0}^n [(X_{1,i} - \bar{X}_1)(X_{2,i} - \bar{X}_2)]}{n} \quad \text{Eq. (9)}$$

En statistique, la corrélation entre deux ou plusieurs variables aléatoires peut être mesurée par le calcul du coefficient de corrélation linéaire. Ce coefficient, noté c , est égal au quotient de leur covariance et du produit non nul de leurs écarts types, équation 10.

$$c = \frac{\sum_{i=0}^n [(X_{1,i} - \bar{X}_1)(X_{2,i} - \bar{X}_2)]}{\sqrt{\sum_{i=0}^n [(X_{1,i} - \bar{X}_1)^2 (X_{2,i} - \bar{X}_2)^2]}} \quad \text{Eq. (10)}$$

Dans le cas de deux variables totalement indépendantes l'une de l'autre, ce coefficient est nul. Or, dans notre cas, le troisième terme de l'équation 9 peut également s'écrire,

$$2 \frac{\sum_{i=0}^n [(X_{1,i} - \bar{X}_1)(X_{2,i} - \bar{X}_2)]}{n} = 2 \frac{\sum_{i=0}^n [(X_{1,i} - \bar{X}_1)(X_{2,i} - \bar{X}_2)]}{\sqrt{\sum_{i=0}^n [(X_{1,i} - \bar{X}_1)^2 (X_{2,i} - \bar{X}_2)^2]}} \frac{\sqrt{\sum_{i=0}^n [(X_{1,i} - \bar{X}_1)^2 (X_{2,i} - \bar{X}_2)^2]}}{n}$$

$$= 2 c LER_L LER_R \quad \text{Eq. (11)}$$

Ainsi,

$$LWR^2 = LER_L^2 + LER_R^2 - 2 c LER_L LER_R \quad \text{Eq. (12)}$$

Chapitre 2 : Métrologie de la rugosité de bord de ligne

En considérant les deux bords de la ligne comme indépendants, le coefficient de corrélation linéaire c , est nul. Nous obtenons ainsi $LWR^2 = LER_L^2 + LER_R^2$

En considérant que $LER = LER_L = LER_R$, on obtient alors $LWR = \sqrt{2} LER$.

Lors de différentes campagnes de mesures, cette relation mathématique entre le LER et le LWR a été constatée à plusieurs reprises. Il semble donc que les 2 bords de ligne sont indépendants l'un de l'autre. Cependant, il est possible que le LER du bord gauche et du bord droit soient différents, mais la précision sur la mesure de la rugosité de bord des équipements de métrologie aujourd'hui disponible, ne nous permet pas de pouvoir mesurer une telle différence de valeur. Actuellement, l'impact électrique de la rugosité de bord sur le fonctionnement du transistor est évalué par le LWR. Par conséquent, nous avons donc choisi de nous intéresser uniquement au LWR dans le cadre de nos études.

2.3. Les outils de mesures

Pour le nœud technologique de 45nm, les outils de métrologie doivent être capables d'assurer le contrôle dimensionnel des dispositifs fabriqués. Pour cela, il est nécessaire de mesurer avec précision la rugosité de bord de ligne. Par exemple, la précision des outils de métrologie pour la mesure de LWR doit être de 0.28nm en 2010 [ITRS 05]. Actuellement, trois techniques peuvent être potentiellement capables de la mesurer. Parmi celles-ci, on trouve deux outils déjà largement utilisés dans l'industrie des semi-conducteurs : la microscopie électronique à balayage (CD - SEM, pour Critical Dimension - Scanning Electron Microscope en anglais) [Nelson 99] et la scattérométrie [Petit 04, Boher 05]. Une troisième technique est très prometteuse, la microscopie à force atomique en trois dimensions (CD-AFM pour Critical Dimension - Atomic Force Microscopy, en anglais) [Martin 95, Orji 05, Foucher 04, Foucher 05, Foucher 06]. Cette partie est destinée à la description de ces outils de métrologie et plus particulièrement du CD-AFM, outil de référence métrologique que nous avons choisi pour effectuer nos mesures de rugosité de bord.

2.3.1. La microscopie électronique à balayage

Conçu en 1929, le Microscope Electronique à Balayage (MEB ou SEM pour Scanning Electron Microscope en anglais), est actuellement la technique d'imagerie la plus utilisée pour observer des structures de taille sub-micrométrique [Paqueton]. C'est un moyen rapide et efficace pour étudier la morphologie d'un échantillon puisqu'elle permet de mesurer la dimension des structures observées et l'épaisseur des différentes couches de l'échantillon.

Cette technique est basée sur l'interaction électrons – matière. Un faisceau d'électrons balaie la surface de l'échantillon à analyser qui, en réponse, réémet certaines particules, figure 2-4. La détection de ces différentes particules permet alors de reconstruire une image de la surface.

2.3.1.1. L'interaction électrons matière

L'interaction élastique du faisceau incident avec la surface réémet des électrons rétrodiffusés (d'énergie équivalente à celle des électrons incidents), caractéristiques de la composition chimique de l'échantillon. La détection de ces électrons rétrodiffusés permet de

Chapitre 2 : Métrologie de la rugosité de bord de ligne

créer une image par contraste chimique : un élément lourd apparaîtra plus brillant qu'un élément léger sur une image acquise avec les électrons rétrodiffusés.

L'interaction inélastique des électrons incidents et rétrodiffusés avec l'échantillon provoque, par ionisation, l'arrachement d'électrons faiblement énergétiques dits secondaires. Les électrons secondaires du fait de leur faible énergie proviennent d'une zone très proche de la surface (de l'ordre d'une dizaine de nm). Leur rendement d'émission est donc très sensible à l'inclinaison locale de la surface à observer. La détection de ces électrons permet ainsi de reconstruire une image de la topographie de la surface en variation de contraste. Cette technique permet aujourd'hui d'obtenir des résolutions latérales de l'ordre de 5nm pour les outils les plus performants.

Enfin, lorsqu'un atome est bombardé par un électron primaire, un électron d'une couche profonde peut être éjecté et l'atome entre dans un état excité. La désexcitation peut se produire de deux façons différentes : en émettant un photon X ou en émettant un électron Auger, qui sont tous deux caractéristiques de la nature chimique de l'atome. La détection des électrons Auger qui possèdent une très faible énergie, permet d'obtenir des informations sur la composition chimique de l'échantillon et plus particulièrement sur le type de liaison chimique. L'analyse des rayons X réémis permet, quant à elle, d'obtenir des informations sur la nature chimique de l'atome.

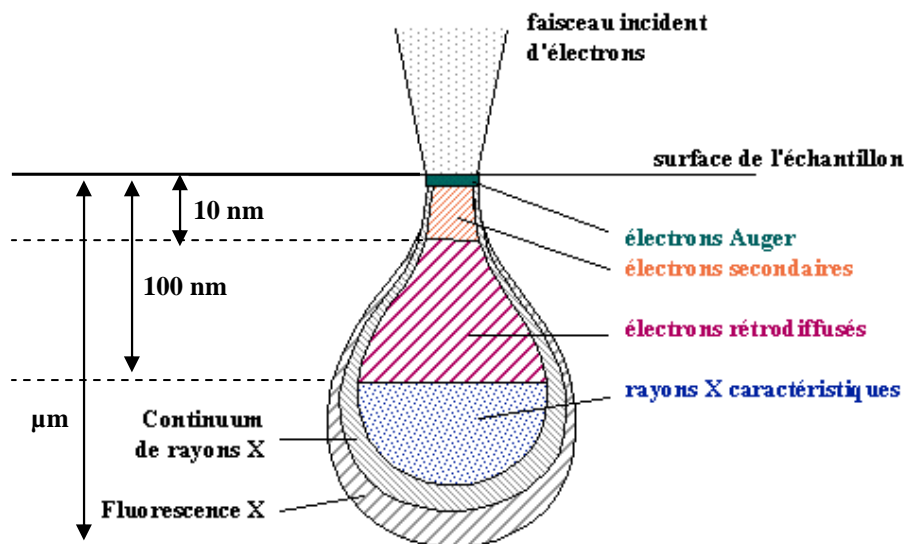


Figure 2-4 : Poire de diffusion des particules réémises d'un échantillon, sous l'effet d'un faisceau d'électrons

2.3.1.2. Les types de microscope électronique à balayage

Dans le domaine de la microélectronique, deux types de microscope électronique à balayage sont utilisés :

- ✓ Le **X-SEM** pour lequel les observations sont réalisées en vue de coupe, après clivage de la plaquette. Cette technique, basée sur la détection des électrons secondaires, permet d'imager la morphologie des profils de ligne sous différents angles et d'obtenir ainsi un aperçu qualitatif de la rugosité de bord, comme l'illustre la photo de la figure 2-5. Cependant, il n'est pas possible de quantifier la rugosité de bord avec cette technique.

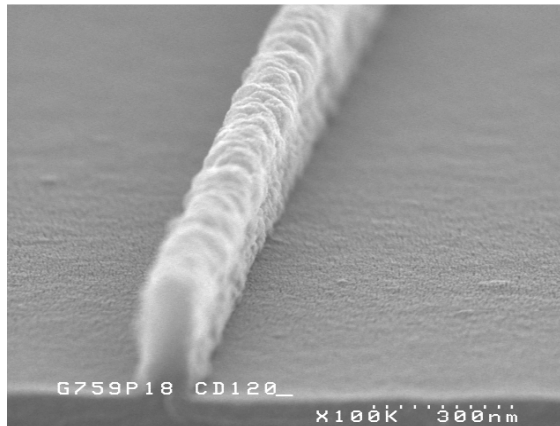


Figure 2-5 : Image MEB en vue de coupe d'une ligne de résine photosensible

- ✓ Le **CD-SEM** (pour Critical Dimension – Scanning Electron Microscope en anglais) pour lequel les observations sont réalisées en vue de dessus, figure 2-6. Cet outil est exclusivement utilisé dans l'industrie de la microélectronique, pour effectuer du contrôle dimensionnel, c'est-à-dire, une vérification de la largeur de la ligne fabriquée. Cette technique utilise la détection des électrons secondaires, dont le signal est plus intense sur une surface inclinée (bord de ligne) que plane (fond et haut de la structure). A l'aide d'un algorithme d'analyse de contraste de l'image, il est alors possible de localiser les bords de ligne qui sont généralement placés à 50% de l'intensité maximal du signal, mais d'autres protocoles de localisation du bord de ligne existent [Jones 03, Gelenbe 04]. Par étalonnage en dimension de l'appareil, il est alors possible de déterminer la dimension de la ligne et ainsi vérifier qu'elle correspond à la dimension souhaitée [Villarubia 04]. A partir de la mesure de la dimension à plusieurs endroits sur la ligne, cette technique permet également d'évaluer la rugosité de bord [Constantoudis 03, Patsis 03, Villarubia 04, Leunissen 04, Yamaguchi 04].

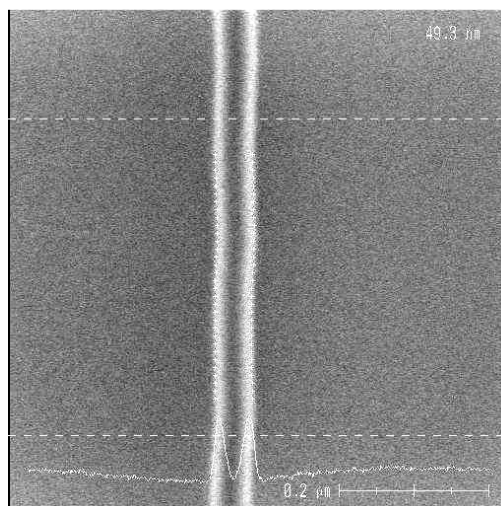


Figure 2-6 : Image CD-SEM d'une ligne de résine photosensible sur silicium avec le signal d'intensité, issu de l'analyse de contraste, qui permet de localiser les bords de la ligne.

2.3.1.3. Limitations pour la mesure de la rugosité de bord

Ces méthodes de mesure de LWR, basées sur une analyse de contraste de l'image acquise par CD-SEM, présentent néanmoins certaines limitations :

- ✓ La résolution spatiale des CD-SEM est proche des valeurs de LWR requises pour les transistors de futures générations (LWR en lithographie doit être inférieure à 3 nm en 2008 [ITRS 05]). Par conséquent, à ces dimensions, le bord de la ligne apparaît flou, il est alors difficile de déterminer avec précision la position absolue du bord de ligne.
- ✓ Le CD-SEM fournit des images uniquement en 2 dimensions, ce qui ne donne aucune information sur le profil de la structure comme le requiert l'industrie des semi-conducteurs. Les informations dimensionnelles à différentes hauteurs de la structure ne peuvent donc pas être obtenues. En outre, les informations dimensionnelles données par les algorithmes d'analyse peuvent être altérées par le profil des structures [Gelenbe 04].
- ✓ Le faisceau d'électrons endommage les profils de résine photosensible après lithographie. Lors de l'acquisition de l'image un phénomène de réduction en dimension de la résine est observé [Wu 01] ce qui fausse la mesure de la dimension réelle de la ligne et donc de la rugosité de bord.

Ces limitations du CD-SEM montrent clairement les difficultés de cet équipement à effectuer une mesure précise de la rugosité de bord de ligne répondant aux exigences requises de l'industrie de la microélectronique pour les transistors de futures générations. Par conséquent, le CD-SEM a seulement été utilisé dans le cadre de cette thèse, pour confirmer certains résultats sur l'évolution de la rugosité de bord. Les CD-SEM utilisés sont :

- ✓ Le *VERASEM* de la société *Applied Materials* avec le logiciel *Summit*, développer par *euvl technology* pour le calcul de LWR.
- ✓ le *YOSEMITE* de la société *Soluris* avec ces propres algorithmes de calcul de LWR.

2.3.2. La scattérométrie

La scattérométrie est une technique de métrologie déjà utilisée dans certaines lignes de production pour le suivi de procédé. Elle permet le contrôle dimensionnel des procédés par repérage d'une dérive de la signature par rapport à celle d'un procédé standard [Raymond 01]. La scattérométrie est basée sur la diffraction de la lumière par un réseau de ligne. La diffraction d'un rayonnement incident sur un réseau de ligne permet d'acquérir un spectre de diffraction expérimental caractéristique du profil et de la période des motifs constituant le réseau. Ce signal est la signature optique du réseau. Par rapprochement de ce spectre expérimental à un spectre théorique obtenu par simulation, il est possible d'en déduire une bonne approximation de la longueur caractéristique du réseau, figure 2-7.

La scattérométrie repose sur l'équation de diffraction de la lumière par un réseau. Pour une lumière de longueur d'onde λ incidente sous un angle θ_i par rapport à la normale à la surface, la direction θ_m du m-ième ordre diffracté par un réseau de période Λ dans l'air (indice optique =1) est donnée par $\sin \theta_m = \sin \theta_i + m \frac{\lambda}{\Lambda}$ [Niu 01].

Historiquement, les premières techniques de scattérométrie furent développées en lumière monochromatique. L'intensité de l'ordre spéculaire (ordre de diffraction 0) était mesurée en fonction de l'angle d'incidence ou de l'intensité des différents ordres de diffraction mesurée à angle d'incidence fixe en bloquant l'ordre spéculaire. La complexité mécanique du système et la diminution de la période des réseaux, résultant en une diminution du nombre d'ordres

Chapitre 2 : Métrologie de la rugosité de bord de ligne

diffractions, ont provoqué l'avènement d'autres techniques basées sur la mesure des ordres de diffraction sur une plage étendue de longueur d'onde.

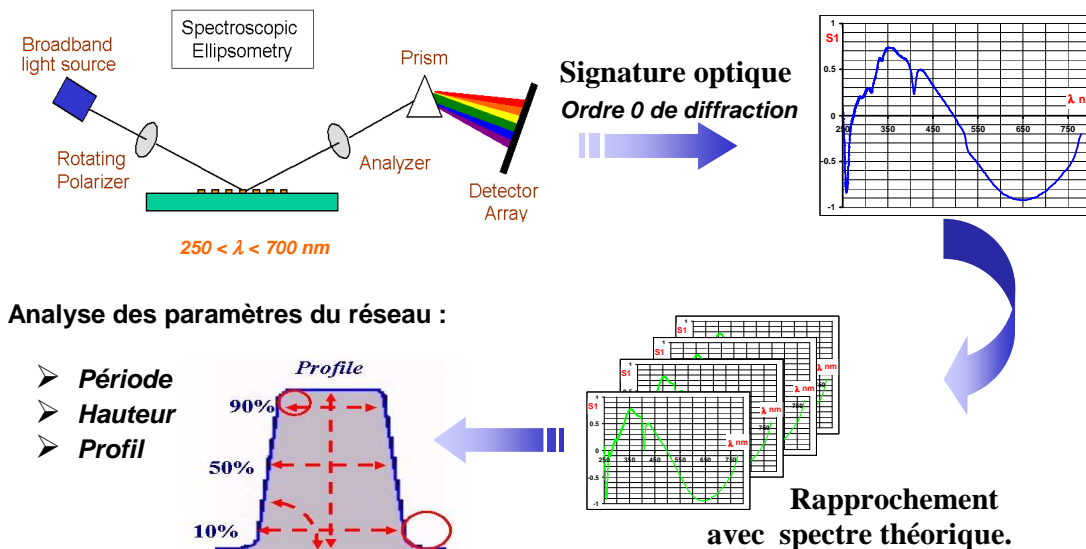


Figure 2-7 : Principe de fonctionnement de la scattérométrie

Cette technique de mesure de réseau de diffraction en deux dimensions ne permet donc pas de caractériser les flancs des structures pour remonter à la rugosité de bord. Une technique en trois dimensions, la photo-goniométrie, basée sur la mesure des ordres diffractés et de la lumière diffusée dans toutes les directions autour du réseau, est actuellement en cours de développement pour permettre cette mesure [Boher 05, Petit 04]. Cependant, cette technique requiert des puissances de calculs colossales et se limite à la mesure de réseau. Cette technique n'est aujourd'hui pas assez mature pour être prédictive, c'est à dire extraire le profil des lignes sans connaissances préalables et précises de sa forme. Pour ces raisons il est difficile actuellement de mesurer la rugosité de bord à l'aide de cette technique.

2.3.3. La microscopie à force atomique

Dans cette partie, la microscopie à force atomique standard est décrite sous ses aspects théoriques et pratiques. Dans le but d'assurer le contrôle dimensionnel des structures avec cette technique, une évolution de l'AFM standard a été développée : le CD-AFM. Nous exposerons dans cette section, le principe de cette technique, aujourd'hui utilisé comme outil de référence métrologique pour la calibration des CD-SEM [Dixson 02, Dixson 03].

2.3.3.1. Principe de fonctionnement

Développé en 1986 par G. Binnig et al [Binnig 86], le microscope à force atomique est né des considérations suivantes : les interactions entre une pointe et une surface donnent lieu, selon les distances pointe - surface, à des forces répulsives ou attractives agissant sur la pointe. Ces forces d'interaction provoquent une déflexion verticale du levier qui supporte la pointe dont la mesure, couplée à un balayage de la surface, permet d'obtenir des images dans l'espace direct de la surface analysée.

Chapitre 2 : Métrologie de la rugosité de bord de ligne

Un microscope à force atomique standard (AFM, pour Atomic Force Microscope en anglais), dont le principe général de fonctionnement est schématisé sur la figure 2-8, est constitué :

- ✓ d'une pointe fine de forme pyramidale supporté par un levier, ou cantilever, que l'on nomme sonde AFM. C'est l'élément central de tout AFM. Par l'intermédiaire d'un système piézoélectrique la sonde AFM peut être déplacée sur l'échantillon suivant les trois directions de l'espace. La pointe peut également être mise en régime d'oscillation forcée (à une fréquence proche de la fréquence de résonance du levier) par excitation du levier grâce à un système piézoélectrique.
- ✓ d'un détecteur optique de déflexion du levier constitué d'un laser et d'un photodétecteur. La détection par un système de photodiodes, de la réflexion d'un faisceau laser focalisé sur la face arrière du levier permet de suivre les mouvements du faisceau laser associés aux déflexions du levier.
- ✓ Sur certains outils, un système de piézoélectrique placé sur le support d'échantillon permet le déplacement de la surface à observer selon les trois directions de l'espace.

La mesure de la déflexion verticale du levier fournit le signal de force $F(x,y)$. Lors du balayage de l'échantillon, une boucle de régulation électronique maintient le levier telle que la force reste constante (amplitude de déviation du levier constante) ou que dF/dz soit constant (amplitude de l'oscillation du levier constante ou le déphasage entre excitation et oscillation du levier constant). L'AFM mesure donc toujours la force d'interaction entre la pointe et la surface et non directement la topographie. Il est donc indispensable de discuter des forces d'interaction mises en jeu lors de l'approche de la pointe vers la surface pour bien comprendre le principe de la mesure de topographie par AFM.

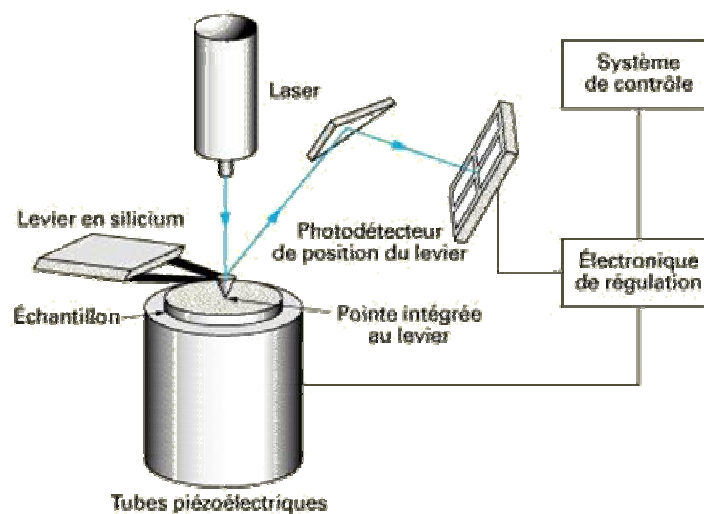


Figure 2-8 : Principe générale d'un microscope à force atomique standard

2.3.3.2. Forces d'interaction

La force totale entre une pointe et un échantillon suivant la distance qui les sépare est composée principalement de trois contributions, avec une allure typique donnée par le potentiel de Lennard-Jones, figure 2-9. La force est attractive à longue distance, puis répulsive quand on touche la surface. Les atomes ont souvent tendance à s'attirer ; lorsque l'affinité des atomes est grande, ils se lient pour former une molécule ou un cristal, mais dans la plupart des cas, cette attraction est très faible : il s'agit de la force de Van der Waals qui agit à longue

Chapitre 2 : Métrologie de la rugosité de bord de ligne

distance (environ 3nm) et qui est typiquement de quelques nN. À l'inverse, lorsqu'ils sont très proches, les atomes se repoussent du fait de la soumission des électrons du cortège électronique au principe d'exclusion de Pauli. L'intensité de cette force répulsive, typiquement de 100nN, augmente très rapidement avec la diminution de la distance pointe-surface. Il y a donc une sorte de « distance d'équilibre » : si les atomes s'éloignent, une force les rappelle, et s'ils se rapprochent, une force les repousse.

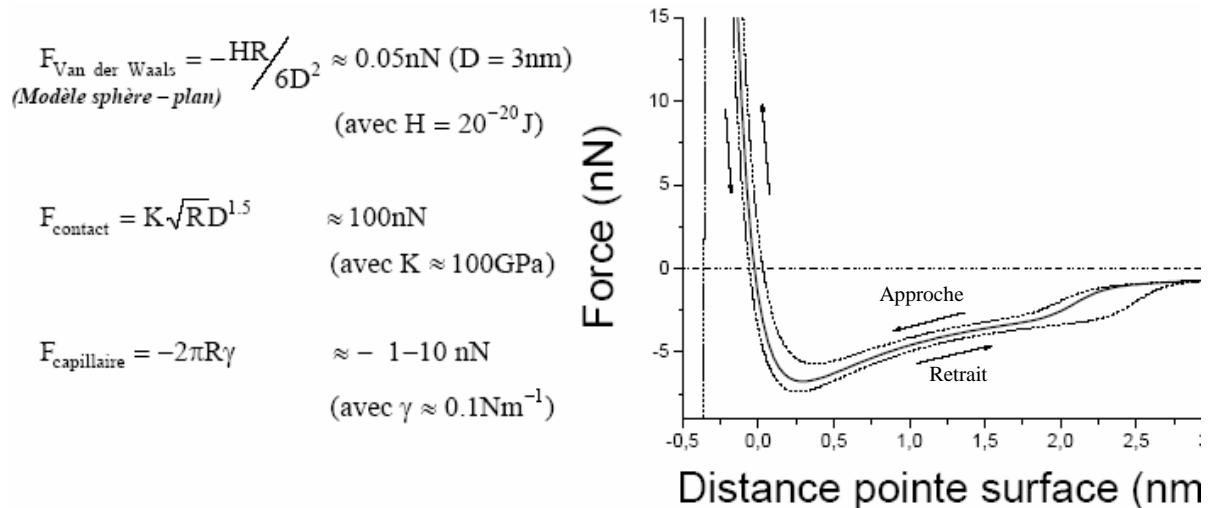


Figure 2-9 : Interaction pointe-surface donnée par le potentiel de Lennard-Jones

Il y a également les forces d'adhésion liées aux énergies de surface de la pointe et de la surface. Parmi ces forces, citons la force capillaire entre la fine pellicule d'eau généralement adsorbée sur le substrat et la pointe.

Sur la figure 2-9, nous remarquons que lors d'une procédure d'approche retrait la courbe de force (trait pointillé) présente une hystérésis entre l'aller et le retour, caractéristique d'une dissipation d'énergie. Les forces de frottements viscoélastiques ou forces de frictions, la déformation plastique du substrat et la force capillaire sont à l'origine de cette dissipation. L'aire entre l'aller et le retour est proportionnelle à l'énergie dissipée [Cleveland 98].

2.3.3.3. Mode de fonctionnement

Il existe trois modes d'utilisation de l'AFM, qui correspondent à des domaines de fonctionnement différents et qui ne mettent pas en jeu les mêmes interactions. Il y a le mode contact, le mode non-contact, et enfin le mode contact intermittent. D'après le potentiel de Lennard-Jones, on peut délimiter les domaines d'interaction des différents modes de fonctionnement de l'AFM, figure 2-10. La composante attractive à longue portée correspond au mode non contact, la composante répulsive à très courte portée correspond au mode contact et le régime transitoire entre les deux, au mode contact intermittent.

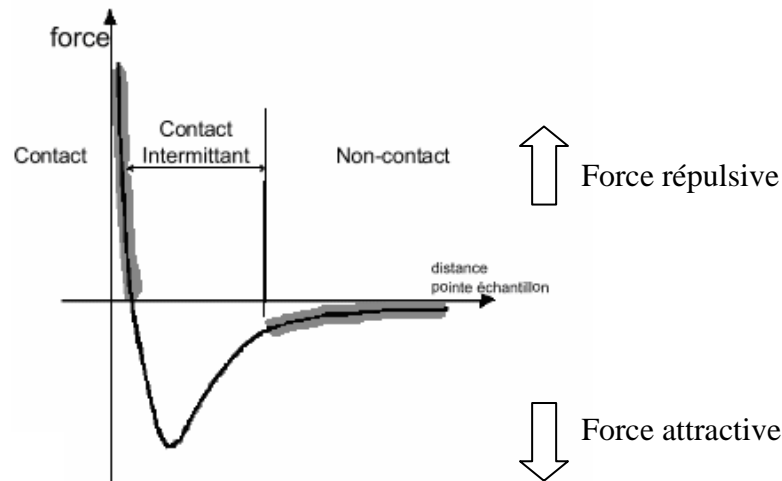


Figure 2-10 : Domaine d'interaction des différents modes de fonctionnement de l'AFM à l'aide d'un potentiel de Lennard-Jones

✓ Mode contact

Le mode contact fonctionne exclusivement dans le domaine répulsif des forces de contact. Dans ce mode, la pointe est en permanence en contact avec la surface. Au cours du balayage de la surface, le levier se déformant élastiquement, les déflexions sont directement reliées aux variations de hauteur de la position de la pointe. La déflexion du levier est maintenue constante grâce à l'ajustement de la position en hauteur de l'échantillon ou de la sonde AFM. La déflexion verticale du levier est donc utilisée comme valeur de consigne pour la régulation. Les déplacements en z de l'échantillon ou de la sonde AFM sont alors enregistrés en chaque couple de point (x, y) ce qui permet de reconstruire la topographie de la surface observée.

✓ Mode non contact

L'idée est de travailler loin de la surface sans la toucher et d'utiliser les forces attractives. Pour détecter la surface sans toucher, on utilise les propriétés mécaniques de l'oscillateur levier-pointe. L'ensemble levier-pointe est excité à une fréquence proche de sa fréquence propre de résonance (typiquement de l'ordre de la centaine de kHz) à proximité de la surface. Les propriétés de l'oscillateur vont être modifiées par le gradient de la force d'interaction pointe-surface qui provoque un changement de l'amplitude, de la phase et /ou un décalage en fréquence de l'oscillation. La régulation s'effectue sur la distance pointe-surface afin de maintenir une amplitude d'oscillation constante. Difficile à gérer, il est très peu utilisé en pratique, parce que ces forces sont faibles, et nécessitent un environnement à faible bruit. Par ailleurs, ce mode est limité aux surfaces inertes. En effet, en présence de surface réactive, des liaisons chimiques peuvent se former entre la pointe et l'échantillon. Cet effet peut faire apparaître des forces de friction qui peuvent mener à un endommagement de la surface et de la pointe ou encore des distorsions de l'image.

✓ Mode contact intermittent ou « tapping »

Le mode contact intermittent, de loin le plus utilisé, consiste à venir taper la surface par intermittence. Ce mode ressemble au mode non contact, mais l'amplitude d'oscillation de la pointe (de 20 à 100nm) est telle que la pointe entre parfois en contact avec la surface. La majorité du temps la pointe n'est pas en contact avec la surface et les interactions pointes surfaces sont faibles. Quand la pointe entre en contact avec la surface (force répulsive), l'amplitude d'oscillation décroît du fait de la perte d'énergie due à l'impact avec la surface. L'écart en amplitude est alors corrigé par l'électronique de régulation qui déplace verticalement l'échantillon ou la sonde AFM afin de retrouver l'amplitude de consigne. Au cours du balayage de l'échantillon, ce mode, généralement utilisé à une fréquence d'oscillation constante, enregistre les écarts d'amplitude par rapport à l'amplitude de consigne permettant ainsi d'imager la topographie de la surface. La force moyenne exercée est de l'ordre de 10pN (environ 1000 fois plus faible qu'en mode contact) ce qui permet d'imager des échantillons fragiles.

Finalement, la microscopie à force atomique permet de mesurer la topographie d'une surface avec une résolution atomique [Albrecht 87, Rugar 90, Tortonesi 92]. Elle permet également de par la multitude des interactions mesurables, l'étude des propriétés mécaniques, magnétique, électrostatique et tribologique sur une très large gamme de matériaux. Dans certains cas, il est également possible d'effectuer de la nano lithographie ou de la nano manipulation par microscopie à force atomique.

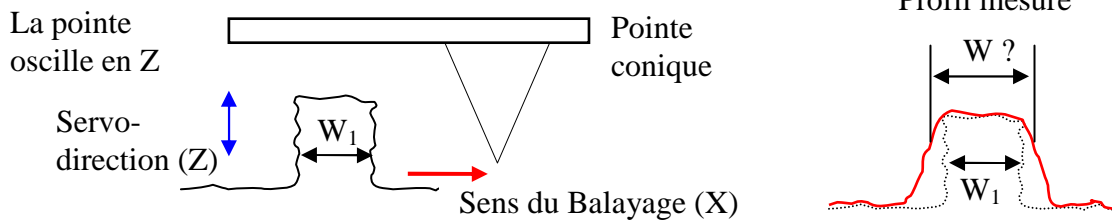
La capacité de cette technique à atteindre une résolution atomique a naturellement amené l'AFM à être utilisé en métrologie [Griffith 93, Nagase 96]. Cependant la forme conique de la pointe imposait de nombreuses restrictions quand aux structures pouvant être mesurées. Pour surmonter cet inconvénient majeur, le CD-AFM ou AFM en 3 dimensions a été développé.

2.3.3.4. Le microscope à force atomique en 3 Dimensions

La particularité de ce microscope à force atomique se trouve dans la forme évasée de la pointe qui oscille verticalement (en Z) couplé à un asservissement de la direction de balayage en X et Z. Ces spécificités permettent ainsi de scanner des structures avec des surfaces verticales, telle qu'une grille de transistor, et d'en déduire ces dimensions, comme le montre la figure 2-11 [Martin 94].

Ce microscope à force atomique ne fonctionne pas suivant l'un des trois modes d'utilisation d'un AFM standard. Son mode de fonctionnement, appelé mode CD, est spécifique à cet outil. Il consiste à venir taper la surface par intermittence aussi bien sur les parties verticales qu'horizontales. Comme pour le mode contact intermittent, l'asservissement s'effectue suivant l'amplitude d'oscillation de la pointe en Z. La différence se trouve dans la direction de rétroaction et de balayage qui ne s'effectue plus uniquement en Z mais en X et Z. Pour cela, entre chaque point de mesure, la pente locale de la structure est calculée grâce à la position du point (ou de quelques points) précédent. Ce calcul permet de déplacer la sonde AFM perpendiculairement à la pente afin de retrouver l'amplitude de consigne, et d'indiquer la direction de balayage qui doit être parallèle à cette pente pour l'acquisition du prochain point de mesure. Contrairement au mode contact intermittent, où la vitesse de balayage de la surface est constante et la rétroaction est effectuée en temps réel, en mode CD, ceci se passe en plusieurs étapes, comme l'illustre le schéma de la figure 2-12.

a) AFM standard - pointe conique



b) CD-AFM - pointe évasée

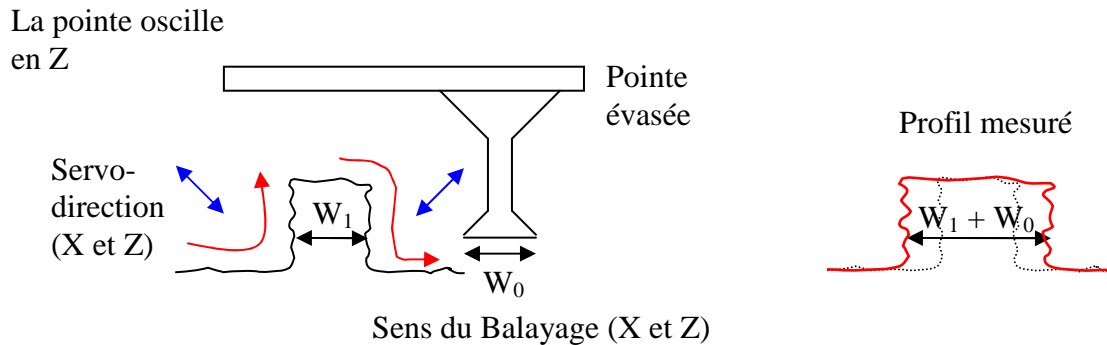


Figure 2-11 : a) limitation de l'AFM standard : la pointe conique ne peut suivre le flanc de la structure ce qui dégrade la mesure de la dimension latérale et de l'angle des flancs. b) le CD-AFM avec sa pointe évasée permet de venir scanner les flancs des motifs.

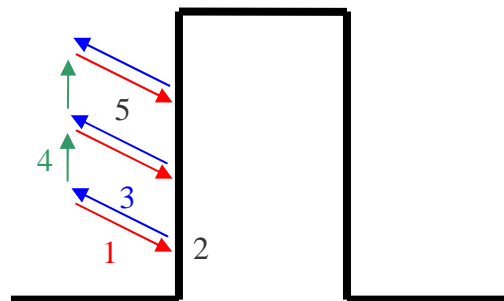


Figure 2-12 : Schéma du principe de mesure en mode CD

1. Rapprochement de la pointe oscillante vers la surface jusqu'à une diminution donnée de l'amplitude d'oscillation de la pointe afin de prendre la position du point de mesure.
2. Calcul de la pente locale à partir de la position du point (ou de quelques points) de mesure précédent.
3. Rétraction de la sonde AFM perpendiculairement à la pente locale afin de retrouver l'amplitude de consigne de la pointe.
4. Déplacement de la sonde AFM parallèlement à la pente locale d'un pas défini par l'utilisateur.
5. Rapprochement de la pointe oscillante perpendiculairement à la pente locale jusqu'à une diminution donnée de l'amplitude d'oscillation de la pointe afin de prendre la position du point de mesure. Puis, reprise du cycle de mesure

Chapitre 2 : Métrologie de la rugosité de bord de ligne

Il est à noter que sur les parties verticales (flancs des structures) l'oscillation de la pointe est parallèle à la surface. Plusieurs groupes de recherches ont montré qu'une surface peut être imagée quand la pointe oscille parallèlement à la surface à analyser [Denk 91, Yang 92]. Cet effet d'amortissement de l'amplitude d'oscillation de la pointe à l'approche d'une surface parallèle à celle-ci, est attribué aux forces de friction dissipatives. Dans le cas du CD-AFM, lors de l'approche de la pointe vers une surface verticale, la pointe « saute au contact » quand les forces adhésives deviennent supérieures à la force de rappel latérale du levier. Le point de mesure est alors pris pendant ce « saut au contact ». Dès lors la pointe adhère au flanc de la structure avec une force d'environ 10nN. L'excitation de la pointe qui est parallèle à la surface ne permet pas de décoller la pointe. Lors de la rétroaction de la pointe, la pointe reste donc collée un petit laps de temps sur la surface. Ce problème d'adhésion associé aux forces de friction parallèles à la surface peut provoquer un endommagement de la surface et de la pointe (usure des pointes, prise de particules). Il convient donc d'éviter ou de diminuer au maximum ce temps de collage. Pour cela, il est possible d'ajouter à l'excitation de la pointe en Z, une oscillation en X (perpendiculaire aux surfaces verticales) à 2 kHz avec une amplitude pic à pic typiquement de 5nm. Cette oscillation en X est nommée « dither amplitude ». Cependant, cette amplitude d'oscillation constante en X n'est pas assez importante pour décoller des pointes dont la raideur latérale est inférieure à 2N/m. Pour palier à ce problème, un nouveau système de contrôle, nommé FDTA (pour Fast Dither Tube Actuation en anglais) a été développé. Il permet d'activer une impulsion de la pointe en X avec une amplitude de 30nm uniquement quand la pointe adhère au flanc des structures. Cependant, dans le cadre de cette thèse ce nouveau système n'a pas été expérimenté.

Finalement, par balayage de la surface, cette technique permet de reconstruire le profil d'une structure en trois dimensions et d'obtenir une mesure précise de la hauteur, du CD, de l'angle et de la rugosité de bord des structures, figure 2-13. Néanmoins, la mesure obtenue est le produit de convolution entre la forme de la ligne et celle de la pointe. Dans le but d'obtenir le profil réel de la structure, il est donc nécessaire de connaître au préalable la forme exacte de la pointe.

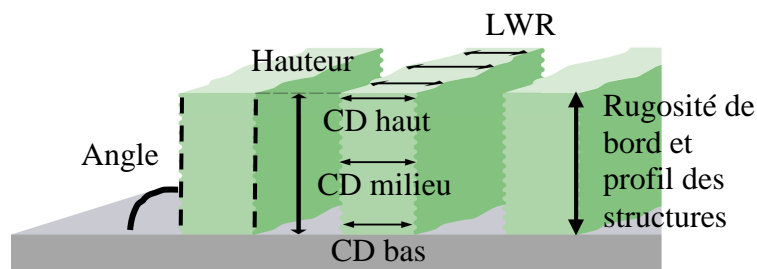


Figure 2-13 : Le CD-AFM fournit la mesure de paramètres clé de la forme des structures : la hauteur, le CD, l'angle et le LWR.

Finalement, cette méthode non destructive peut être utilisée sur une très large gamme de matériaux et n'est pas biaisée par la forme des structures. Pour ces raisons, le CD-AFM est aujourd'hui utilisé comme outil de référence métrologique pour l'étalonnage des autres équipements de métrologie [Dixson 02, Dixson 03].

2.3.4. Conclusion

Les outils les plus largement utilisés actuellement dans l'industrie des semi-conducteurs, le CD-SEM et la scattérométrie, présentent certaines limitations pour une mesure de la

rugosité de bord de ligne répondant aux exigences requises pour les transistors de futures générations. En effet, ils ne sont pas optimisés pour mesurer des structures complexes en trois dimensions avec des surfaces verticales, et leur résolution spatiale est proche des valeurs de LWR requises. (LWR en lithographie doit être égale à 3 nm en 2008 [ITRS 05]). L'AFM, avec sa résolution spatiale approchant l'échelle atomique [Albrecht 87, Rugar 90, Tortonese 92], semble être la seule technique capable d'atteindre ces exigences. La technique du CD-AFM, qui permet de venir directement mesurer les flancs verticaux afin d'obtenir une mesure tri-dimensionnelle précise des structures semble donc très prometteuse pour une mesure de la rugosité de bord de ligne. Pour ces raisons, nous avons décidé d'utiliser et de développer cet outil.

2.4. Le Dimension X3D de chez Veeco Instruments

Le CD-AFM de notre laboratoire est un appareil commercial de chez *Veeco instruments*, nommé, **dimension X3D**. Il est issu d'un brevet d'*IBM* en 1995 et exploité depuis 2003 par la société *Veeco instruments*. Cet outil, installé dans les locaux du LETI en début d'année 2004, est le premier équipement de ce type installé en Europe. Dans un premier temps nous passerons en revue ses principales caractéristiques techniques. Ensuite, nous présenterons le protocole de mesure et les différents tests de performances qui nous ont permis de mettre en évidence certaines limitations.

2.4.1. Principales caractéristiques

Le Dimension X3D est un microscope à force atomique en trois dimensions automatique conçu pour un environnement de production industrielle. Une photo de l'ensemble du système est présentée sur la figure 2-14.

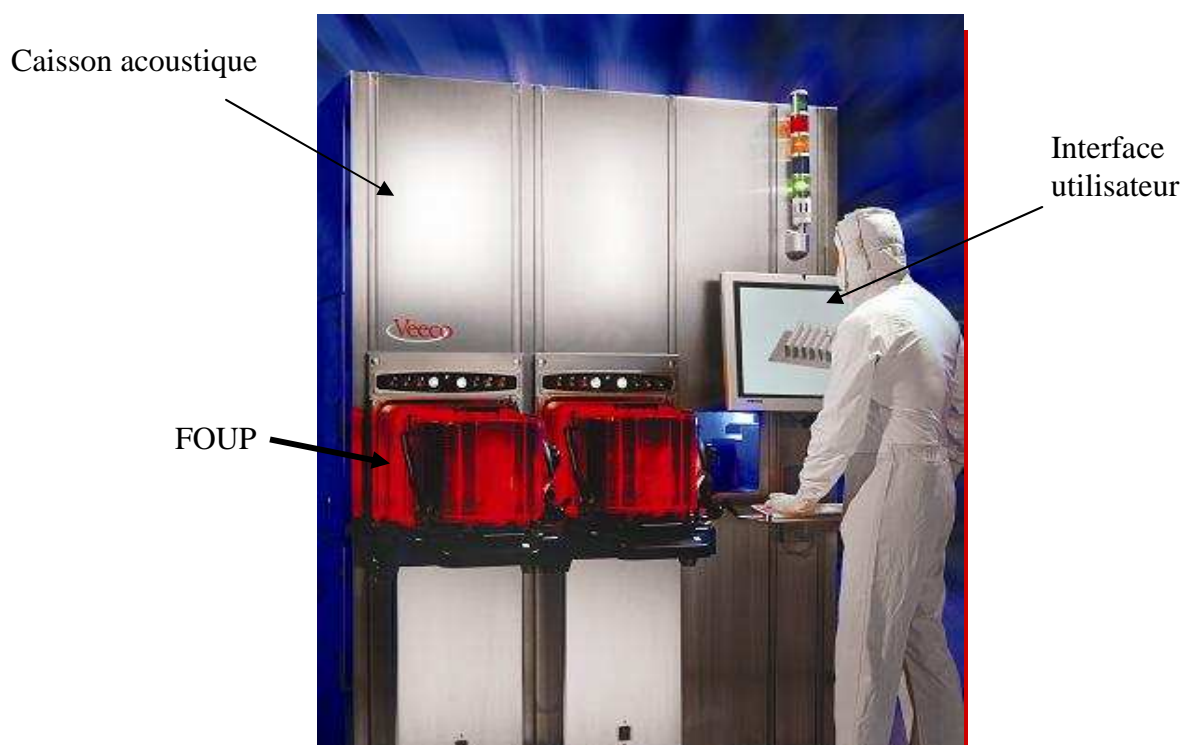


Figure 2-14 : Photographie complète du Dimension X3D.

2.4.1.1. La tête AFM

L'élément central de cet équipement de métrologie est la tête AFM qui est constituée de l'ensemble pointe-levier avec les systèmes piézoélectriques associés (sonde AFM) et du système de détection optique de déflexion du levier, comme schématisé sur la figure 2-15.

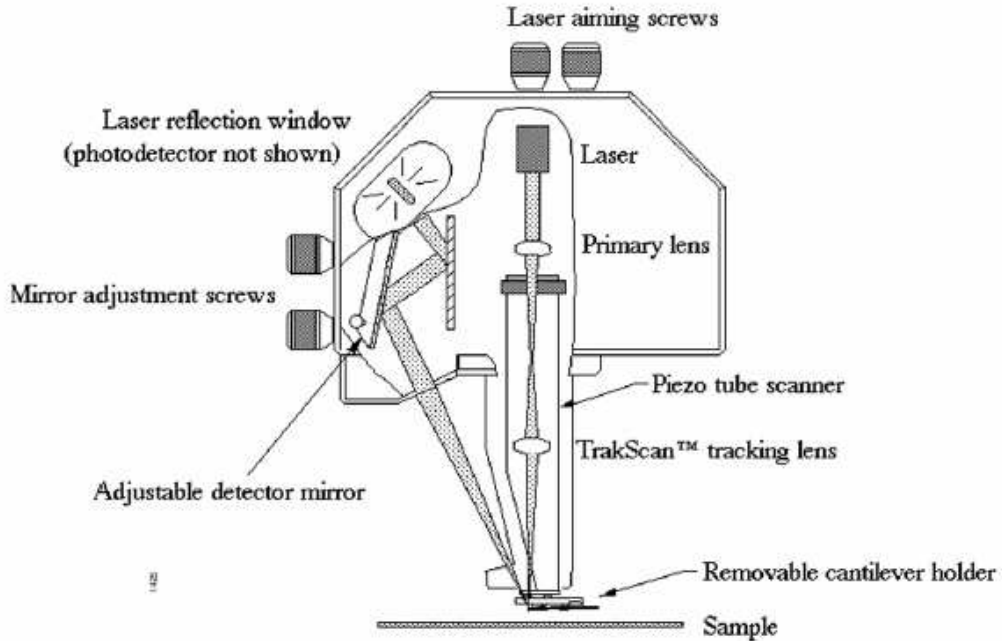


Figure 2-15 : Schéma de la tête AFM du Dimension X3D.

La sonde AFM, schématisée figure 2-16, est composée de deux systèmes piézoélectriques qui permettent, pour l'un, le balayage de l'échantillon, nommé dither tube, et pour l'autre, l'oscillation du levier à sa fréquence propre de résonance. Le dither tube est un tube regroupant trois piézoélectriques qui permet le balayage de l'échantillon dans les trois directions de l'espace. En X et Y, l'intervalle maximale de balayage est de $40\mu\text{m}$ et en Z l'intervalle maximale de $5\mu\text{m}$. Pour l'oscillation de la pointe, le piézoélectrique permet de faire osciller la pointe en Z avec une amplitude comprise entre 20 et 100nm.

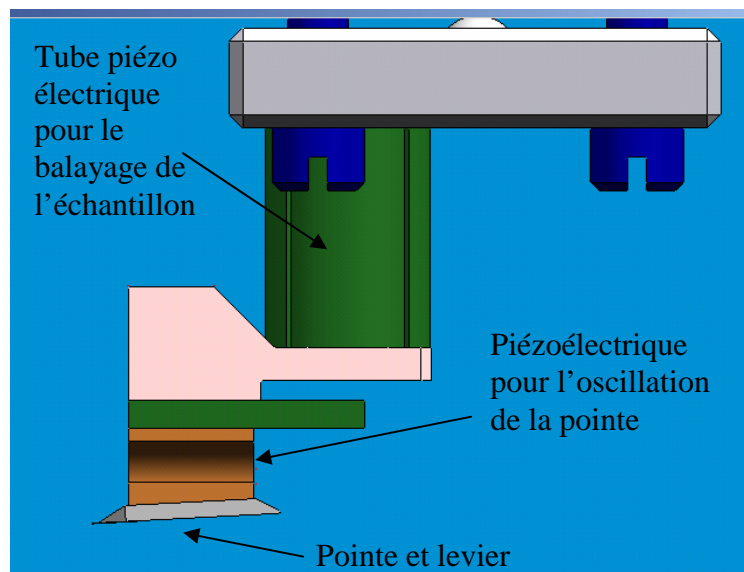


Figure 2-16 : Schéma de la sonde AFM avec ses systèmes de piézoélectriques

Chapitre 2 : Métrologie de la rugosité de bord de ligne

2.4.1.2. Les équipements associés

La tête AFM est placée à l'intérieur d'un caisson acoustique, lui-même placé sur une table à coussin d'air, qui permet de réduire le bruit du signal mesuré.

Pour réduire le nombre de particules à l'intérieur de l'équipement, le dimension X3D est équipé d'un double système de chargement de plaque 300mm par FOUP (pour Front Opening Unified Pod en anglais) et d'un système de ventilation et de filtration de l'air afin de maintenir un flux d'air et une pression constante dans le caisson acoustique.

L'X3D est également muni d'un système automatisé de manipulation de plaques 200mm et 300mm avec un plateau de mesure qui permet de recevoir les deux diamètres de plaques. Il est également possible de mesurer des petits échantillons en fixant, à l'aide de ruban adhésif, un échantillon sur une plaque de 200mm préalablement marquée de ligne d'alignement.

Pour la visualisation des structures de l'échantillon et de la pointe, l'X3D est muni d'un système optique à deux caméras fournissant trois grossissements différents, figure 2-17. Le champ de vision du faible grossissement est de 5mm, pour le fort grossissement, deux champs de vision sont disponibles, 500 μ m et 100 μ m.

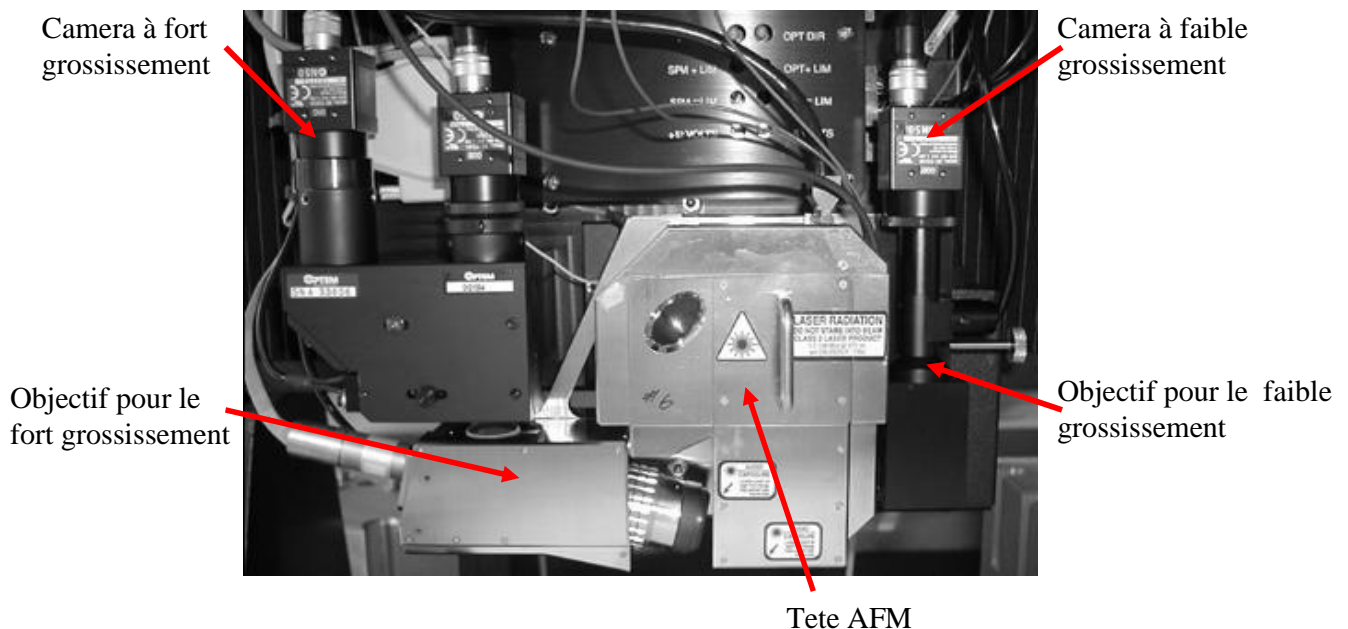


Figure 2-17 : Photographie de la tête AFM de Dimension X3D

Pour le chargement des pointes de mesures sur la tête AFM, l'X3D est équipé de quatre cassettes pouvant chacune accueillir 25 pointes. Un système de reconnaissance d'image associé à un système adapté de vide permet de monter automatiquement une pointe d'une cassette sur la tête AFM. En revanche, le chargement des pointes dans les cassettes se fait manuellement et il est possible de casser des pointes de mesure lors de cette étape.

2.4.1.3. Les pointes de mesures

Les pointes de mesures sont des pointes en silicium de forme évasée, comme montrées sur l'image MEB de la figure 2-18. Les caractéristiques principales d'une telle pointe sont définies sur le schéma de la figure 2-19.

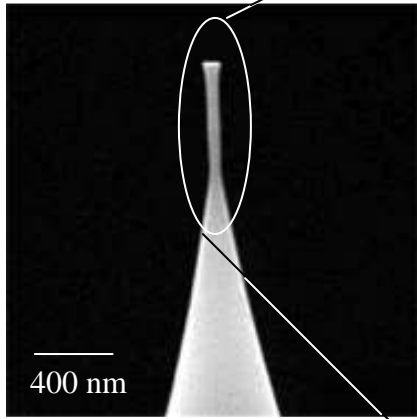


Figure 2-18 : Images MEB d'une pointe évasée en silicium.

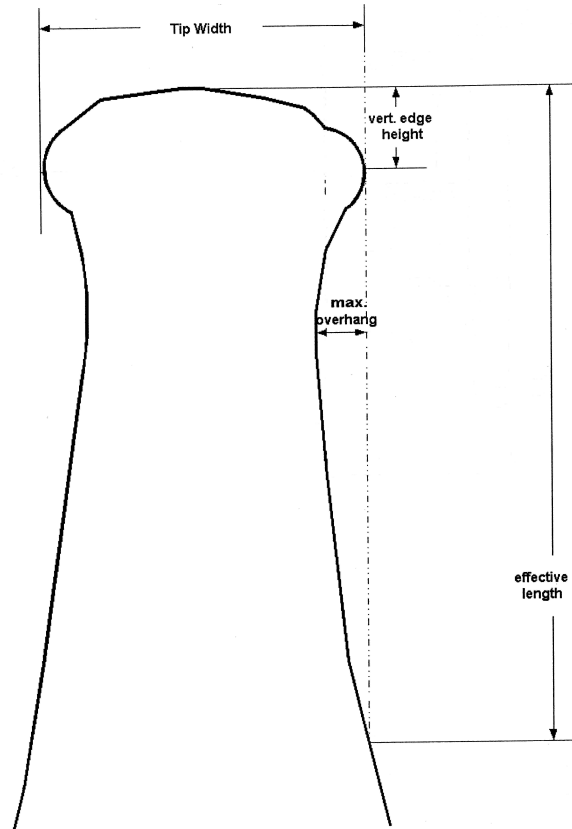


Figure 2-19 : Définition des paramètres d'une pointe

Les pointes ont une section ronde dont le diamètre peut actuellement descendre jusqu'à 32 nm [Foucher 05]. Actuellement, seulement certains diamètres de pointes sont disponibles commercialement, 50 nm, 70nm, 120 nm et 300nm. Le tableau 2-1 récapitule les caractéristiques des différentes pointes disponibles.

Modèle de pointe	Diamètre (Tip width) (nm)	Max Overhang (longueur surplomb) (nm)	Longueur efficace (effective length) (nm)	Hauteur bord vertical (Vertical edge height) (nm)	Raideur lateral (stiffness) (N/m)
CDR 300	300	30	1250	15	35,6
CDR 120	120	10	600	15	7,5
CDR 70	70	8	500	15	1,7
CDR 70S	70	10	400	15	2,1
CDR 50S	50	8	225	15	2,9
CDR 130SiN	130	25	300	15	22,1

Tableau 2-1 : Caractéristiques des pointes de mesures disponibles.

Ces pointes sont solidaires d'un levier qui est lui-même fixé sur un support en silicium dont la forme est adaptée à la tête AFM, figure 2-20. La constante de raideur du levier est typiquement de 30N/m et sa fréquence de résonance de l'ordre de 300kHz. L'ensemble pointe-levier-support est fabriqué par combinaison de gravure sèche et humide [Wolter 90] et est fourni par la société *Team Nanotech*.

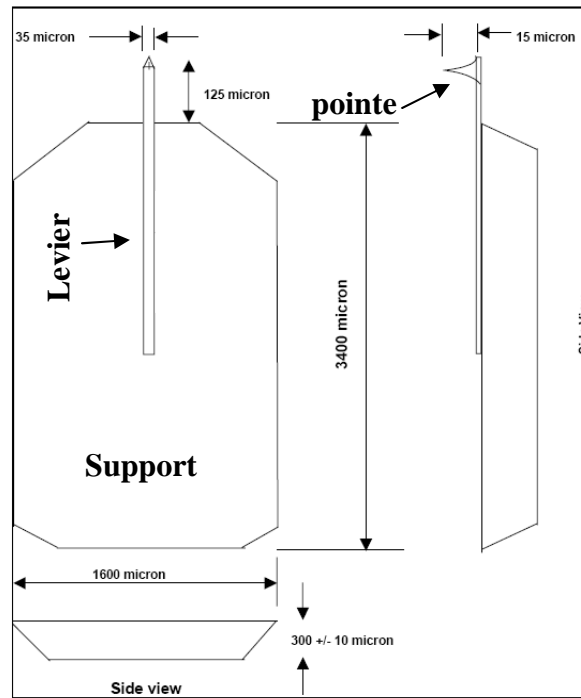


Figure 2-20 : Schéma de l'ensemble pointe / levier / support

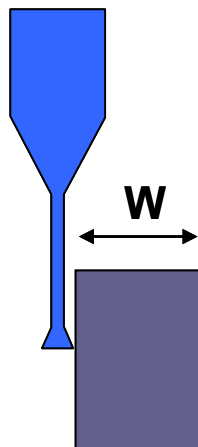
2.4.2. Protocole de mesure sur l'X3D

2.4.2.1. La qualification des pointes de mesures

Comme indiqué précédemment la technique du CD-AFM nécessite la connaissance préalable de la forme exacte de la pointe pour obtenir le profil réel de la ligne. Le Dimension X3D possède un algorithme unique de déconvolution de la forme et de la taille pointe [Dahlen 05]. Pour cela, l'algorithme utilise le résultat de la mesure de deux motifs étalons, comme illustré figure 2-21 :

- ✓ Une ligne en silicium de dimension connue, appelée VPS (pour Vertical Parallel Structure en anglais), pour déterminer le diamètre exact de la pointe.
- ✓ Une structure en silicium à profil fortement réentrant en forme de T avec un rayon de courbure de quelques nanomètres, appelée SOCS (pour Silicon Oxyde Characterization Structure en anglais), pour déterminer la forme exacte de la pointe.

a) VPS



b) SOCS

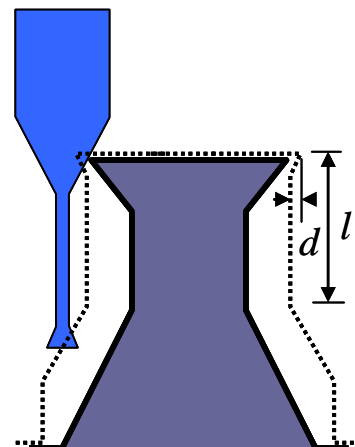


Figure 2-21 : Motifs étalon de qualification de pointe : a) VPS qui permet de déterminer le diamètre de la pointe. b) SOCS qui permet de déterminer la forme de la pointe.

Chapitre 2 : Métrologie de la rugosité de bord de ligne

Le X3D est fourni avec 40 motifs VPS. La calibration des motifs VPS a été effectuée à l'aide d'une ligne de référence, le *NanoCD Standard*, du NIST (pour Nationale Institute of Standard and Technology en anglais) organisme américain de référence en métrologie. Le NanoCD, mesurée par microscopie électronique à transmission (TEM), présente les caractéristiques suivantes :

- ✓ $CD = 70\text{nm}$
- ✓ Hauteur = 125nm
- ✓ $LWR (3\sigma) < 1\text{nm}$
- ✓ $LER (3\sigma) < 0.7\text{nm}$

Le X3D est également fourni avec de nombreux motifs SOCS. Dans l'idéal, les points de contact qui se trouvent aux extrémités de la structure SOCS sont monoatomiques. En pratique, ils sont constitués d'au moins quelques atomes. Par ailleurs, ces points de contact s'érodent assez rapidement après quelques qualifications. Il est donc nécessaire de se déplacer régulièrement sur d'autres motifs SOCS afin de ne pas surestimer le rayon de courbure de la pointe.

Finalement, la mesure de ces deux motifs étalons permet de reconstituer le profil de la pointe, figure 2-22, et ainsi de déterminer les paramètres essentiels de la forme de la pointe :

- ✓ Le diamètre (tip width en anglais)
- ✓ La hauteur du bord verticale qui correspond à la distance entre le haut de la pointe et la position en hauteur du surplomb (vertical edge height en anglais). Ce paramètre est très proche du rayon de courbure de la pointe. Dans la suite du manuscrit, nous nommerons donc ce paramètre rayon de courbure.
- ✓ La longueur efficace (effective length en anglais)
- ✓ La longueur maximale du surplomb de la pointe (max overhang en anglais)

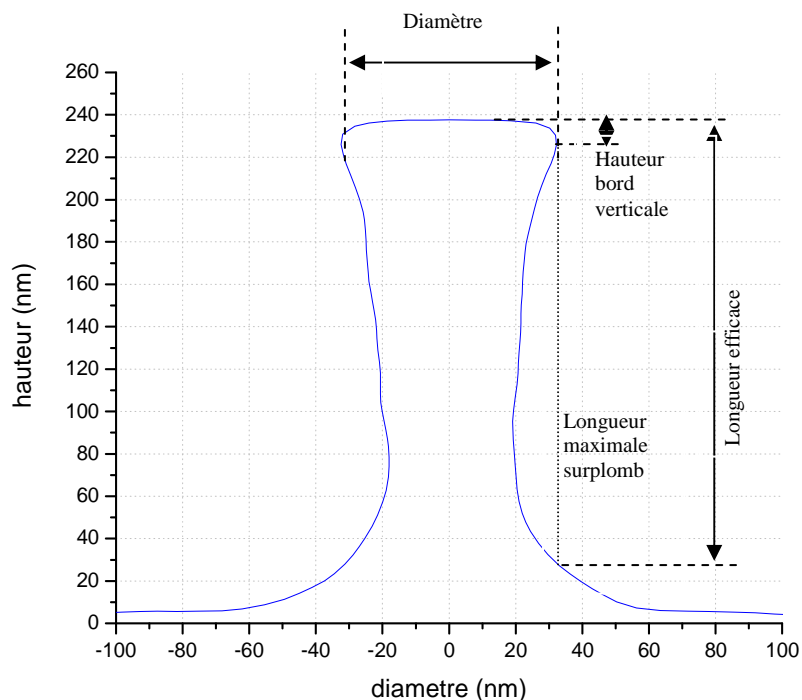


Figure 2-22 : Reconstitution par CD-AFM du profil d'une pointe de mesure.

2.4.2.2. La Mesure

Après la qualification de la pointe et le repérage de la structure à analyser à l'aide des optiques de visionnage, la mesure même d'une structure peut être effectuée. La mesure se fait par lignes successives, régulièrement espacées suivant l'axe Y, comme l'illustre la figure 2-23.

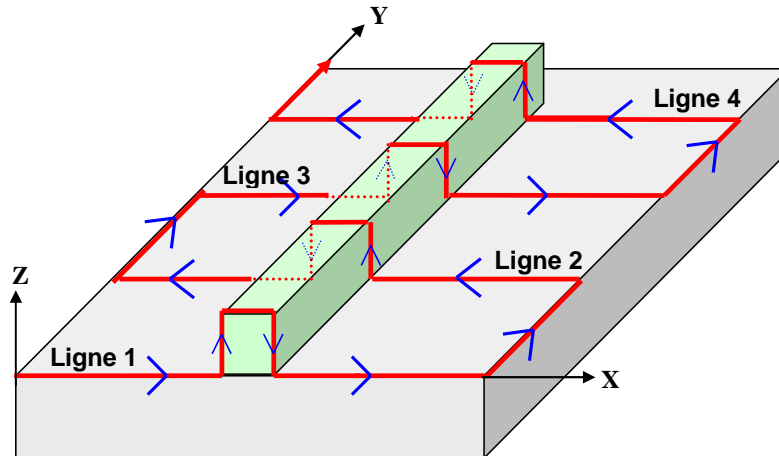


Figure 2-23 : Principe de la mesure de dimension d'une structure

Il est possible de modifier dans la fenêtre de mesure :

- ✓ Le nombre de ligne de mesure (**line** en anglais), maximum 256.
- ✓ La longueur de la fenêtre de mesure (**slow scan size** en anglais), maximum 40 μ m.
- ✓ La largeur de la fenêtre de mesure (**scan size** en anglais), maximum 40 μ m.

De nombreux paramètres propres à la mesure sont également modifiables. Parmi ceux-ci nous pouvons citer :

- ✓ Le pas de mesure en mode CD (**μ step size** en anglais). Il est compris entre 0,1nm et 1nm. Typiquement, il est de 0,7nm.
- ✓ La profondeur maximale que la pointe peut mesurer en hauteur (**Z clamp level** en anglais). Si ce paramètre est réglé à une valeur inférieure à la hauteur de la structure mesurée, le fond du motif n'est pas scanné. Il peut être compris entre 30nm et 5 μ m.
- ✓ La distance entre chaque point de mesure sur les parties horizontales (**horizontal data density** en anglais). Elle est comprise entre 3 et 5nm.
- ✓ La distance entre chaque point de mesure sur les parties verticales (**vertical data density** en anglais) Elle est comprise entre 1 et 3nm.
- ✓ La distance sur laquelle la valeur de la pente locale est calculée (**2D data smoothing** en anglais). Elle est comprise entre 3 et 8 nm.
- ✓ L'amplitude de l'oscillation en X (**dither amplitude** en anglais). Elle est typiquement de 2V, ce qui correspond à une amplitude pic à pic d'environ 5nm. Une augmentation d'un volt permet une hausse d'amplitude de ± 2 nm.

2.4.2.3. La validité de la mesure et le traitement des données

Comme nous l'avons vu précédemment, le résultat de la mesure est une convolution de la pointe et de la structure. Pour pouvoir comparer les mesures, il est nécessaire de garder les mêmes conditions d'imagerie (taille de la fenêtre de mesure, nombre de ligne de mesure,...),

Chapitre 2 : Métrologie de la rugosité de bord de ligne

et s'assurer que la forme et la taille de la pointe de mesure n'ont pas évolué au cours de la mesure (érosion excessive, prise de particule, ...). Pour se faire, une qualification de la pointe a systématiquement été effectuée avant et après chaque mesure afin de vérifier que la forme et la taille de la pointe n'ont pas évolué lors de la mesure. Pour obtenir une mesure valable, nous nous sommes fixés une limite arbitraire sur l'évolution du diamètre de la pointe durant la mesure.

- ✓ Pour la mesure de CD, une différence de diamètre de 2nm maximum.
- ✓ Pour la mesure de LWR, une différence de diamètre de 1nm maximum.

Nous avons également considéré que la pointe n'était plus utilisable pour effectuer une mesure de LWR lorsque son rayon de courbure était supérieur à 20nm.

Après validation de la mesure, les données brutes sont traitées à l'aide du logiciel NANOSCOPE de chez *Veeco metrology group*, spécialement conçus pour le Dimension X3D. Un algorithme unique permet de déconvoluer la forme et la taille de la pointe de la mesure afin d'obtenir le profil réel de la structure [Dahlen 05]. Ceci permet de représenter le profil de la structure, soit en 3 dimensions, figure 2-24, soit en 2 dimensions par le profil moyen de toutes lignes de mesure, figure 2-25. Nous avons alors accès à toutes les informations dimensionnelles de la structure pour chaque ligne de mesure, à savoir, la hauteur, le CD à la hauteur voulue, l'angle à gauche, à droite et la position du bord de ligne par rapport à la fenêtre de mesure. A partir des dimensions de toutes les lignes mesurées, la valeur moyenne et l'écart type de chaque paramètre sont calculés. L'écart type à 3σ du CD nous donne la valeur de LWR, et l'écart type à 3σ de la distance entre la position du bord de ligne et le bord de la fenêtre de mesure nous donne la valeur du LER. Ces valeurs de rugosité et de CD peuvent être prises à différentes hauteurs de la structure.

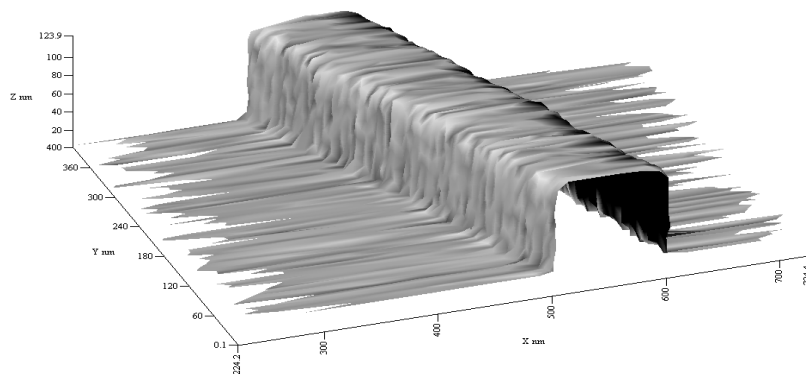


Figure 2-24 : Reconstruction en trois dimensions du profil d'une ligne de résine

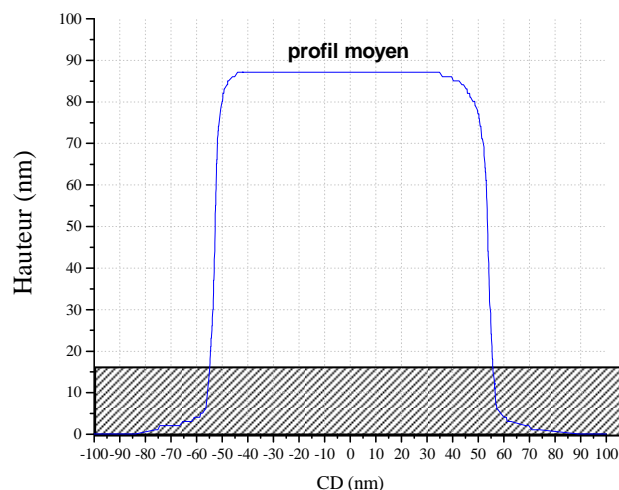


Figure 2-25 : Reconstruction en deux dimensions du profil moyen d'une ligne de résine

2.4.3. Test des performances de l'AFM 3D

Dans cette partie, nous présentons les tests sur la précision de la mesure que nous avons effectués lors de la mise en place de l'équipement. L'ITRS ne définissant aucune méthode de mesure standard de LWR, nous exposerons également le protocole de mesure de LWR que nous avons mis en place. Finalement, nous exposons les tests sur l'usure des pointes que nous avons effectués afin de choisir la pointe la plus adaptée pour les mesures de la rugosité de bord de ligne.

2.4.3.1. La précision de la mesure du CD

La figure 2-26 récapitule les résultats des onze séries de mesures de CD faites sur 5 lignes de résines de dimensions différentes (de 85nm à 140nm) réalisées par lithographie à faisceau d'électrons. Afin d'obtenir la précision dynamique de la mesure, un déchargement de la plaque a été effectué entre chaque série de mesure. Pour chaque ligne de résine, la valeur moyenne du CD et l'écart type respectif a été calculé à partir des onze mesures effectuées. La précision dynamique à 1σ de la mesure est alors donnée par la moyenne quadratique des écarts type de CD des cinq lignes de résine [NIST], comme l'indique la formule suivante :

$$\text{precision}(3\sigma) = 3 \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (\sigma_i)^2}{5}}$$

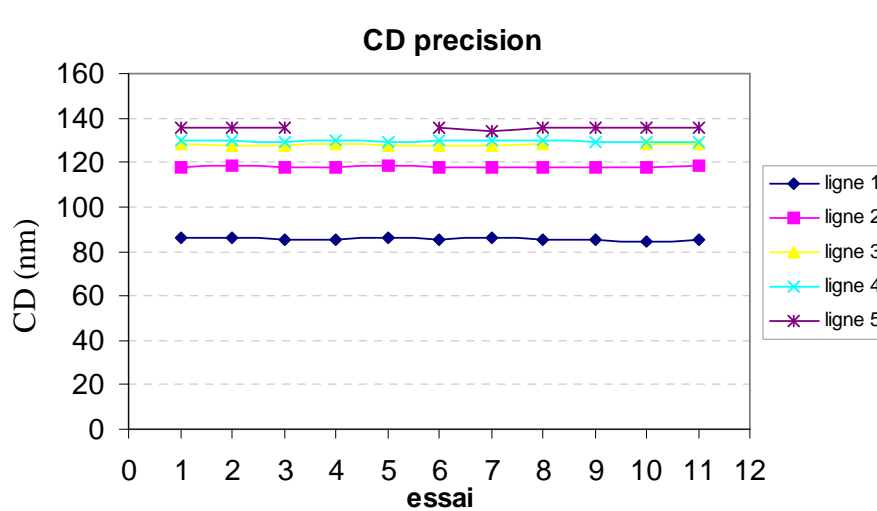


Figure 2-26 : Série de mesure de CD, répétée 11 fois, de 5 lignes de résine réalisées par lithographie à faisceau d'électrons pour déterminer la précision de la mesure de CD.

La précision dynamique à 3σ obtenue est de 1,24nm. Cette valeur est supérieure aux exigences demandées par l'industrie des semi-conducteurs qui requiert une précision de 0.44nm en 2006 [ITRS 05]. Cependant, certaines améliorations sont possibles afin de diminuer cette valeur :

- ✓ Amélioration de la procédure de calibration.
- ✓ Eviter la dérive du plateau de mesure.
- ✓ Diminuer le diamètre des pointes de mesures en utilisant par exemple des pointes avec un nanotube de carbone.

2.4.3.2. La mesure de LWR

Dans le but d'évaluer le LER et le LWR, les paramètres de mesure les plus importants sont la longueur du bord examiné, L , et l'intervalle d'échantillonnage de détection du bord, Δy . En effet, la rugosité étant un paramètre statistique, la valeur à 3σ de LWR mesuré dépend fortement de ces deux paramètres [ITRS 05, Yamaguchi 04, Bunday 04]. Bien que les CD-SEM et les systèmes de simulation lithographique possèdent des algorithmes de détermination de LWR, il n'y a pas aujourd'hui de procédure standard de mesure de la rugosité de bord. Dans un premier temps, il a donc été nécessaire de mettre en place sur le CD-AFM une méthode - longueur du bord examiné et pas d'échantillonnage de détection de bord - qui permet d'estimer une valeur de la rugosité de bord totale de la ligne statistiquement fiable. Pour cela, la longueur du champ de mesure doit être suffisamment grande pour que le LWR mesuré soit considéré comme le LWR d'une ligne de longueur infinie. Et le nombre de points de mesure sur la ligne, qui dépend de l'intervalle d'échantillonnage pour une longueur donnée, soit suffisamment important pour que le résultat de la mesure de LWR soit statistiquement fiable.

Pour l'évaluation de ces deux paramètres, nous avons effectué sur une ligne de résine réalisée par lithographie par faisceau d'électrons, plusieurs séries de mesures de LWR sur lesquelles la longueur du champ de mesure et l'intervalle d'échantillonnage ont été modifiés. Pour chaque mesure, les valeurs de LWR ont été prises au milieu du motif de résine.

✓ Longueur du champ de mesure

La figure 2-27 montre les résultats des mesures de LWR à 3σ effectuées pour 5 longueurs de champ de mesure différentes (125nm, 250nm, 500nm, 1 μ m, 2 μ m). Le nombre de lignes de mesure est fixé à 100 pour chaque longueur de bord examiné, afin d'avoir un nombre de mesure suffisamment élevé pour obtenir une valeur de LWR à 3σ statistiquement fiable.

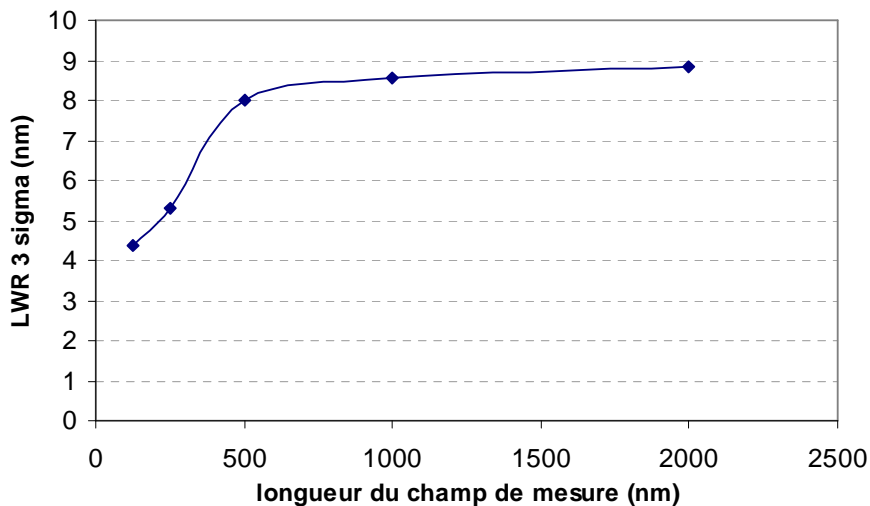


Figure 2-27 : Evolution de LWR en fonction de la longueur du champ de mesure examiné.

Le LWR mesuré augmente avec la longueur de bord examinée et se stabilise à partir de 1 μ m. Pour les petites longueurs de champ de mesure, l'erreur sur la mesure de LWR semble donc importante du fait que les longues périodes de la rugosité de bord ne sont pas mesurées. Il est donc nécessaire de mesurer le LWR sur une distance de 2 μ m pour obtenir toutes les

Chapitre 2 : Métrologie de la rugosité de bord de ligne

informations fréquentielles de la rugosité de bord et ainsi avoir une mesure de LWR représentative d'une ligne de longueur infinie.

✓ Intervalle d'échantillonnage

Un intervalle d'échantillonnage approprié a dû être déterminé afin d'obtenir une mesure de LWR statistiquement fiable. Les lignes de mesure sont prises à intervalle de distance régulier le long de la ligne, l'intervalle d'échantillonnage pour une longueur de champ de mesure donnée est donc proportionnel aux nombres de lignes de mesure. Pour cette expérience, nous avons fait varier le nombre de lignes de mesure pour une longueur de champ de mesure de $2\mu\text{m}$.

La figure 2-28 montre les résultats d'une série de mesure de LWR à 3σ répété 5 fois, et effectuées sur une longueur de champ de mesure de $2\mu\text{m}$ pour laquelle le nombre de ligne de mesure a été modifié.

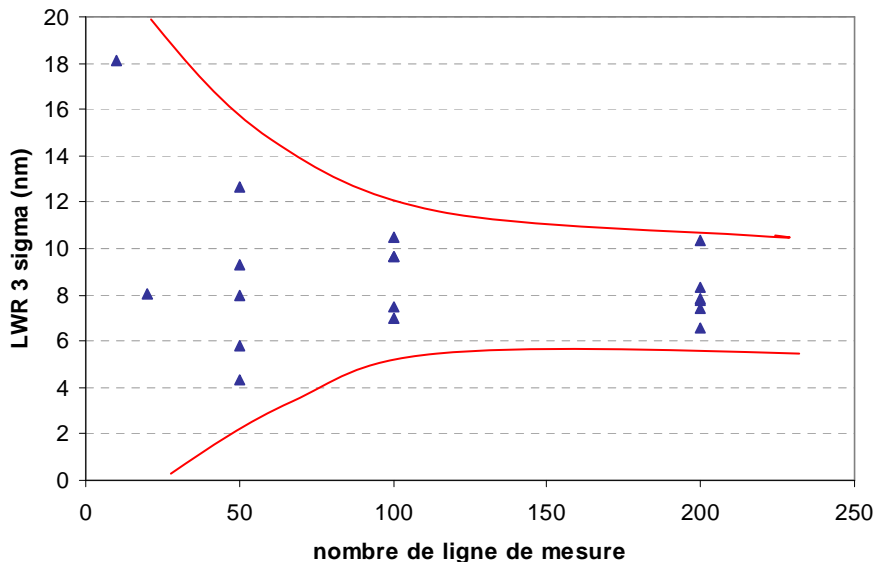


Figure 2-28 : Evolution de LWR d'une ligne de $2\mu\text{m}$ en fonction du nombre de ligne de mesures

Il apparaît qu'une augmentation du nombre de ligne de mesure diminue la dispersion des mesures de LWR. En effet, à partir de 100 lignes de mesure, ce qui correspond dans notre cas à un intervalle d'échantillonnage de 20nm , la dispersion des mesures se stabilise. Il semble donc nécessaire d'appliquer un minimum de 100 lignes de mesures pour obtenir une mesure de LWR statistiquement fiable. Ce résultat est cohérent avec la loi de statistique de Student qui indique que pour 100 mesures, le niveau de confiance à 99,7% correspond à un écart type à 3σ . Comme nous le verrons par la suite (section 2.4.4.3), l'usure de la pointe dépend fortement du nombre de ligne de mesure effectué. Ainsi, le fait d'appliquer 100 lignes de mesure est un bon compromis entre usure de la pointe et mesure statistiquement fiable. Par ailleurs, le fait d'effectuer 100 lignes de mesures plutôt que 200, diminue nettement le temps de mesure.

D'après ces résultats, nous avons établi le protocole de mesure de LWR suivant : 100 lignes de mesures, à intervalle régulier de 20nm , sur une longueur de champ de mesure de $2\mu\text{m}$. Cette méthode de mesure a été appliquée sur tous les motifs qui nous ont permis d'étudier l'évolution de la rugosité de bord au cours des différentes étapes de fabrication d'une grille de transistor MOS. En outre, ce protocole est en accord avec les dernières

Chapitre 2 : Métrologie de la rugosité de bord de ligne

exigences l'ITRS qui recommande pour l'évaluation du LER / LWR sur toute la région de fréquence spatiale, d'effectuer la mesure sur une longueur de $2\mu\text{m}$ [Yamaguchi 04, Bunday 04]. Par ailleurs, l'ITRS mentionne qu'un intervalle d'échantillonnage de 10nm est suffisamment petit du point de vue de la précision de mesure du LER et de LWR. En effet, les hautes fréquences de la rugosité, qui ne peuvent être détectées avec cet intervalle, ont une amplitude assez faible comparées à la rugosité de bord totale observée sur une ligne de $2\mu\text{m}$ de longueur et peuvent donc être considérées comme négligeable. Cependant, le choix de cet intervalle d'échantillonnage est actuellement en cours de discussion et devrait évoluer avec la réduction en dimensions des dispositifs.

✓ Répétabilité de la mesure de LWR

A partir du protocole expérimental décrit dans le paragraphe précédent, à savoir 100 lignes de mesure sur $2\mu\text{m}$, nous avons voulu déterminer la répétabilité de la mesure de LWR. Pour cela, nous avons mesuré avec la même pointe de mesure de 50nm de diamètre, une même ligne de résine et une même ligne de silicium, 50 fois de suite, avec une qualification de la pointe entre chaque mesure afin de valider chaque mesure. Cette manipulation a été effectuée suivant trois modes d'oscillation de la pointe en X (FDTA, 2V, 4V). A partir de ces 50 mesures, la valeur moyenne et l'écart type à 3σ ont été calculé afin de déterminer l'erreur sur la mesure de LWR. Les tableaux 2-2 et 2-3 récapitulent les résultats de ces mesures, respectivement sur résine et sur silicium :

Résine	FDTA	2V	4V
LWR moyen (nm)	15,1	15	15,9
Ecart type à 3σ de LWR (nm)	2,9	3,4	3,3
Erreur de mesure par rapport au LWR moyen	19,2 %	22,7 %	20,7 %

Tableau 2-2 : Résultat sur la répétabilité de la mesure de LWR sur résine

Silicium	FDTA	2V	4V
LWR moyen (nm)	9,7	9,5	10,2
Ecart type à 3σ de LWR (nm)	1,2	1,3	1,2
Erreur de mesure par rapport au LWR moyen	12,4 %	13,7 %	11,7 %

Tableau 2-3 : Résultat sur la répétabilité de la mesure de LWR sur silicium

D'après ces résultats, nous notons que l'erreur de mesure de LWR sur silicium est d'environ 12% par rapport à la valeur moyenne de LWR, et celle sur résine d'environ 20% et ce quelque soit le mode d'oscillation de la pointe en X utilisé. Pour nos études sur l'évolution de la rugosité de bord après chaque étape technologique de fabrication d'une grille de transistor MOS, nous avons donc pris en compte cette erreur de mesure de LWR pour tracer les barres d'incertitudes.

2.4.3.3. Le choix des pointes de mesures

Dans le but de choisir une pointe assez résistante et précise pour effectuer des mesures de LWR après chaque étape technologique de fabrication d'une grille de transistor CMOS, nous avons effectué des tests sur l'usure des pointes. En effet, lors d'une mesure, une diminution du diamètre des pointes et une augmentation de leur son rayon de courbure sont généralement observées. Comme dans le cas de l'AFM standard, le phénomène d'usure des pointes est probablement dû aux effets de cisaillement (friction) lors du « collage » de la pointe sur les surfaces verticales [Khurshukov 96, Pietrement 00]. En effet, il est probable que lors du « collage », l'amplitude d'oscillation en Z ne soit pas nulle et donc qu'il y ait friction entre la pointe et le matériau analysé, ce qui entraîne une dégradation du profil de la pointe. En outre, l'usure des pointes réduit la précision et la fiabilité des mesures AFM [Liu 05]. Cependant ce comportement d'usure peut être différent suivant le type de pointe utilisé. Dans le cadre de la thèse, nous avons à notre disposition trois types de pointes, comme montré sur la figure 2-29.

- ✓ une pointe de 120 nm de diamètre et de 500nm de longueur (CDR 120).
- ✓ des pointes de 70nm (CDR 70S) et de 50nm (CDR 50S) de diamètre et de longueur efficace respectivement de 400nm et 200nm.
- ✓ une pointe de 100 nm de diamètre avec un capot en SiN sur le haut de la pointe.

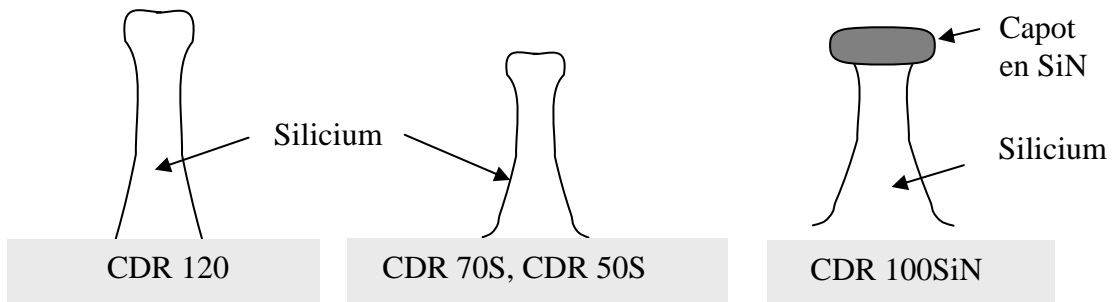


Figure 2-29 : les différents types de pointes disponibles

Avec ces différentes pointes, nous avons effectué plusieurs séries de mesures de CD sur 5 structures dont le CD variait de 40nm à 400nm. Pour cette étude, nous avons appliqué 10 lignes de mesures sur 1 μ m. Dans un premier temps, ces mesures ont été effectuées sur des lignes de résine réalisées par lithographie par faisceau d'électrons, puis sur des lignes en silicium. Toutes les cinq mesures, soit après 50 lignes de mesures, une qualification de la pointe a été réalisée. Ce protocole a été répété une centaine de fois pour chaque pointe afin de déterminer le nombre de lignes mesurées pour une perte de diamètre de la pointe de 1nm.

Sur les lignes de résine, nous avons testé les pointes CDR 70S, CDR 50S et CDR 100SiN. Sur la figure 2-30, il apparaît que les pointes s'usent très faiblement sur résine. En effet, le diamètre de la pointe diminue de 1nm pour 1666 à 7250 lignes mesurées suivant la pointe utilisée. Ces valeurs importantes permettent de faire de nombreuses mesures sur résine sans crainte d'usure précoce de la pointe. La CDR 100SiN se montre être la pointe la plus résistante sur résine.

Sur les lignes en silicium, nous avons testé les pointes CDR 120, CDR 100SiN et CDR 50S. Les mesures sur silicium ont été effectuées pour deux amplitudes d'oscillation en X différentes. Sur la figure 2-31, il apparaît que l'usure de la CDR 120 et de la CDR 100SiN est importante pour une dither amplitude de 2V, soit une amplitude d'oscillation de la pointe en X d'environ 8nm pic à pic. En augmentant la dither amplitude à 4V, soit une amplitude d'environ 16nm pic à pic, nous remarquons que l'usure de la CDR 120 est diminuée d'un facteur 5. Ceci mène à penser que le temps d'adhésion de la pointe au flanc des structures (section 2.3.3.4) impacte l'usure des pointes. Cette remarque renforce l'idée que l'usure est due aux effets de cisaillement lors du « collage » de la pointe sur les surfaces verticales. Par

ailleurs, nous observons que l'usure de la CDR 100SiN n'évolue pas avec l'amplitude d'oscillation en X. Cette observation suggère que l'interaction entre le matériau de la pointe et celui de la surface joue également un rôle dans le phénomène d'usure de la pointe. En effet, il a été montré que les propriétés frictionnelles entre deux matériaux en contact étaient dépendantes de leur nature chimique [Pietrement 00]. Ceci renforce à nouveau l'idée que l'usure des pointes est principalement due aux effets de friction.

Finalement, nous remarquons que la CDR 50S est la pointe la plus résistante sur silicium. Cependant, cette usure est encore trop importante pour effectuer un très grand nombre de mesures avec la même pointe à une échelle industrielle, mais est suffisante pour obtenir des mesures de rugosité fiables sur silicium.

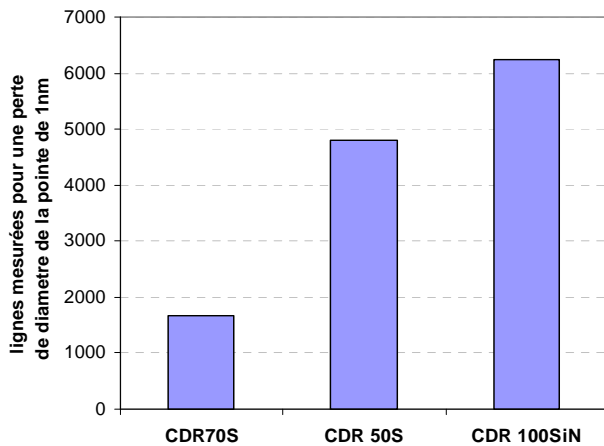


Figure 2-30 : Usure des pointes sur résine

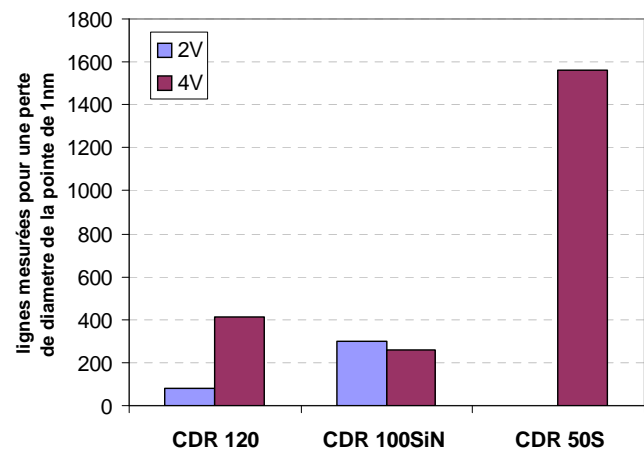


Figure 2-31 : Usure des pointes sur silicium

Par ailleurs, l'erreur sur la mesure absolue de LWR est plus faible pour des pointes de plus petit diamètre [Foucher 05]. Ainsi, il est préférable pour la mesure de la rugosité de bord de ligne d'utiliser des pointes avec un faible diamètre afin d'obtenir une mesure précise de LWR. Actuellement, la pointe de plus petit diamètre disponible commercialement est la CDR 50S. En outre, elle présente le meilleur compromis d'usure sur résine et sur silicium. Par conséquent, nous avons choisi d'utiliser cette pointe avec une dither amplitude de 4V pour réaliser nos études sur l'évolution de la rugosité de bord après chaque étape technologique de fabrication d'une grille de transistor MOS.

2.4.4. Difficultés et limitations des mesures

Ces différents tests de performances, nous ont permis de mettre en évidence certaines difficultés de mesure. Elles peuvent être d'ordres techniques, liées à la pointe ou à l'échantillon, ou intrinsèques à la mesure. Parmi celles-ci, nous expliquerons dans cette partie, celles qui sont particulièrement importantes pour nos études.

2.4.4.1. La zone d'ombre en bas du motif.

De par la forme de la pointe et plus particulièrement de son rayon de courbure, une zone d'ombre est formée sur laquelle aucune information dimensionnelle ne peut être obtenue, comme l'illustre la figure 2-32. Cette difficulté est particulièrement gênante pour obtenir une valeur au pied des structures, qui est une dimension capitale à connaître pour le développement de procédé.

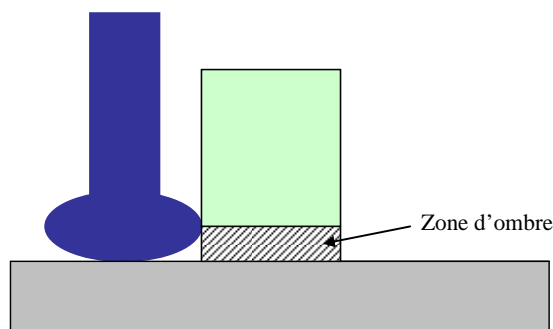


Figure 2-32 : Zone d'ombre en bas du motif, délimitée par le rayon de courbure de la pointe, sur laquelle on ne peut obtenir d'informations dimensionnelles de la structure.

2.4.4.2. La dérive du plateau de mesure lors de l'acquisition de l'image.

Dans certains cas, particulièrement lors de la première mesure après avoir installé l'échantillon sur le plateau de mesure, le plateau dérive lors de la mesure, de manière aléatoire. La ligne à mesurer étant préalablement alignée avec la fenêtre de mesure, ce problème a pour effet de décaler la ligne mesurée, comme le montre la figure 2-33. Ceci conduit donc à une augmentation importante de l'erreur de mesure de la dimension de ligne et donc de la rugosité de bord. Cependant, après un certains temps, cette dérive n'est plus observée. Dans le but d'avoir une mesure fiable de la rugosité de bord, il convient donc d'être vigilant lors de l'acquisition de l'image afin de ne pas observer de dérive du plateau de mesure.



Figure 2-33 : Image AFM illustrant le décalage de la ligne par rapport à la fenêtre de mesure, dû à une dérive aléatoire du plateau de mesure.

2.4.4.3. La prise de particule sur la pointe.

Lors de certaines mesures, particulièrement dans le cas de mesure de ligne de résine après plasma de Cl_2 ou d' HBr , des particules s'accrochent à la pointe. Ceci a pour effet d'augmenter fortement le diamètre de la pointe lors de la mesure, figure 2-34. Dans ce cas, la mesure effectuée ne peut être considérée comme valable. La prise de particule par la pointe intervient probablement lors du décollage de la pointe des flancs de la structure. En effet, quand la pointe vient coller à une partie du flanc de la structure qui adhère faiblement au motif, il est possible que lors du décollage, la force d'adhésion pointe-partie du motif soit supérieure à celle partie du motif – structure. Dans ce cas, il est possible qu'une partie du motif reste collée

Chapitre 2 : Métrologie de la rugosité de bord de ligne

sur la pointe de mesure. Par ailleurs, les particules peuvent également provenir du fond ou du haut du motif. Dans le but de limiter ou d'éviter ce phénomène, nous avons mis au point une méthode de mesure qui ne touche pas le fond des motifs en appliquant une valeur limite de profondeur de mesure (Z clamp level) inférieure à la hauteur même de la structure. Ainsi, seulement les particules présentes sur le flanc ou sur le haut du motif peuvent être collectées par la pointe, limitant ainsi la probabilité de prendre des particules. Dans certains cas, nous avons réussi à obtenir une mesure valable en appliquant ce protocole de mesure. Par ailleurs, cette méthode peut également être employée pour limiter l'usure des pointes.

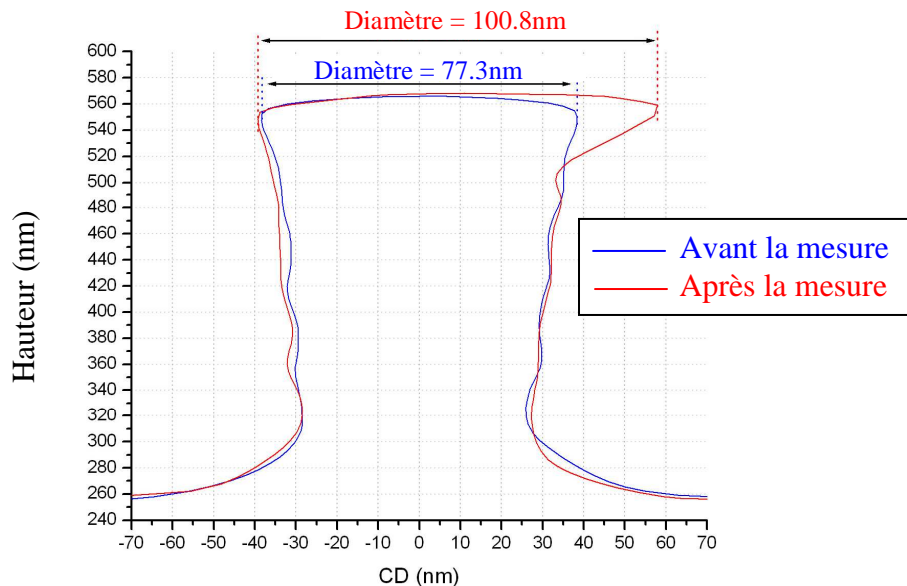


Figure 2-34 : Profil d'une pointe de mesure avant et après la mesure d'une ligne de résine érodée latéralement par plasma de Cl_2/O_2

2.4.4.4. Le raccord de champ en lithographie par faisceau d'électrons.

L'insolation en lithographie par faisceau d'électrons s'effectue par champ d'exposition. Plusieurs champs d'écriture sont nécessaires pour l'insolation d'une ligne de résine de quelques millimètres de long. Les réglages de l'outil d'exposition ne sont pas parfaits, un décalage d'alignement de la ligne de résine est donc souvent observé au niveau du raccord de champ, comme le montre la figure 2-35. La mesure de la rugosité de bord d'une ligne de résine présentant un raccord de champ augmente de manière significative la valeur de la rugosité de bord mesurée. Cette valeur n'est donc pas caractéristique de la rugosité réelle de la ligne de résine et ne peut donc être pris en compte.



Figure 2-35 : Image AFM d'une ligne de résine réalisée par lithographie électronique montrant le décalage d'alignement dû à un mauvais raccordement de champ d'écriture.

2.4.4.5. L'usure des pointes de mesures sur des matériaux durs

Comme décrit précédemment (section 2.4.3.3), une usure importante des pointes est observée lors de la mesure de motif de silicium. Cette usure est encore plus importante sur des motifs en oxyde de silicium. Pour exemple, le diamètre d'une pointe courte de 50nm de diamètre (CDR 50S) diminue de 1 nm toutes les 63 lignes de mesures et le rayon de courbure de la pointe initialement de 15nm dépasse les 20nm dès 200 lignes de mesures, figure 2-36. Il est alors difficile d'effectuer des mesures de rugosité sur oxyde de silicium. Cette usure de la pointe est donc un problème majeur pour la mise en place de l'X3D en production dans le but d'effectuer un contrôle dimensionnel après différentes étapes de gravure.

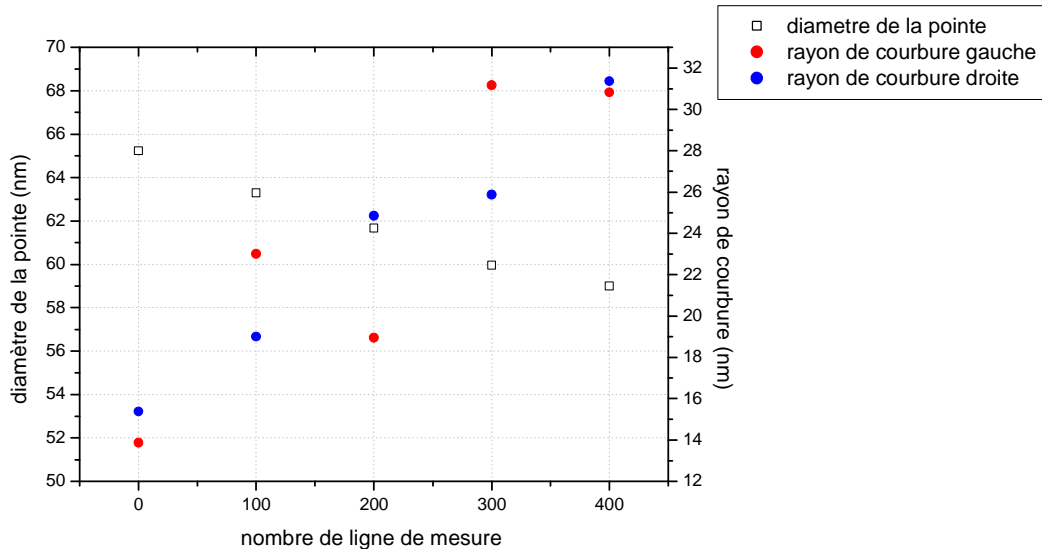


Figure 2-36 : Usure d'une pointe courte de 50nm de diamètre (CDR 50S) sur un masque dur en oxyde de silicium

2.4.4.6. Le diamètre des pointes de mesures

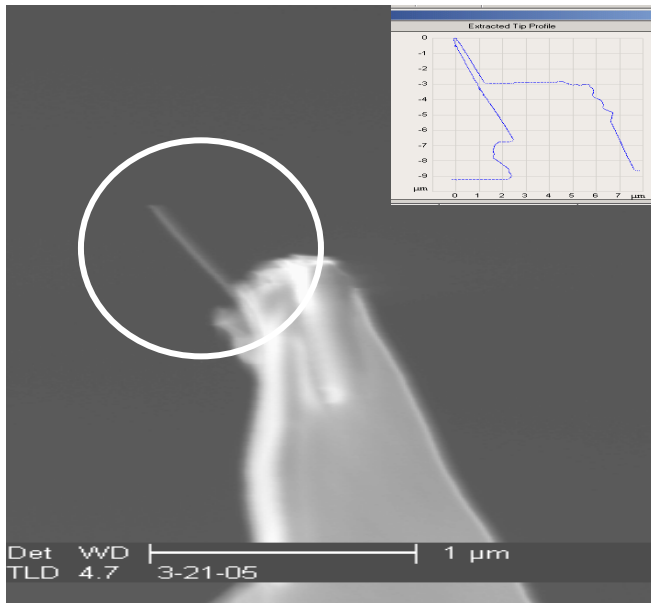
Les pointes de mesures actuellement disponibles ont un diamètre compris entre 50 et 300nm. Ce diamètre important et la méthode de mesure ne permettent pas d'obtenir une mesure absolue de LWR. Cependant, en utilisant la même pointe et le même protocole de mesure après chaque étape technologique, les mesures de LWR peuvent être comparées. Le diamètre des pointes ainsi que leur amplitude d'oscillation en X fixe la dimension limite de l'espace entre deux lignes capable d'être mesurer avec le CD-AFM. Typiquement, il est actuellement possible de mesurer avec une pointe de 50nm de diamètre des espaces de 75nm entre deux lignes. Néanmoins, une réduction du diamètre des pointes permettrait la mesure de réseau de ligne de plus petites tailles.

Finalement, les pointes de mesures sont l'un des facteurs limitant du CD-AFM. En effet, elles ne sont pas actuellement assez résistantes pour la mesure de matériaux durs tels que le silicium ou l'oxyde de silicium et leur diamètre doit encore être réduit afin d'obtenir une meilleure précision de mesure. Il est donc aujourd'hui nécessaire de travailler sur le développement de ces pointes. Une pointe avec un nano tube de carbone, de par sa haute résistance et son très faible diamètre (de l'ordre de la dizaine de nm), pourrait résoudre ces problèmes. Cependant, le nano tube doit être décalé d'un certain angle par rapport à la normale pour être capable de mesurer un des flancs de la structure. Au cours de la thèse, nous avons eu l'occasion de tester une pointe de ce type avec l'X3D. La figure 2-37a, montre une photo MEB de la pointe utilisée ainsi que son profil mesuré par l'X3D. La mesure avec cette

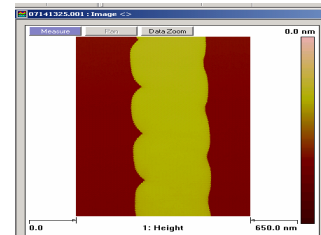
Chapitre 2 : Métrologie de la rugosité de bord de ligne

pointe a permis de nettement améliorer la précision de la mesure comme le montre la figure 2-37b. Cependant, uniquement l'information sur un seul bord est obtenue. Par ailleurs, la fabrication de ce type de pointe est encore délicate. En effet, l'orientation du nano tube sur la pointe n'est pas encore maîtrisée et régulièrement, certaines pointes ne présentent pas de décalage d'angle par rapport a la normale, empêchant la mesure des flancs des structures. Actuellement, de nombreux travaux sont en cours pour fabriquer de telles pointes [Wong 98, Nguyen 01, Emirov 04, Tang 05].

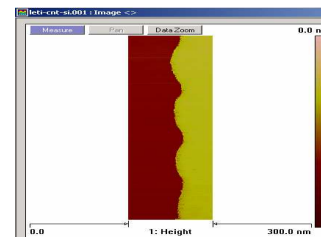
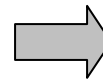
a)



b) mesure d'une ligne de silicium avec des rugosités contrôlées



Mesure avec une pointe standard en silicium



Mesure avec un nanotube de carbone

→ Amélioration notable de la précision

Figure 2-37 : a) Photo MEB et profil mesuré avec l'X3D d'une pointe avec un nanotube de carbone, b) Mesure d'une ligne de silicium présentant des rugosités contrôlées avec une pointe standard en silicium et un nanotube de carbone.

2.5. Bibliographie

- [Albrecht 87] **T.R. Albrecht et C.F. Quate,**
J. Vac. Sci. Technol. A 6(2), pp. 271-274, Mar/Apr 1987.
- [Binning 86] **G.Binning, C.F. Quate et C.Gerber,**
Phys. Rev. Lett, 56 (9), 930, 1986.
- [Boher 05] **P. Boher, J. Petit, T. Leroux, J. Foucher, Y. Desieres, J. Hazart,
et P. Chaton,**
Proc. SPIE, 5752, p192, 2005.
- [Bunday 04] **B. D. Bunday, M. Bishop, D. McCormack, J. S. Villarrubia,
A.E. Vladar, R. Dixon, T. Vorburger, et N. G. Orji,**
Proc SPIE 5375, 2004, p515–533.
- [Cleveland 98] **J.P. Cleveland, B. Anczykowski, A.E. Schmid, et V.B. Elings,**
Appl. Phys. Lett, 72 (20), pp.2613-2615, 1998.
- [Dahlen 05] **G.Dahlen, M.Osborn, N.Okulan, W.Foreman, A.Chand, J.Foucher,**
J. Vac. Sci. Technol. B 23(6), Nov/Dec 2005.
- [Denk 91] **W. Denk, et D. Phol,**
Appl. Phys. Lett, 59, pp. 2171, 1991.
- [Dixson 02] **R.Dixson, A. Guerry, M.Bennett, T.Vorburger, et M.Postek,**
Proc. SPIE 4689, pp. 313-335, 2002.
- [Dixson 03] **R.Dixson, A. Guerry, M.Bennett, T.Vorburger, et M.Postek,**
Proc. SPIE 5038, pp. 150-165, 2003.
- [Emirov 04] **Y. N. Emirov, J. D. Schumacher, B. Lagel, N. Nguyen, Z. F. Ren,
Z. P. Huang, B. B. Rossie, et R. Schlaf,**
Proc SPIE 5375, pp. 1389-1392, 2004.
- [Foucher 04] **J.Foucher, et K. Miller**
Proc. SPIE 5375, pp. 444-455, 2004.
- [Foucher 05] **J.Foucher,**
Proc. SPIE 5752, pp. 966-976, 2005.
- [Foucher 06] **J.Foucher, A. L. Fabre, P. Gautier**
Proc. SPIE 6152, 2006.
- [ITRS 05] **International Technology Roadmap for Semiconductors,**
2005 edition, <http://itrs.net>
- [Jones 03] **R.Jones, J.Byers, et W.Conley,**
Proc. SPIE 5038, pp. 663-673, 2003.

- [Gelenbe 04] **E.Gelenbe, T.Kocak, R.Wang,**
Microelectronic Engineering 75, p216-233, 2004.
- [Griffith 93] **J.E. Griffith et D.A. Grigg,**
J. Appl. Phys., Vol. 74(9), Nov 1993.
- [Leunissen 04] **L.H.A. Leunissen, W.G.Lawrence, et M.Ercken,**
Microelectronic Engineering 73-74, pp. 265-270, 2004.
- [Liu 05] **H. Liu, M. Klonowski, D. Kneeburg, G. Dahlen, M. Osborn,
et T. Bao,**
J. Vac. Sci. Technol. B23 (6), pp. 3090-3093, Nov/Dec 2005.
- [Martin 95] **Y. Martin, and H.K. Wickramasinghe,**
J. Vac. Sci. Technol. B13 (6) A 16, pp. 2335-23396), Nov/Dec 1995.
- [Martin 94] **Y. Martin and H.K. Wickramasinghe,**
Appl. Phys Letters 64 (19), pp. 2498-2500,1994.
- [Nagase 96] **N. Nagase, H. Namatsu, K. Kurihara, et T. Makino,**
Jpn. J. Appl. Phys. Vol35, pp. 4166-4174,1996.
- [Nelson 99] **C. Nelson, C. Palmateer, A.R. Forte, et T.M.Lyszczarz,**
J. Vac. Sci. Technol. B 17(6), pp. 2488-2498, Nov/Dec 1999.
- [Nguyen 01] **C. V. Nguyen, K. J. Chao, R. M. D. Stevens, L. Delzeit, A. Cassell,
J. Han, et M. Meyyappan,**
Nanotechnology 12, pp.363-367, 2001.
- [Niu 01] **X. Niu, N. Jakatdar , J. Bao, et C.J. Spanos,**
IEEE, Vol. 14, no. 2, Mai 2001.
- [NIST] **NIST/SeMaTech Engineering Statistics Handbook,**
Rev 5/22/2001; Section 2.5.3.1.2, Type A.
- [Orji 05] **N.G. Orji, T.V. Vorburger, J. Fu, R.G. Dixon, C.V. Nguyen,
et J. Raja,**
Meas. Sci. Technol, 16, pp. 2147-2157, 2005.
- [Paqueton] **Microscope électronique à balayage,**
Technique de l'ingénieur PE 865.
- [Constantoudis 03] **V. Constantoudis, G.P. Patsis, A. Tserepi, et E. Gogolides,**
J. Vac. Sci. Technol. B 21(3), pp. 1019-1026, 2003.
- [Pargon 04] **E. Pargon,**
Thèse de l'université Joseph Fourier de Grenoble, 2004.

- [Patsis 03] **G.P. Patsis, V. Constantoudis, A. Tserepi, et E. Gogolides,**
J. Vac. Sci. Technol. B 21(3), pp. 1008-1018, 2003.
- [Petit 04] **J. Petit, P. Barritault, J. Hazart, P. Chaton, P. Boher1, M. Luet,
et T. Leroux,**
SPIE , Vol 5375, pp. 210-221, 2004.
- [Rugar 90] **D.Rugar et P.Hansma,**
Phys. Today 43, pp. 23-30, 1990.
- [Raymond 01] **C.J. Raymond,**
Handbook of Silicon Semiconductor Metrology, Editor A.C. Diebold,
Marcel Dekker Inc, 2001.
- [Tang 05] **J. Tang, G. Yang, Q. Zhang, A. Parhat, B. Maynor, J. Liu,
L. C. Chang, et O. Zhou,**
Nanoletters. Vol 5 (1), pp. 11-14, 2005.
- [Tortonese 93] **M. Tortonese, R.C. Barrett, et C.F.Quate,**
Appl. Phys. Lett 62 (8), pp. 834-836, 1993.
- [Yamaguchi 04] **A. Yamaguchi, K. Ichinose, S. Shimamoto, H. Fukuda, R. Tsuchiya,
K. Ohnishi, H. Kawada, et T. Iizumi,**
SPIE Vol 5375, pp. 468-476, 2004.
- [Yang 92] **P. Yang, Y. Chen, et M. Vaez-Iravani,**
J. Appl. Phys. 71, pp. 2499, 1992.
- [Villarubia 04] **J.S. Villarubia, A.E. Vladar, B.D. Bunday, et M. Bishop**
SPIE , Vol 5375, pp. 199-209, 2004.
- [Wolter 91] **O. Wolter, T. Bayer, et J. Greschner,**
J. Vac. Sci. Technol. B 9(2), pp. 1353-1357, 1991.
- [Wong 98] **S.S. Wong, A. T. Wooley, T. W. Odom, J. L. Huang, P. Kim,
D. V. Vezenov, et C. M. Lieber,**
Appl. Phys. Lett. 73 (23), pp. 3465-3467, 1998.
- [Wu 01] **C.H.J. Wu, W.S. Huang, K.J.R. Chen, C.N. Archie, et M.E. Lagus.**
Proc. SPIE, 2001.

Chapitre 3.

La rugosité de bord de la résine

Dans le but de suivre les prévisions de la loi de Moore, la dimension des motifs de résine en lithographie, doit diminuer, tout en conservant le même contrôle dimensionnel qu'auparavant, à savoir, une variation maximum de la dimension de la ligne de résine fabriquée de $\pm 8\%$. A ces dimensions, il devient difficile d'assurer ce contrôle dimensionnel. Un problème majeur est la part importante de la rugosité de bord de ligne de la structure de résine. Il convient donc de comprendre clairement les causes principales de ce phénomène afin de pouvoir le contrôler et ainsi le réduire. La première partie de ce chapitre est donc destinée à la compréhension des origines de la formation de la rugosité de bord d'une ligne de résine réalisée par lithographie optique.

Avec les techniques actuelles de fabrication en lithographie, les valeurs de rugosité de bord des motifs de résine ne répondent pas aux exigences requises. Dans la seconde partie de ce chapitre, nous avons donc tenté de réduire la rugosité de bord du motif en résine à l'aide de procédé de traitement par plasma. Dans un premier temps, nous avons étudié l'influence d'un plasma de gravure sur la rugosité de bord d'une ligne de résine. Pour cela, l'impact de l'aspect chimique et physique de la gravure par plasma a été examiné individuellement afin de mieux comprendre les mécanismes d'évolution de la rugosité de bord. Finalement, nous avons étudié l'impact d'un procédé couramment utilisé dans l'industrie pour le traitement de la résine.

3.1. Impact de l'étape de lithographie optique

En 2010, la lithographie doit être capable d'imprimer dans la résine un motif d'une dimension de 30 nm avec une rugosité de bord de 2.4nm [ITRS 05]. Or, avec les techniques actuelles de production en lithographie, il est difficile d'atteindre ces objectifs. Un problème majeur est la part importante de la rugosité de bord de ligne de la structure de résine dans ce budget de tolérance en dimension. Il convient donc comprendre clairement les origines de la rugosité de bord du motif de résine afin de pouvoir la contrôler et ainsi la réduire.

Dans cette partie, nous rappellerons tout d'abord le principe et les paramètres importants du procédé lithographique pour mieux appréhender le problème de la rugosité de bord. Par la suite, nous présenterons une revue de littérature sur les origines de la formation de rugosité de bord. Dans une seconde partie, nous avons vérifié certains résultats de la littérature sur la formation de rugosité de bord de la résine pour confirmer notre méthode de mesure de LWR et mieux comprendre les origines du phénomène.

3.1.1. Le procédé de lithographie optique par projection.

L'objectif du procédé de lithographie optique par projection est de transférer l'image d'un masque dans un film de résine préalablement déposé sur le substrat. L'outil d'exposition permet de générer l'image latente du masque dans la résine. Dans les parties de la résine qui ont reçu le flux d'exposition, le composé photosensible (PAG) contenu dans la résine libère un acide. Sous montée en température lors du recuit après exposition, cet acide diffuse à travers le film de résine et réagit avec la matrice polymère afin de modifier sa solubilité au développeur. En fin de réaction l'acide se régénère et peut poursuivre la modification de la solubilité de la matrice polymère. Après l'arrêt du recuit après exposition, le développement permet de dissoudre les parties de la résine solubles au développeur et révéler les motifs de résine qui sont la réplique du masque lithographique.

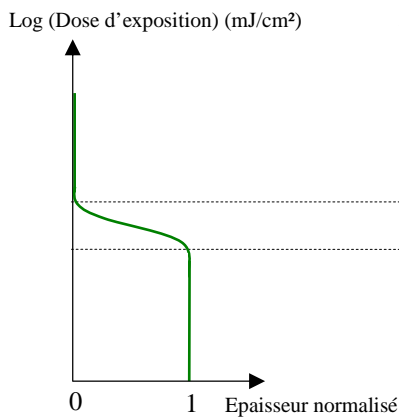
Dans la pratique, un procédé de lithographie est conventionnellement caractérisé par variation simultanée de la focalisation (déplacement de la position du foyer image de l'outil lithographique), et de la dose d'exposition (énergie incidente dans la résine qui contrôle la dimension des motifs). Cette caractérisation permet de définir la fenêtre de procédé qui correspond à la plage de focalisation et de dose dans laquelle les CDs obtenus correspondent aux spécifications prédéfinies. Idéalement, cette fenêtre de procédé doit être la plus grande possible afin de minimiser la sensibilité du procédé à d'autres paramètres tels que la planéité du substrat ou l'inhomogénéité en épaisseur de la résine sur la plaque. Or, la miniaturisation des dimensions s'accompagne d'une diminution de la fenêtre de procédé. En effet, à ces dimensions une faible défocalisation de l'outil lithographique (déplacement de la position du foyer image) joue beaucoup sur le profil des motifs [Mortini 01] et augmente la sensibilité à d'autres erreurs du procédé. De la même façon, une faible erreur en dose d'exposition, dégrade les motifs de résine et peut rendre les CDs obtenus hors spécifications. D'un point de vue technologique, il devient donc difficile de contrôler les CDs lorsqu'on diminue la résolution. Pour contourner ces contraintes, les lithographes jouent également sur d'autres paramètres intervenant dans le processus d'imagerie, tel que la résine et son mécanisme réactionnel.

3.1.2. Etat de l'art sur les origines de la rugosité de bord

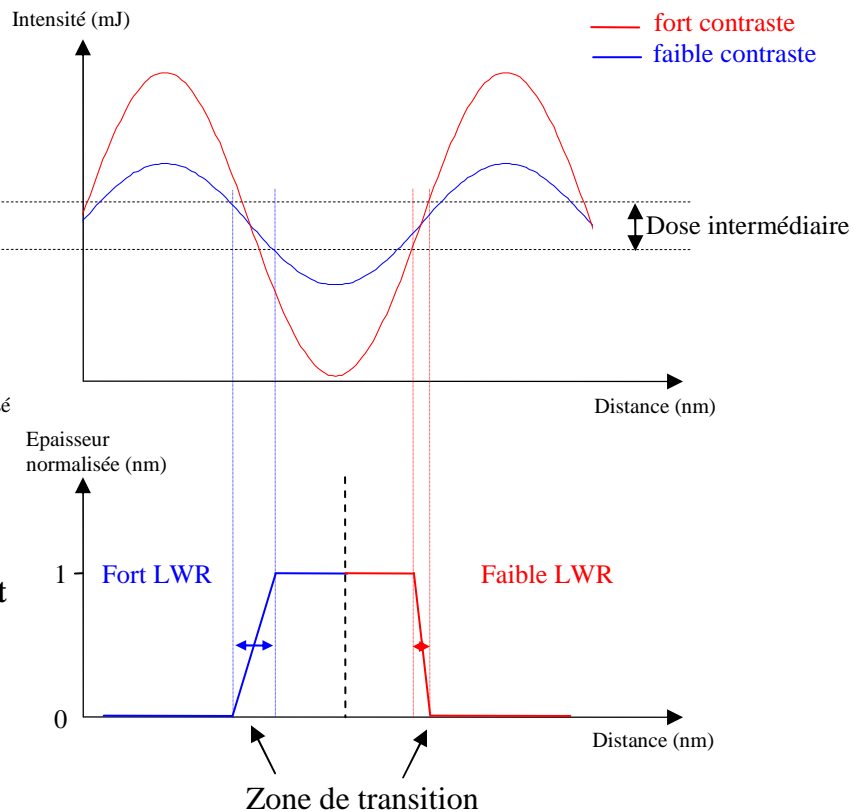
Depuis ces dix dernières années, la formation de la rugosité de bord de ligne en lithographie a fait l'objet de nombreux articles. Plusieurs facteurs ont montré leur impact sur la rugosité de bord de ligne. Ceux-ci peuvent être divisés en deux parties : ceux provenant du système lithographique, et ceux provenant de la résine et son mécanisme réactionnel.

La rugosité initiale du masque lithographique [Reynolds 99], la fluctuation statistique en dose, plus communément appelée « shot noise » en anglais [Rau 98, Leunissen 05, Kotera 05] et la qualité du profil de l'image aérienne [Ma 03, Shin 01, Shin 02, Yamaguchi 04^b], ont été discuté comme des facteurs reliés au système lithographique. En lithographie optique, il a été montré que la qualité du profil de l'image aérienne était un paramètre très influent sur la rugosité de bord [Hinsberg 98, Shin 01]. Le schéma de la figure 3-1 démontre l'effet de la qualité de l'image aérienne du système lithographique sur la rugosité de bord du motif de résine fabriqué.

a) Courbe de contraste de la résine



b) Image aérienne de l'outil d'exposition



c) Motif de résine après développement

Figure 3-1 : Définition de la zone de transition. a) courbe de contraste d'une résine à amplification chimique, b) image aérienne de l'outil d'exposition dans la résine, c) motif de résine après développement

La figure 3-1a) montre la courbe de contraste d'une résine positive à amplification chimique. Cette courbe représente l'épaisseur restante de résine après développement en fonction de la dose d'exposition appliqué à la résine. Pour des faibles doses, la résine est insoluble au développeur. Pour des fortes doses, la résine est déprotégé et devient soluble au développeur. Dans la région de doses intermédiaires, entre les doses extrêmes, l'épaisseur de

Chapitre 3 : La rugosité de bord de la résine

la résine varie linéairement avec le logarithme de la dose. C'est la pente de cette courbe qui donne le contraste de la résine. Il est généralement assez grand de sorte qu'une faible variation de dose fait passer la résine d'un état insoluble à un état soluble.

La figure 3-1b) correspond à la répartition spatiale de l'intensité lumineuse projetée sur le film de résine lors de l'insolation (image aérienne). Elle montre la relation entre la zone de transition définie par la courbe de contraste et le motif de résine après développement. Les régions de la résine insolées avec une forte intensité deviennent solubles tandis que celle exposées à une faible intensité restent insolubles. Dans la zone de transition, la solubilité n'est pas homogène et des effets statistiques interviennent tels que le phénomène de diffusion de l'acide photogénéré ou la répartition spatiale des chaînes de polymères déprotégées. Ces inhomogénéités au niveau du bord du motif de résine après développement peuvent expliquer la formation de la rugosité de bord. Nous reviendrons sur ces problèmes d'inhomogénéité dans la suite de cette revue de littérature.

La figure 3-1c) montre l'influence du contraste de l'image aérienne (AIC) sur la taille de la zone de transition et donc sur la rugosité de bord de ligne du motif de résine. Le contraste de l'image aérienne, AIC, est défini par la formule suivante :

$$AIC = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_{\max} + D_{\min}} \times 100$$

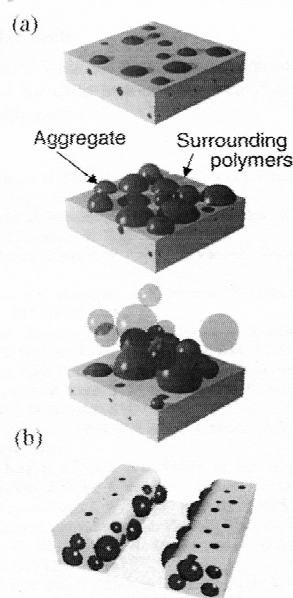
Dans le cas d'une image aérienne à fort contraste (courbe rouge), la zone de transition est faible car la pente au niveau de la dose intermédiaire est grande. Au contraire, dans le cas d'une image aérienne à faible contraste (courbe bleu) où la pente au niveau de la dose de développement de la résine est faible, la zone de transition concerne une plus grande étendue spatiale et donc une plus grande distance sur laquelle les effets statistiques peuvent intervenir. Ceci a pour conséquence d'augmenter la rugosité de bord du motif de résine [Hinsberg 98, Shin 01]. Ces résultats montrent bien que la qualité de l'image aérienne est un paramètre très influent sur la rugosité de bord d'une ligne de résine.

En revanche, même si la contribution du système lithographique est supprimée, des effets statistiques provenant de la résine et de son mécanisme réactionnel peuvent participer à la formation de la rugosité de bord. Des études ont examiné la relation entre la rugosité de bord et la taille des agrégats de polymère [Yamaguchi 97, Namatsu 98, Yamaguchi 03]. Il a été démontré que des agrégats de polymères sont naturellement contenus dans la plupart des films de résine commerciale [Namatsu 98, Yamaguchi 03]. Ces agrégats apparaissent à la surface et sur les flancs du motif de résine après développement. Yamaguchi propose alors un modèle pour expliquer l'apparition des agrégats de polymère sur les flancs du motif de résine, figure 3-2.

Ce modèle est basé sur la différence du taux de dissolution à l'intérieur et à l'extérieur des agrégats du fait de leur différence de densité. Lors du développement, le polymère environnant se dissout rapidement, laissant apparaître les agrégats. Une fois que le polymère environnant est complètement dissout, les agrégats sont extraits du film de résine. Mais quand seulement une partie du polymère environnant est dissout, les agrégats restent sur le flanc du motif et créent ainsi la rugosité de bord. Dans le but d'obtenir un motif de résine avec une très faible rugosité de bord, les agrégats de polymère doivent donc avoir une taille minimale [Namatsu 98]. Or, Yamaguchi montre que la taille des agrégats est fortement dépendante du poids moléculaire du polymère [Yamaguchi 97]. Par conséquent, une résine avec un faible poids moléculaire semble donc être essentielle pour obtenir un motif de résine qui présente une faible rugosité de bord [Yoshimura 93, Shiraishi 94, Yamaguchi 04^b]. Outre le poids moléculaire du polymère, la polydispersité de la résine qui correspond à la distribution en taille des chaînes de polymères dans la résine, peut également jouer un rôle. En effet, un polymère avec une faible polydispersité (les chaînes de polymère ont la même taille)

Chapitre 3 : La rugosité de bord de la résine

permettrait une meilleure homogénéité du développement [Yoshimura 93]. Par ailleurs, Yamaguchi indique que des molécules de développeur de taille inférieure aux agrégats de polymère permettraient un développement plus uniforme de la résine et donc une réduction de la rugosité de bord [Yamaguchi 03]. D'autres articles ont également étudiés cette interaction entre la résine et le développeur afin de comprendre les origines de la rugosité de bord [Reynolds 99, Yamaguchi 04^a, Hasko 00, Fukuda 03, Ma 03, Yasin 04].



**Figure 3-2 : a) modèle illustrant l'extraction des agrégats lors du développement
b) le motif final [Yamaguchi 03]**

Par ailleurs, dans le mécanisme de formation du motif de résine, le phénomène de diffusion de l'acide est essentiel. Or, celui-ci s'effectue dans toutes les directions de l'espace de manière aléatoire. Au niveau du bord du motif, ce caractère statistique de la diffusion pourrait être une des causes de l'origine de la rugosité de bord. Des études ont été menées sur cette relation entre la rugosité et le phénomène de diffusion de l'acide qui dépend des propriétés de la résine (taille du PAG, taille des chaînes de polymères) et des conditions du procédé lithographique (temps et température du recuit après exposition) [Yoshizawa 02, Kotera 02, Fukuda 03, Leunissen 05, Patsis 05, Saeki 06]. Différentes études ont montré qu'une augmentation de la longueur de diffusion de l'acide résulte en une diminution de la rugosité de bord de ligne. [Ercken 04, Van Steenwickel 05, Leunissen 05, Foucher 06]. Cependant, dans le cas des résines à amplification chimique de tonalité négative, une longueur de diffusion importante n'est pas souhaitable puisqu'elle dégrade la résolution. Dans ce cas, il s'agit donc de trouver un compromis entre rugosité de bord et résolution.

D'après les résultats de ces différentes études, il apparaît que la formation de la rugosité de bord est un problème complexe dont les causes proviennent à la fois du système lithographique et de la résine en elle-même. Or, ces deux facteurs dépendent l'un de l'autre, il est alors difficile expérimentalement de dissocier l'influence de chacun d'eux. Néanmoins, nous avons voulu confirmer expérimentalement certains résultats de la littérature sur l'influence de paramètres du système lithographique sur la rugosité de bord.

3.1.3. Étude expérimentale

A l'aide du CD-AFM, nous avons examiné l'influence sur la rugosité de bord de la résine, de paramètres liés à un outil de lithographie par projection : dose d'exposition, focus et taille du masque lithographique.

3.1.3.1. Protocole expérimental

L'outil de lithographie optique par projection utilisé pour cette étude est un équipement de la société STMicroelectronics, qui permet une insolation à une longueur d'onde de 193nm sur des plaques de 200mm.

Les résines photosensibles, actuellement utilisées dans l'industrie de la microélectronique, pour la réalisation de motif de dimensions inférieures à 100 nm, sont des résines à amplification chimique sensibles à la longueur d'onde de 193 nm, appelé résine ArF. La résine utilisée pour cette étude est une résine ArF de tonalité positive et d'une épaisseur d'environ 260 nm. Le masque lithographique employé est constitué de 30 puces. Sur chaque puce se trouve une zone réservée à la métrologie, constituée de lignes denses et isolées de différentes dimensions, variant de 80 à 160 nm, sur lesquelles nous avons réalisées nos études.

Les mesures dimensionnelles des lignes de résine ont été effectuées par CD-AFM. Pour déterminer le CD et le LWR, nous avons appliqué le protocole de mesure décrit dans le chapitre 2, à savoir, 100 lignes de mesure intégrées sur une distance de 2 μ m avec une pointe de 50nm de diamètre. Les mesures de CD et de LWR données dans cette partie, correspondent aux mesures au milieu du motif de résine.

3.1.3.2. Influence de la dose d'exposition

Comme mentionné dans la section 3.1.1, un procédé lithographique est par convention caractérisé par une variation simultanée du focus et de la dose d'exposition. En pratique, cette caractérisation est réalisée sur une plaque, nommée matrice expo-dose, sur laquelle chaque puce de la plaque est insolée à une dose et un focus différents. Pour cette étude, nous avons utilisé une plaque de ce type, sur laquelle nous avons mesuré à l'aide du CD-AFM, une ligne de dimension visée 160nm pour différentes doses d'exposition à un même focus. La figure 3-3 montre les résultats des mesures de CD et de LWR obtenus.

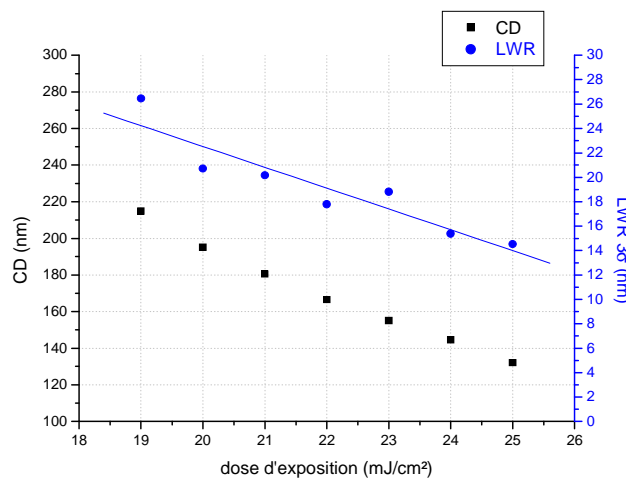


Figure 3-3 : Evolution du CD et de LWR à 3 σ en fonction de la dose d'exposition

Chapitre 3 : La rugosité de bord de la résine

Nous remarquons qu'une hausse de la dose d'exposition entraîne une diminution de la dimension de la résine et une baisse de LWR. Ces deux observations peuvent être expliquées par la répartition spatiale de l'intensité lumineuse reçue dans la résine (image aérienne). La figure 3-4 présente une simulation de l'image aérienne pour deux doses d'exposition. Cette simulation montre bien qu'une augmentation de la dose d'exposition entraîne une baisse du CD. En effet, le fait d'augmenter la dose d'exposition diminue l'étendue spatiale de l'intensité de lumière transmise sous le masque. Concernant la rugosité de bord de ligne nous remarquons qu'une augmentation de la dose d'exposition accentue la pente de l'image aérienne au niveau de la dose de développement de la résine. Comme mentionné dans la section 3.1.2, cet effet entraîne une augmentation de la taille de la zone de transition dans laquelle les effets statistiques interviennent, ce qui expliquerait la hausse de LWR. D'après ce résultat, nous confirmons bien que la qualité de l'image aérienne de l'outil lithographique est un paramètre très influent sur la rugosité de bord de la résine.

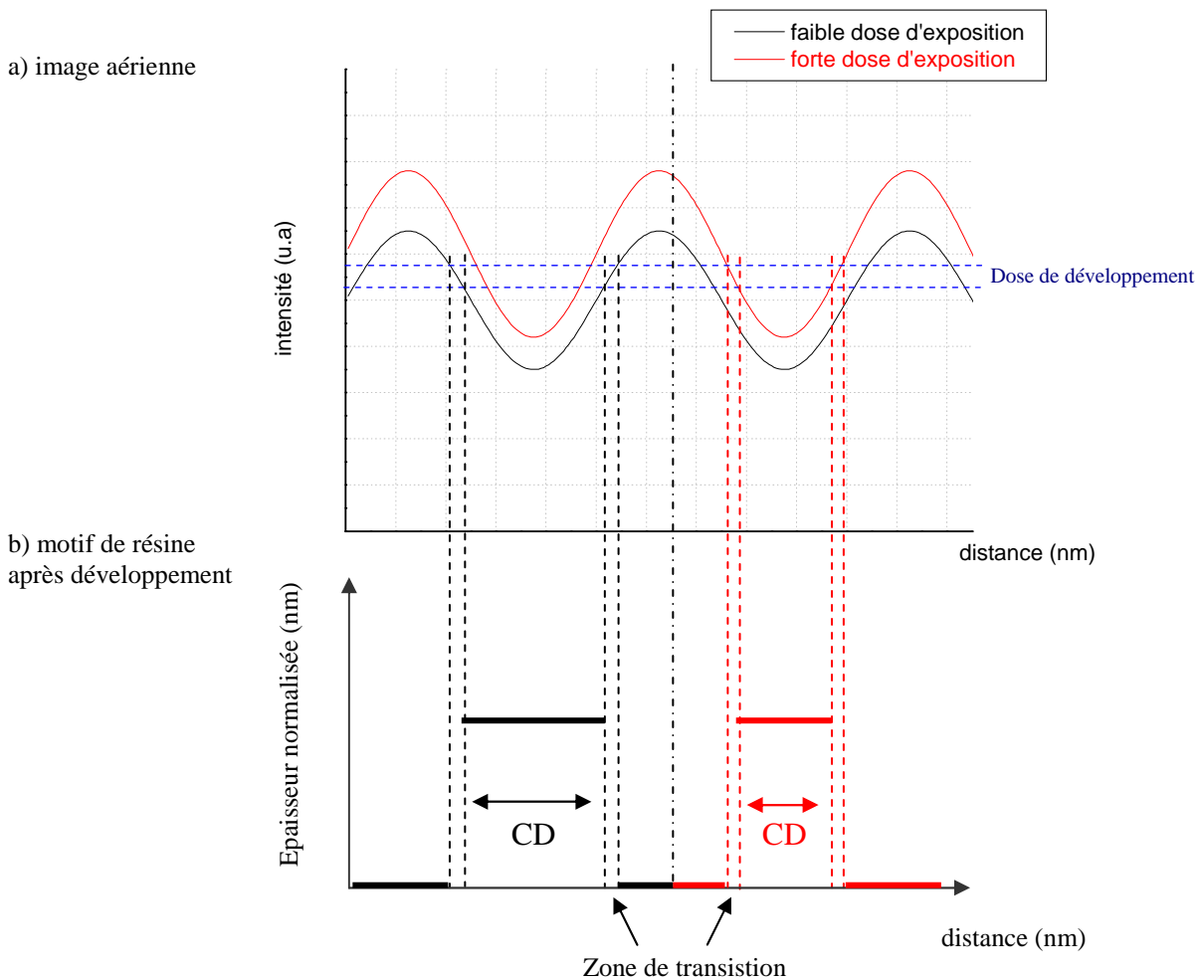


Figure 3-4 : a) Simulation de l'image aérienne pour deux doses d'exposition, b) motif de résine de après développement pour deux doses d'exposition

3.1.3.3. Influence du focus

A partir de la plaque expo dose, utilisée pour l'étude sur la dose d'exposition, nous avons également examiné l'influence du focus sur la rugosité de bord de la résine pour une ligne de dimension visée de 160 nm. La figure 3-5 montre les résultats des mesures de CD et de LWR obtenus pour différents focus à une même dose d'exposition.

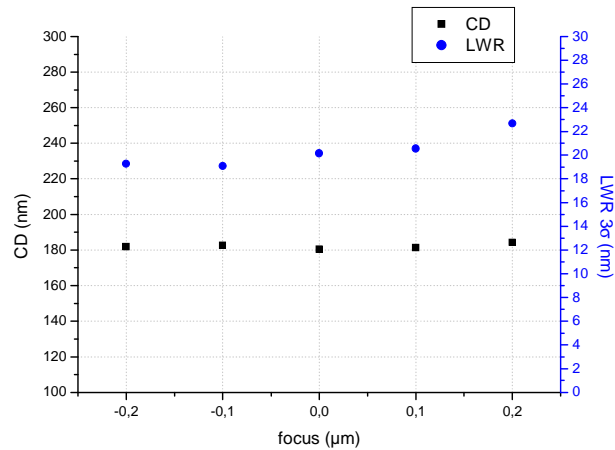


Figure 3-5 : Evolution du CD et de LWR à 3σ en fonction du focus

Nous remarquons que dans cette gamme de focus, le CD est constant. En revanche, nous notons une légère augmentation de LWR. Comme pour la dose d'exposition, le focus agit également sur la qualité de l'image aérienne. Cette remarque démontre à nouveau l'importance de l'image aérienne dans la formation de la rugosité de bord.

3.1.3.4. Influence de la taille du masque

Lors des expériences présentées dans la partie suivante (cf : chapitre 3, section 3.2), plusieurs dimensions de ligne visées (80, 100, 120 et 160nm) ont été mesurées. Ces dimensions visées sont définies par la taille du masque lithographique. La figure 3-6 présente les résultats de LWR en fonction du CD mesuré pour les quatre dimensions visées. Le nombre de points pour chaque dimension correspond à la mesure de différentes plaques du même lot.

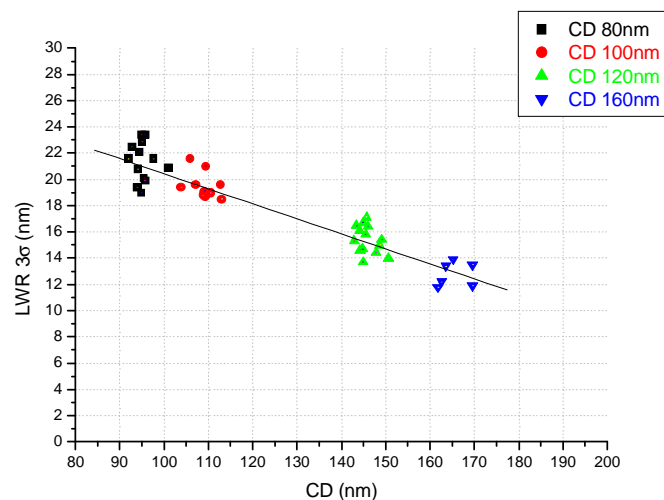


Figure 3-6 : Evolution de LWR à 3σ suivant la dimension de la ligne de résine fabriquée

Chapitre 3 : La rugosité de bord de la résine

Nous remarquons sur la figure 3-7 qu'une diminution de la taille du masque entraîne une augmentation de LWR du motif de résine. A l'aide d'un logiciel de simulation, nous avons simulé l'image aérienne d'un outil d'exposition à une longueur d'onde de 193nm pour différentes tailles de masque, figure 3-7.

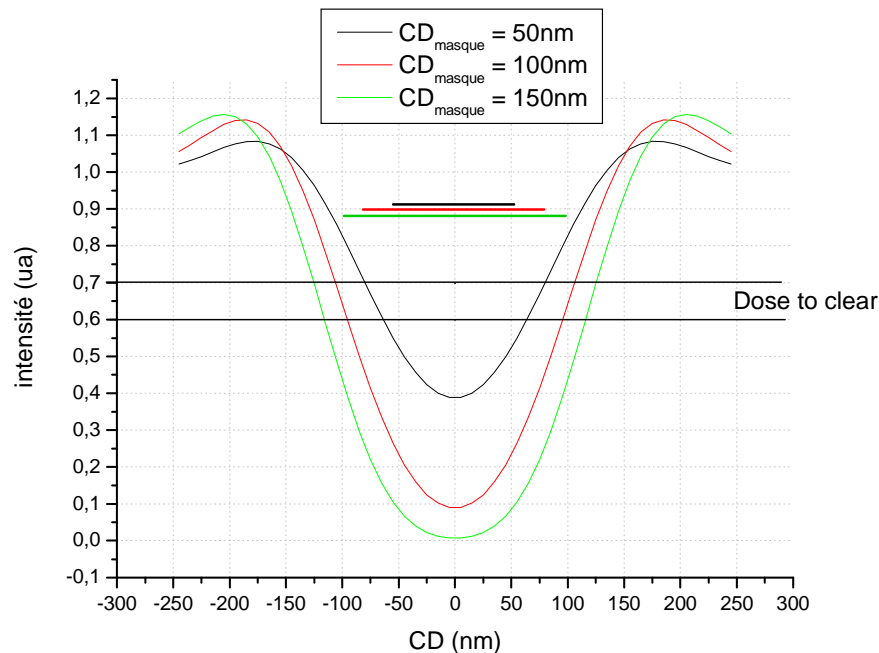


Figure 3-7 : Simulation de l'image aérienne pour différentes tailles de masque

Pour une insolation à une longueur d'onde de 193 nm et une taille de masque inférieure à cette longueur d'onde, les phénomènes de diffusion de la lumière augmentent l'intensité de la lumière transmise dans la résine sous le masque [Williamson 04]. Ceci a pour effet d'accentuer la pente de l'image aérienne au niveau de la dose de développement et donc d'augmenter l'étendue spatiale de la zone de transition. Comme pour la dose d'exposition et le focus, cette simulation confirme bien que la qualité de l'image aérienne est un paramètre très important dans la formation de la rugosité de bord du motif de résine.

Finalement, à l'aide des résultats de cette étude expérimentale, nous avons confirmé que la qualité de l'image aérienne qui définit la zone de transition dans laquelle des effets statistiques interviennent est un paramètre très important dans la formation de la rugosité de bord du motif de résine. Par ailleurs, ces résultats qui sont cohérents avec la littérature [Hinsberg 98, Shin 01] nous ont permis de vérifier les capacités de notre protocole expérimental avec le CD-AFM.

3.1.4. Conclusion

D'après les résultats de ces différentes études, nous constatons que les origines de la rugosité de bord de ligne est un problème complexe, dont les causes proviennent à la fois du système lithographique et de la résine en elle-même. Or, ces deux facteurs sont dépendant l'un de l'autre, il est alors difficile expérimentalement d'examiner individuellement l'influence de chacun d'eux. Néanmoins, d'après les différents travaux menés sur le sujet et les résultats de nos expériences, les paramètres les plus influents semblent être :

Chapitre 3 : La rugosité de bord de la résine

- La qualité de l'image aérienne de l'outil lithographique qui définit l'étendue spatiale de la zone de transition dans laquelle intervient des effets statistiques.
- Le phénomène de diffusion de l'acide dans la résine
- La taille et la répartition des agrégats de polymère contenus dans la résine.

Dans le but d'obtenir des motifs de résine présentant la plus faible rugosité de bord possible, il semble donc nécessaire d'avoir un contraste d'image aérienne de l'outil d'exposition maximale afin que l'étendue spatiale de la zone de transition soit minimale, de limiter le phénomène de diffusion de l'acide dans la résine et que la taille des agrégats de polymère contenus dans la résine soient la plus petite possible et la même pour chaque agrégat.

En revanche, les valeurs de rugosité de bord actuellement obtenues avec les résines ArF sont encore nettement supérieures aux exigences requises. Des études sur le sujet sont donc encore nécessaires pour clairement comprendre les origines du phénomène et obtenir des motifs de résine qui répondent à ces contraintes. Pour relever ce défi technologique, il semble aujourd'hui indispensable d'utiliser le CD-AFM comme moyen de caractérisation.

Malgré ces valeurs élevées de LWR après lithographie, est-il possible de réduire la rugosité de bord du motif de résine par un traitement plasma ? Et si oui, de quelle manière un procédé plasma influence-t-il la rugosité de bord du motif de résine ? C'est à ces questions que nous avons tenté de répondre dans la seconde partie de ce chapitre.

3.2. Impact d'un procédé plasma sur la rugosité de bord de la résine

La gravure par plasma est basée sur une synergie ions/neutres [Coburn 79]. En effet, elle met en jeu deux types de gravure aux effets complémentaires :

- ✓ La gravure chimique qui correspond à l'action des espèces neutres du plasma,
- ✓ La gravure physique qui est régie par le bombardement énergétique et directionnel des ions.

La gravure plasma étant une synergie de ces deux types de gravure, il est important de connaître l'impact de ces deux aspects sur la rugosité de bord d'une ligne de résine afin de mieux comprendre les mécanismes de transfert.

Dans un premier temps, nous avons examiné indépendamment l'impact de l'aspect chimique et physique de la gravure par plasma sur la rugosité de bord du motif de résine. Dans une seconde partie, nous avons étudié l'impact de deux procédés industriels intervenant avant la gravure même de la grille : le traitement de la résine et la réduction de la cote résine.

3.2.1. Protocole expérimental

Toutes les expériences ont été effectuées sur des plaques de 200mm de diamètre. Cette étude a été réalisée sur des lignes isolées de résine ArF insolées à une longueur d'onde de 193nm, de dimensions 100 et 150nm et, d'environ 260nm d'épaisseur. Pour les besoins de la lithographie, la résine a été déposée sur une couche anti-réfléctive organique, appelée BARC (Bottom Anti Reflective Coating), de 80nm d'épaisseur.

La gravure des échantillons a été réalisée dans un réacteur plasma haute densité [Marks 93], nommé DPS, placé dans un bâti de gravure industriel de la société Applied Materials, nommé 5200 [Pan 97, Ma 98]. Pour des informations plus détaillées sur le réacteur de gravure DPS et sur la plate forme 5200, le lecteur pourra se référer à la thèse d'Erwine Pargon [Pargon 04].

Les mesures dimensionnelles de ces lignes ont été effectuées par CD-AFM et CD-SEM. La mesure du profil du motif de résine avec le CD-AFM nous a permis de déterminer le CD, le LWR et la hauteur totale des lignes de résine avant et après gravure. Suivant l'information que nous souhaitions obtenir, nous avons appliqué deux protocoles de mesures différents. Le CD et le LWR ont été mesurés à l'aide d'une pointe d'une longueur de 200nm et de 50nm de diamètre avec laquelle nous avons appliqué, pour chaque mesure, 100 lignes de scan intégrées sur 2 μ m. La faible longueur de ces pointes (200nm) ne permet pas de mesurer l'épaisseur totale des lignes de résine d'environ 260nm. Nous avons alors utilisé une pointe de 500nm de longueur et de 120nm de diamètre, avec laquelle nous avons appliqué 10 lignes de mesures sur 2 μ m, pour déterminer la hauteur totale du motif.

La couche de BARC sous la résine est d'une nature chimique très proche de la résine (polymère carboné). Les chimies de plasmas qui gravent la résine, ne sont donc pas sélectives vis-à-vis de cette couche sous jacente et la gravent également. Dans le but de mesurer des vitesses de gravure latérale et verticale via le CD-AFM, il est important de faire coïncider verticalement le profil AFM des lignes après gravure avec celui obtenu après lithographie (cf. figure 3-8). Pour cela, il est nécessaire de connaître la position de l'interface BARC- résine (hauteur référence) sur le profil après gravure. Or, les mesures en CD-AFM ne permettent pas de distinguer la nature des matériaux. Pour pallier ce problème, des coupes du profil des lignes après gravure ont été observées au MEB. Ces images révèlent l'épaisseur de BARC gravé (noté h dans la figure 3-8) et permettent ainsi d'ajuster en hauteur la position du profil

Chapitre 3 : La rugosité de bord de la résine

AFM après gravure par rapport à celui obtenu après lithographie. Les vitesses de gravure sont alors simplement obtenues par les formules suivantes :

$$V_{laterale} = \frac{CD_{litho} - CD_{gravure}}{temps\ de\ gravure}$$

$$V_{verticale} = \frac{e_{resine\ litho} - e_{resine\ gravure}}{temps\ de\ gravure}$$

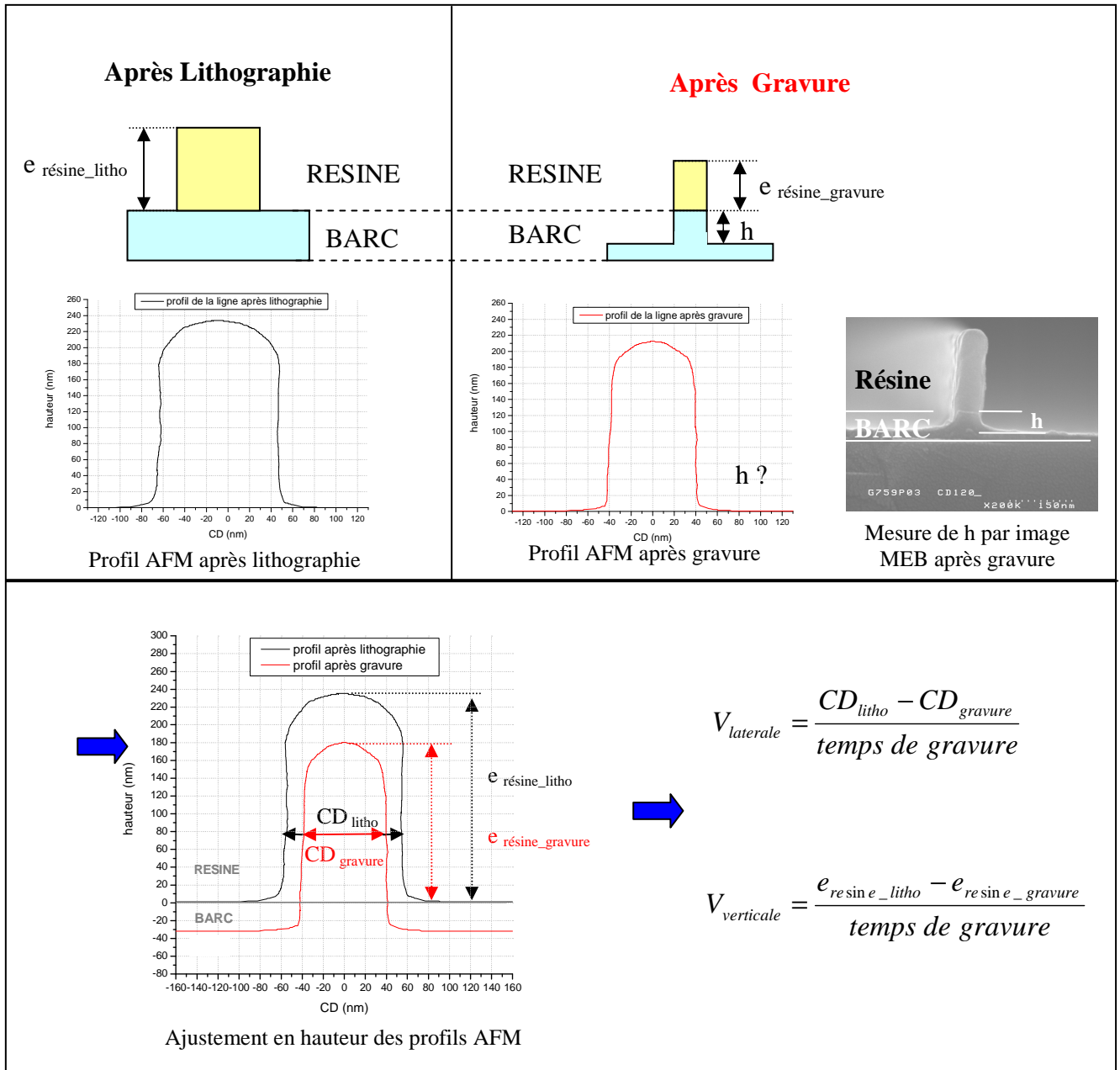


Figure 3-8 : Schéma du protocole de mesure des vitesses de gravure latérale et verticale par CD-AFM.

Dans cette section, le LWR obtenu par CD-AFM, a été mesuré à plusieurs hauteurs de la ligne de résine, comme l'illustre la figure 3-9. La valeur de LWR donnée correspond à la moyenne des LWR mesurés à plusieurs hauteurs sur la ligne, à savoir tous les 20nm. Dans le calcul de la valeur moyenne de LWR, nous n'avons pas pris en compte les valeurs de LWR correspondant au facétage de la résine (arrondi en haut du motif) et au pied du motif du fait de leurs valeurs élevées qui ne sont pas représentatives de LWR global de la ligne, figure 8. En

Chapitre 3 : La rugosité de bord de la résine

effet, au niveau du facétage de la résine, la pointe AFM ne peut donner une estimation précise du CD et donc de LWR, ce qui entraîne des mesures élevées de LWR. De par la forme de la pointe et son amplitude d'oscillation verticale, la pointe AFM ne peut pas également donner une mesure précise du CD et donc de LWR dans la partie basse du motif (<40nm). Sur les différents graphiques de ce chapitre montrant le LWR à plusieurs hauteurs sur la ligne, les points de mesures indiqués correspondent à ceux utilisés pour le calcul de la valeur moyenne de LWR.

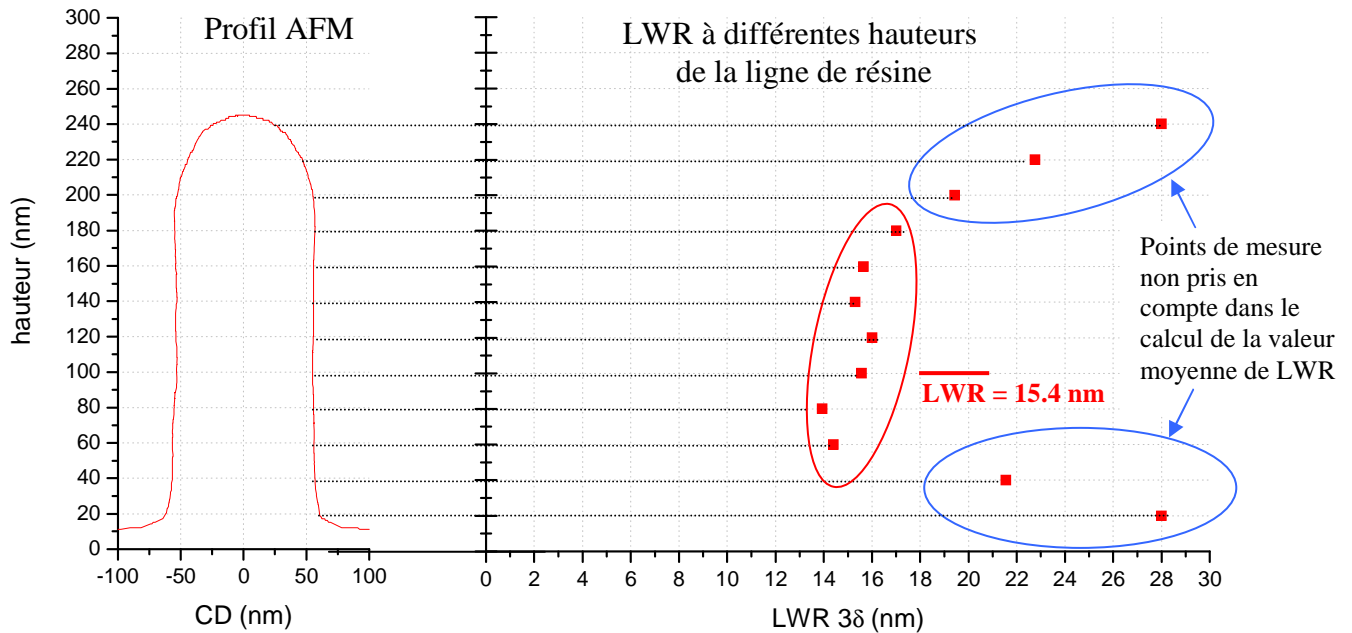


Figure 3-9 : Exemple de la mesure de LWR à différentes hauteurs de la ligne de résine

Pour les mesures en CD-SEM, les valeurs de CD et de LWR sont données à partir des résultats du logiciel d'analyse de contraste de l'image, intégré au *YOSEMITE*, où le niveau de seuil est placé de 90% de l'intensité maximale du signal (cf. chapitre.2, section 2.3.1.2).

3.2.2. Aspect chimique de la gravure plasma

Dans un premier temps, nous avons étudié l'impact de l'aspect chimique du plasma de gravure sur la rugosité de bord initiale du motif de résine. Il est connu depuis les années 80 que les polymères carbonés comme la résine peuvent être gravés par plasma d'oxygène. En effet, la réactivité de l'oxygène atomique vis-à-vis des chaînes carbonées, conduit à la formation de produits de gravure volatils et stables du type CO, CO₂, H₂O par oxydation du polymère. Cette réaction de gravure spontanée est complètement indépendante de l'action du bombardement ionique. La gravure de la résine par un plasma d'O₂ est donc une gravure essentiellement chimique. La résine peut également être gravée chimiquement par plasma de gaz fluoré (CF₄ ou SF₆) [Cain 86]. La réactivité du fluor atomique vis-à-vis de chaînes carbonées entraîne la formation de produits de gravure volatils tel le HF ou CF₄. Néanmoins, cette réactivité est nettement moins importante que celle de l'oxygène atomique, conduisant à des vitesses de gravure plus lente. Finalement, il est connu que des dépôts réalisés par plasma à base de fluorocarbone sont principalement contrôlés par la densité et la composition des neutres du plasma, autrement dit par l'aspect chimique du plasma [Takada 00]. Il semble

Chapitre 3 : La rugosité de bord de la résine

donc intéressant d'examiner l'influence de ce type de plasma de dépôt sur la rugosité de bord de ligne initiale des motifs de résine.

Pour cette étude, des lignes isolées de résine ArF ont été exposées à ces différentes chimies de plasma qui interagissent chimiquement avec la résine (O_2 , SF_6 et CH_2F_2). Dans toutes les expériences, la quantité de gaz introduite a été maintenue constante et égale à 100sccm, la pression totale à 10 mTorr, la puissance source à 300W et la puissance d'auto polarisation nulle afin de minimiser l'action des ions du plasma sur la résine.

3.2.2.1. Plasma en O_2

L'étude de l'influence d'un plasma d'oxygène sur la rugosité de bord de ligne initiale de la résine a été réalisée pour deux temps d'exposition au plasma, l'un de 7s et l'autre de 15s. L'oxygène atomique étant très réactif vis-à-vis de la résine, un plasma de quelques secondes est suffisant pour graver plusieurs dizaines de nanomètres de résine. La figure 3-10 montre la reconstitution de l'évolution du profil moyen d'une ligne de résine avant et après gravure. Ceci nous permet de calculer la vitesse de gravure latérale, $V_{lat} = 5 \pm 0.2$ nm/s et verticale, $V_{vert} = 3.6 \pm 0.1$ nm/s.

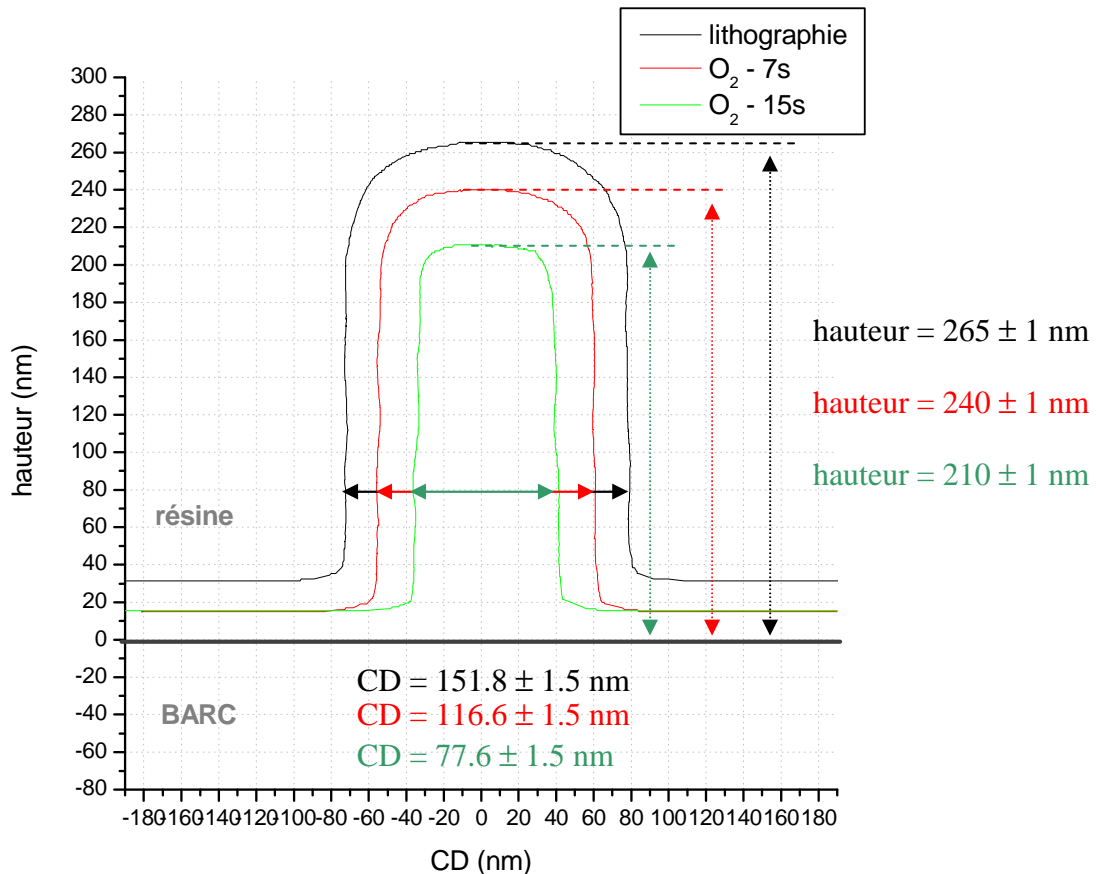


Figure 3-10 : Reconstitution de l'évolution du profil AFM d'une ligne de résine avant et après plasma d' O_2 de 7s et 15s .

La figure 3-11 montre les mesures de LWR par CD-AFM prises à plusieurs hauteurs sur la ligne, avant et après gravure. Nous remarquons que le LWR moyen sur la hauteur du motif après lithographie est égale au LWR moyen après gravure et ce pour les deux temps d'exposition au plasma. Cette tendance est également confirmée par les mesures effectuées au

Chapitre 3 : La rugosité de bord de la résine

CD-SEM, figure 3-12, qui indiquent une égalité des valeurs de LWR avant et après gravure. En revanche, nous constatons une différence de valeurs de LWR entre les mesures par CD-AFM (LWR = 14nm) et par CD-SEM (LWR ≈ 10nm). Cette différence peut être expliquée par le fait que la mesure en CD-SEM ne prend pas en compte le profil de la structure. Finalement, la gravure de la résine par plasma d'O₂ ne semble pas conduire à un lissage de la rugosité de bord de ligne.

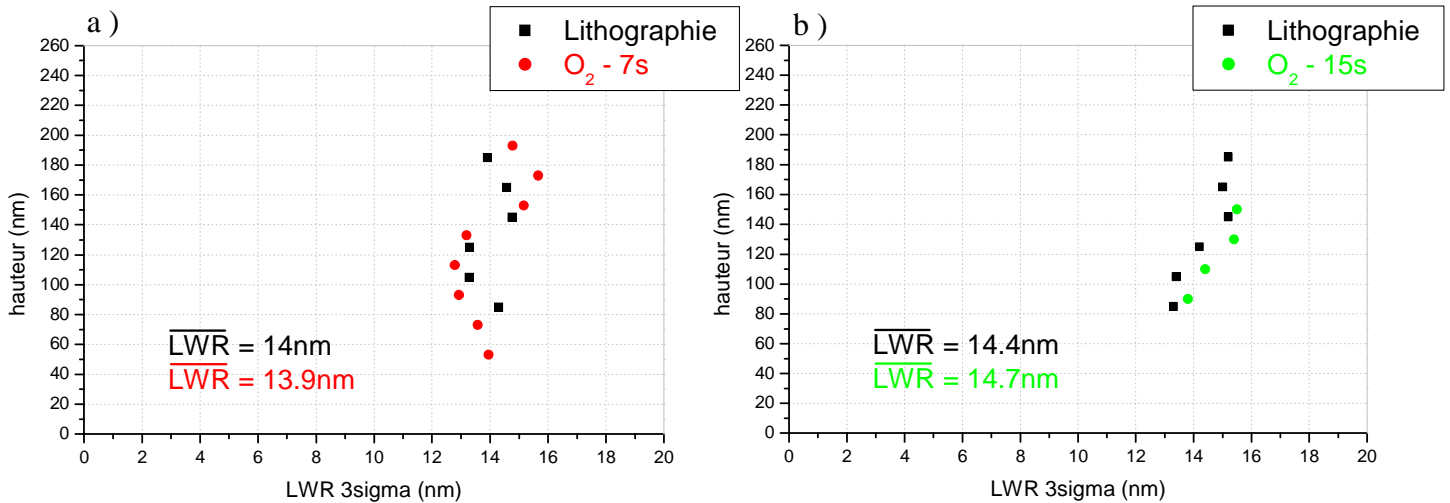


Figure 3-11 : Evolution de LWR à 3σ à différentes hauteurs sur le motif, a) après plasma O₂ de 7 s, b) après plasma O₂ de 15s.

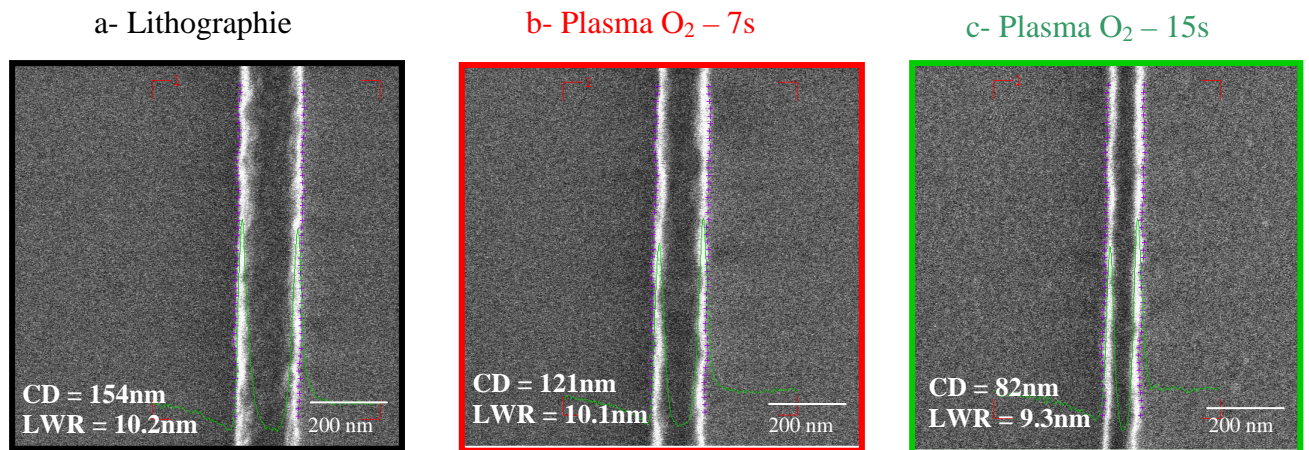


Figure 3-12 : Mesure CD-SEM de la même ligne de résine, a- après lithographie, b- après plasma O₂ de 7 secondes, c- après plasma O₂ de 15 secondes

Un agrandissement du flanc gauche du profil moyen de la résine avant et après gravure est présenté sur la figure 3-13.

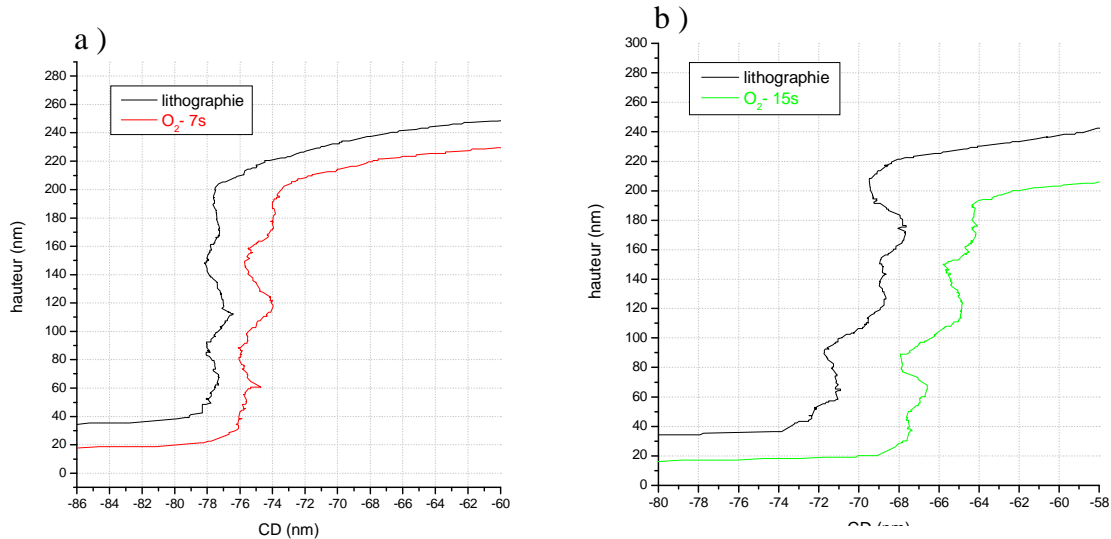


Figure 3-13 : Agrandissement du flanc gauche du profil moyen de la résine : a) Après plasma d'O₂ de 7s, b) Après plasma d'O₂ de 15s.

Nous observons que des rugosités périodiques sont présentes sur le flanc du motif de résine après lithographie. Leur période est d'environ 60nm et leur amplitude d'environ 1,5nm. Ces rugosités sont probablement dues aux ondes stationnaires générées dans le film de résine suite aux interférences résultantes de l'interaction entre la lumière incidente et la lumière réfléchi par le substrat. Les ondes stationnaires induites correspondent à une distribution périodique de l'intensité lumineuse dans l'épaisseur du film de résine de période [Mack 94] :

$$\text{période} = \frac{\lambda}{2n}$$

- λ = Longueur d'onde d'insolation
- n = Indice optique du matériau

Après développement de la résine, ce phénomène fait alors apparaître sur les flancs du motif une rugosité périodique dont la période correspond à celle des ondes stationnaires. Dans notre cas, où $\lambda = 193\text{nm}$ et $n \approx 1,7$ la période des ondes stationnaires est environ égale à 57nm. Nous remarquons que cette valeur est quasi identique à la période mesurée. Cette égalité nous suggère donc que la rugosité périodique présente sur le flanc du motif de résine après lithographie est due aux ondes stationnaires. Après gravure, cette rugosité périodique se retrouve également sur le flanc de la ligne de résine. Cette remarque conforte l'idée que la gravure de la résine par plasma d'O₂ transfère fidèlement la rugosité initialement présente sur les flancs de la résine.

D'après ces résultats, nous pouvons donc en conclure que la gravure de la résine par plasma d'O₂ ne conduit pas à un lissage de la rugosité de bord de ligne mais à un transfert fidèle de celle-ci.

3.2.2.2. Plasma en SF₆

L'étude de l'influence d'un plasma de SF₆ sur la rugosité de bord de ligne initiale de la résine a été réalisée pour un temps d'exposition au plasma de 20s. La figure 3-14 montre l'évolution du profil moyen de la résine avant et après gravure. Ceci nous permet de calculer la vitesse de gravure latérale, $V_{\text{lat}} = 0.9 \pm 0.15\text{nm/s}$, et verticale, $V_{\text{vert}} = 0.5 \pm 0.1\text{nm/s}$. Nous

Chapitre 3 : La rugosité de bord de la résine

remarquons que les vitesses de gravure en plasma de SF₆ sont nettement inférieures à celles en plasma d'O₂, confirmant la plus faible réactivité du fluor vis-à-vis de la résine.

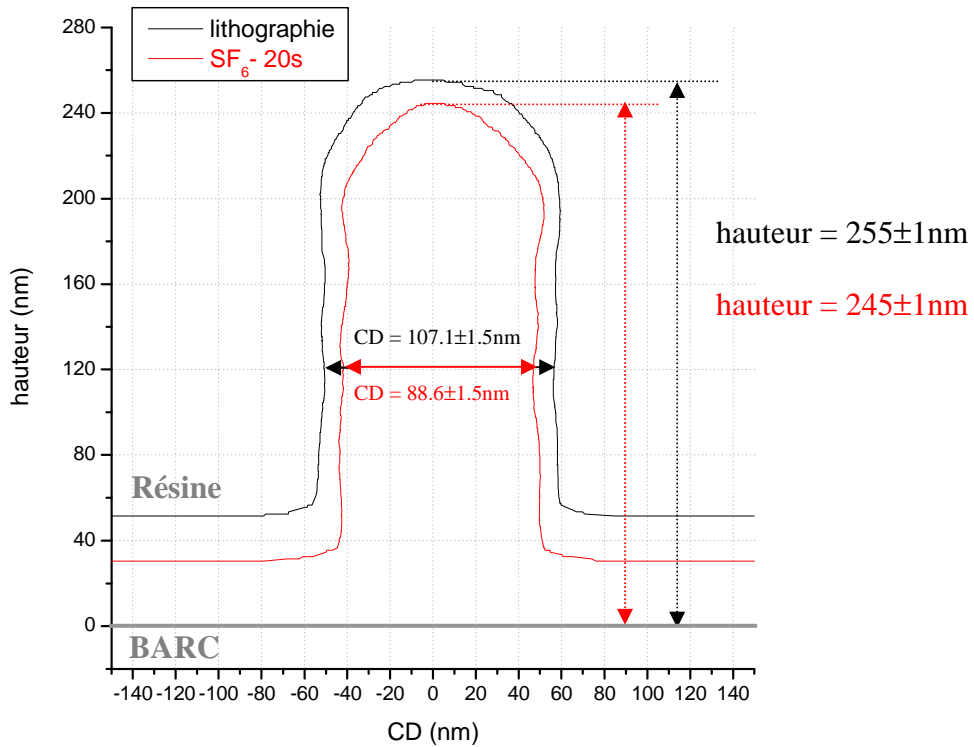


Figure 3-14 : Reconstitution de l'évolution du profil AFM du motif de résine avant et après plasma de SF₆.

La figure 3-15 nous montre les mesures de LWR prises à plusieurs hauteurs sur le motif, avant et après gravure. Nous remarquons que le LWR moyen sur la hauteur du motif après lithographie est égale au LWR moyen après gravure. Ce résultat est confirmé par les mesures effectuées au CD - SEM, figure 3-16 qui indiquent que les valeurs de LWR sont quasi identiques avant et après gravure. La gravure de la résine par plasma de SF₆ ne semble donc pas conduire à un lissage de la rugosité de bord de ligne.

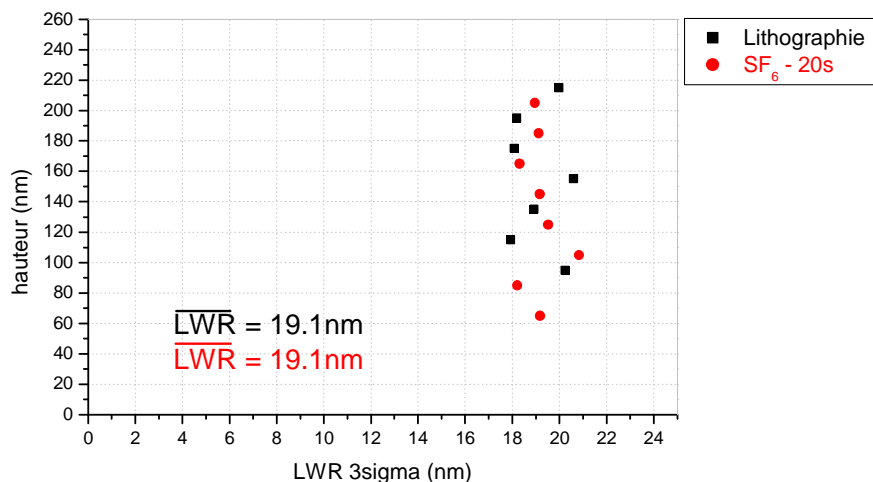


Figure 3-15 : Evolution de LWR à 3σ à différentes hauteurs sur le motif après gravure en SF₆

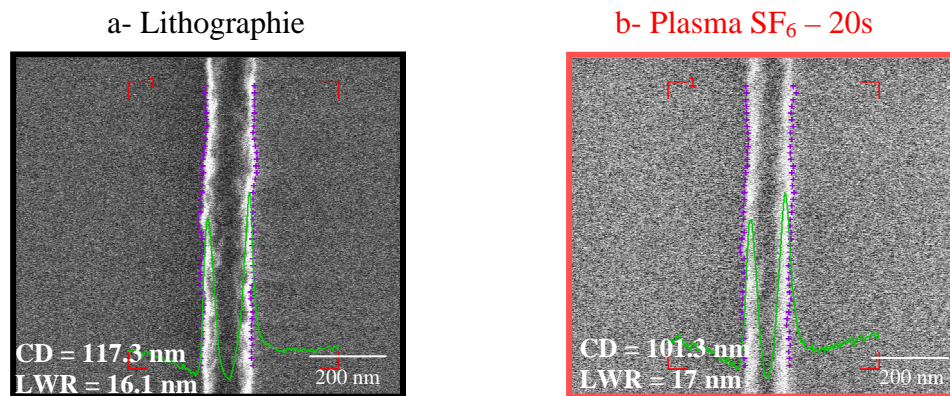


Figure 3-16 : Mesure CD-SEM de la même ligne de résine, a) après lithographie, b) après plasma SF₆ de 20 secondes

Un agrandissement du flanc gauche du profil moyen de la résine avant et après gravure en SF₆ est montré sur la figure 3-17.

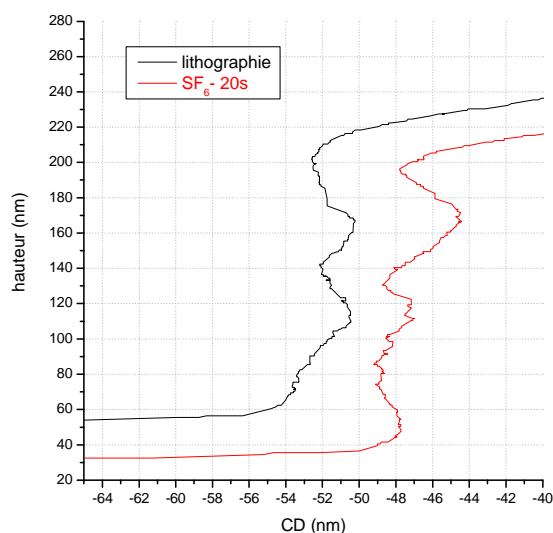


Figure 3-17 : Agrandissement du flanc gauche du profil AFM de la résine, avant et après gravure en SF₆.

Nous observons que la rugosité périodique présente initialement sur les flancs de la résine se retrouve également avec la même périodicité après gravure du motif de résine en SF₆. Comme en plasma d'O₂, la gravure de la résine par plasma de SF₆ semble donc transférer fidèlement la rugosité initialement présente sur les flancs de la résine.

Finalement, d'après les résultats de ces deux chimies de gravure, nous pouvons en conclure qu'une érosion latérale contrôlée par les espèces radicalaires du plasma ne conduit pas à un lissage de la rugosité de bord de ligne de la résine mais à un transfert fidèle de celle-ci.

Chapitre 3 : La rugosité de bord de la résine

3.2.2.3. Plasma en CH_2F_2

L'étude de l'influence d'un plasma de CH_2F_2 sur la rugosité de bord initiale de la résine a été réalisée pour un temps d'exposition au plasma de 20 secondes. Contrairement au plasma d' O_2 et de SF_6 , un plasma de CH_2F_2 dépose une couche fluorocarbonée sur le motif de résine. La figure 3-18 montre l'évolution du profil moyen d'une ligne isolée de résine avant et après dépôt. Ceci nous permet de calculer la vitesse latérale de dépôt, $V_{\text{depot_lat}} = 1 \pm 0,15 \text{ nm/s}$, et verticale de dépôt, $V_{\text{depot_vert}} = 1 \pm 0,1 \text{ nm/s}$. Nous remarquons que ce dépôt est isotrope, ce qui confirme l'action unique des neutres du plasma dans la formation de ce dépôt.

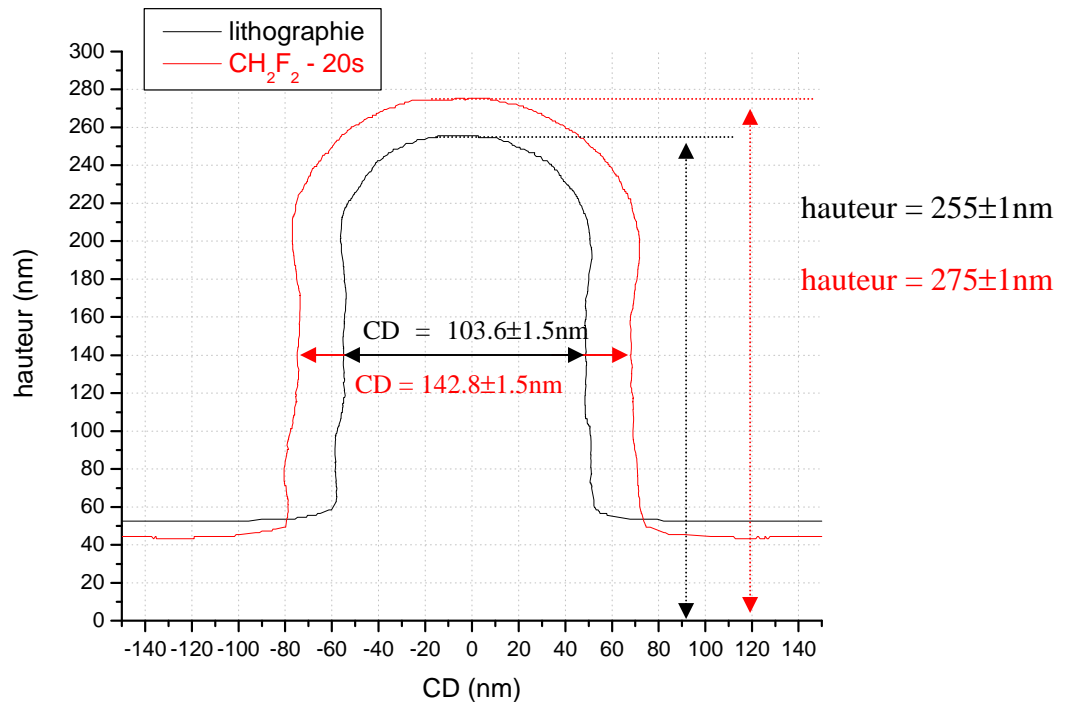


Figure 3-18 : Reconstitution de l'évolution du profil AFM de résine avant et après dépôt en CH_2F_2 .

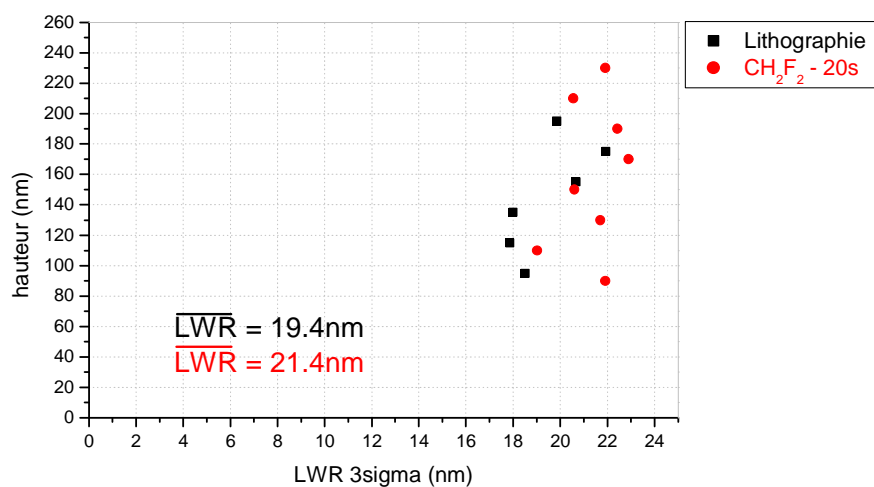


Figure 3-19 : Evolution de LWR à 3σ à différentes hauteurs sur le motif, avant et après dépôt en CH_2F_2 .

Chapitre 3 : La rugosité de bord de la résine

La figure 3-19 nous montre les mesures de LWR prises à plusieurs hauteurs sur le motif, avant et après dépôt. Nous remarquons que le LWR moyen sur la hauteur du motif après dépôt est légèrement supérieur au LWR moyen après lithographie. Ce résultat est confirmé par les mesures effectuées au CD-SEM, figure 3-20 qui indiquent également une légère augmentation de LWR après dépôt. Un dépôt fluorocarboné sur le motif de résine ne semble donc pas conduire à un lissage de la rugosité de bord de ligne de la résine.

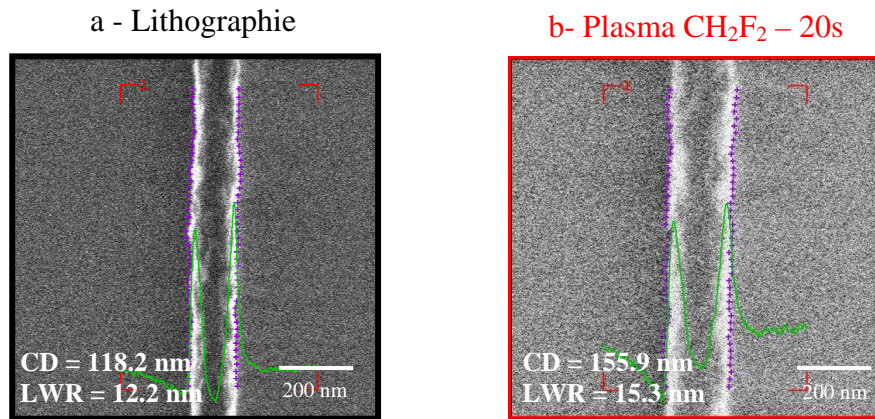


Figure 3-20 : Mesure CD-SEM de la même ligne de résine, a) Après lithographie, b) Après plasma CH₂F₂ de 20 secondes

Un agrandissement du flanc gauche du profil moyen de la résine avant et après dépôt est montré sur la figure 3-21.

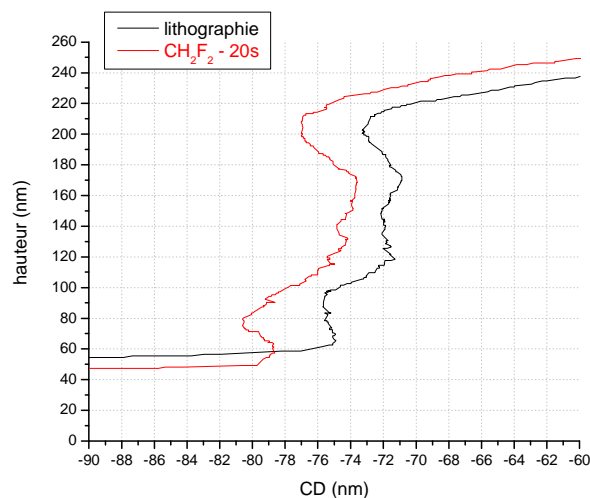


Figure 3-21 : Agrandissement du flanc gauche du profil moyen de la résine, avant et après dépôt en CH₂F₂.

Nous observons que la rugosité périodique présente initialement sur les flancs de la résine se retrouve également après dépôt. Le dépôt sur le motif de résine semble donc suivre la rugosité initialement présente sur le flanc de la résine.

Enfin, d'après les résultats de ces différentes expériences sur l'impact de l'aspect chimique du plasma sur la rugosité de bord de ligne initiale de la résine, nous pouvons en conclure qu'une interaction plasma- résine essentiellement chimique ne conduit pas à un lissage de la rugosité de bord de ligne de la résine.

3.2.3. Aspect physique de la gravure plasma

Dans un second temps, nous avons étudié l'impact de l'aspect physique de la gravure plasma sur la rugosité de bord initiale de la résine. L'aspect physique de la gravure plasma correspond à l'action du bombardement énergétique et directionnel des ions. Dans le réacteur de gravure utilisé lors de ces expériences, il est possible de contrôler l'énergie des ions arrivant sur le substrat par la tension d'autopolarisation. Dans un premier temps, nous avons examiné l'influence d'une augmentation de l'énergie des ions sur la rugosité de bord de la résine lors d'une gravure essentiellement contrôlée par les neutres du plasma. Pour cela, nous avons ajouté une puissance d'auto polarisation de 50W aux chimies utilisées lors de l'étude sur l'impact de l'aspect chimique du plasma (O_2 et SF_6). Finalement, une troisième expérience a été menée avec un plasma d'Argon, qui est chimiquement inerte vis-à-vis de la résine.

3.2.3.1. Plasma O_2 avec puissance d'auto polarisation

L'étude de l'impact de l'énergie des ions incidents lors d'un plasma d'oxygène sur la rugosité de bord de ligne initiale de la résine a été réalisée pour un temps d'exposition au plasma de 7s et une puissance d'auto polarisation de 50W. La figure 3-22 montre l'évolution du profil AFM d'une ligne isolée de résine avant et après gravure. Ceci nous permet de calculer la vitesse de gravure latérale, $V_{lat} = 4,6 \pm 0,4$ nm/s et verticale $V_{vert} = 6,3 \pm 0,3$ nm/s, de la résine. Nous notons une augmentation de la vitesse de gravure verticale de la résine en comparaison à celle obtenue sans puissance d'auto polarisation. Ceci n'a rien de surprenant car nous sommes ici en présence d'une gravure chimique assistée par les ions pour laquelle il est connu qu'une augmentation de l'énergie des ions incidents accélère la cinétique de gravure [Coburn 79]. Par ailleurs, la vitesse de gravure latérale reste du même ordre de grandeur que lors de l'expérience sans puissance d'auto polarisation. Ce résultat n'est pas non plus étonnant car la composante latérale de gravure est principalement due à l'aspect chimique du plasma.

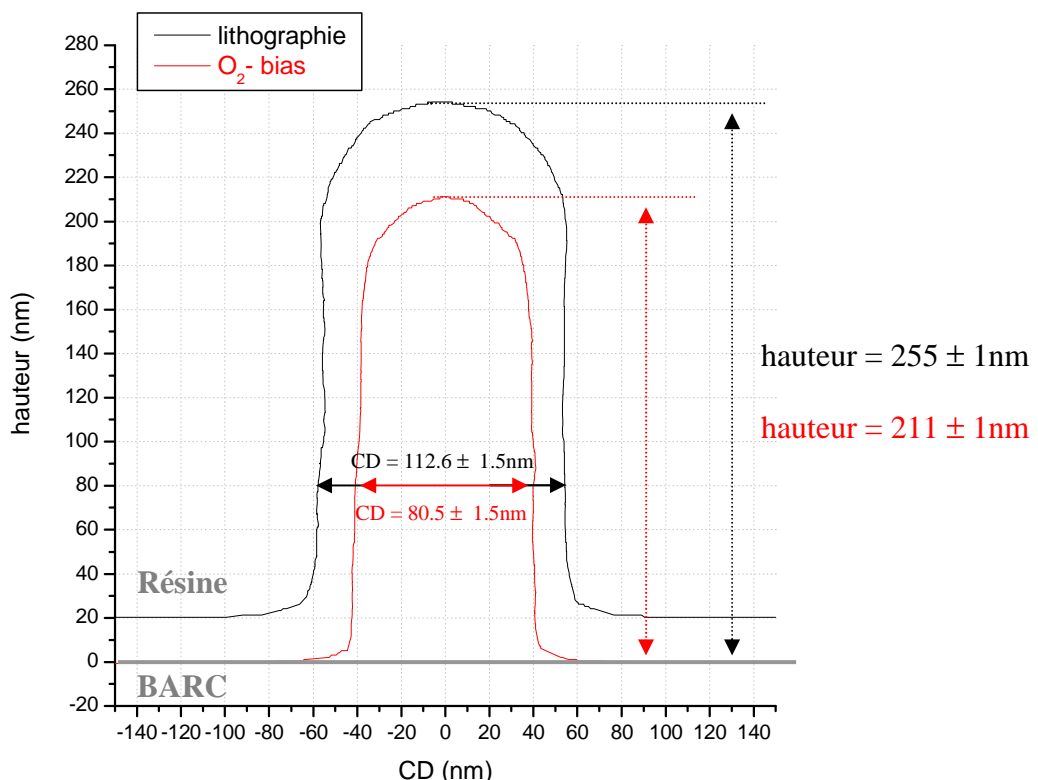


Figure 3-22 : Evolution du profil AFM moyen de résine avant et après gravure.

Chapitre 3 : La rugosité de bord de la résine

La figure 3-23 montre les mesures par CD-AFM de LWR pris à différentes hauteurs le long du motif de résine, avant et après gravure. Nous observons une diminution de LWR moyen de 7,6 nm après gravure. Cette tendance est également confirmée par les mesures effectuées par CD-SEM, figure 3-24, qui indiquent également une réduction de LWR après gravure. L'augmentation de l'énergie des ions incidents semble donc diminuer la rugosité de bord initiale de la résine.

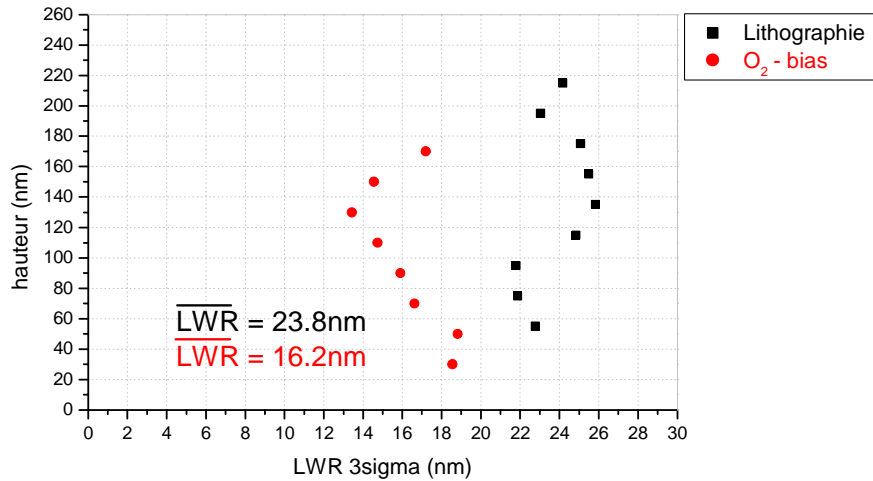


Figure 3-23 : Evolution LWR à 3σ à différentes hauteurs sur le motif, avant et après gravure.

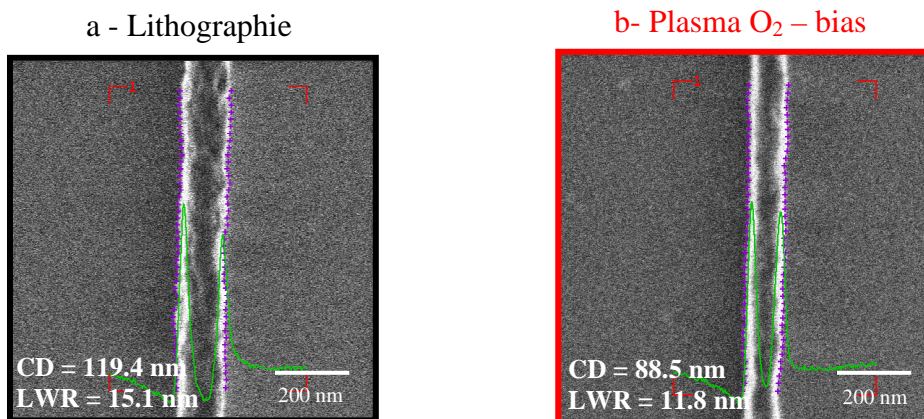


Figure 3-24 : Mesure CD-SEM de la même ligne de résine, a) Après lithographie, b) Après plasma d'O₂ avec puissance d'autopolarisation.

Un agrandissement du flanc gauche du profil moyen de la résine avant et après gravure est présenté figure 3-25. Nous observons que le flanc du profil moyen de résine est nettement plus lisse après gravure. Ce résultat laisse penser que le bombardement ionique énergétique et directionnel agit sur le profil du motif de résine en érodant par pulvérisation les protubérances initialement présentes sur le flanc de la résine. Cet effet de lissage des flancs du motif de résine par le bombardement ionique pourrait alors expliquer la réduction de LWR.

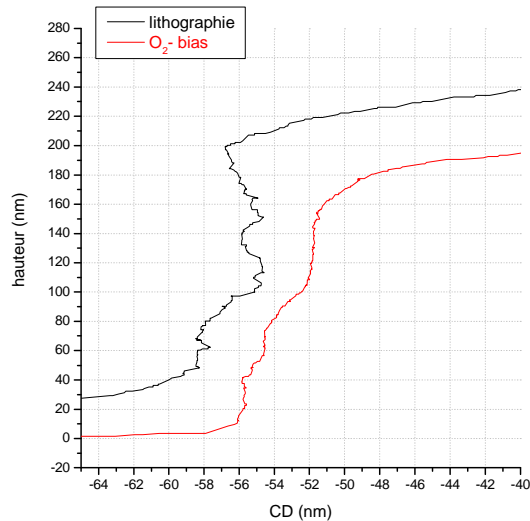


Figure 3-25 : Agrandissement du flanc gauche du profil AFM de la résine, avant et après gravure.

3.2.3.2. Plasma SF_6 avec puissance d'autopolarisation

L'étude sur l'influence de l'énergie des ions lors d'un plasma de SF_6 sur la rugosité de bord de ligne initiale de la résine a été réalisée pour un temps d'exposition au plasma de 20s et une puissance d'auto polarisation de 50W. La figure 3-26 montre l'évolution du profil moyen d'une ligne isolée de résine avant et après gravure. Ceci nous permet de calculer la vitesse de gravure latérale, $V_{lat} = 0,7 \pm 0.15$ nm/s et verticale $V_{vert} = 3 \pm 0.1$ nm/s, de la résine. Comme dans le cas du plasma d' O_2 , nous remarquons que la vitesse de gravure verticale croît avec l'augmentation de l'énergie des ions incidents. En effet, nous sommes ici en présence d'une gravure chimique assistée par les ions qui a pour effet d'accélérer la cinétique de gravure. Par ailleurs, nous remarquons également que la vitesse de gravure latérale reste du même ordre de grandeur que celle obtenue sans puissance d'auto polarisation. Ce résultat demeure cohérent avec le fait que la composante latérale de gravure est principalement due aux espèces neutres du plasma.

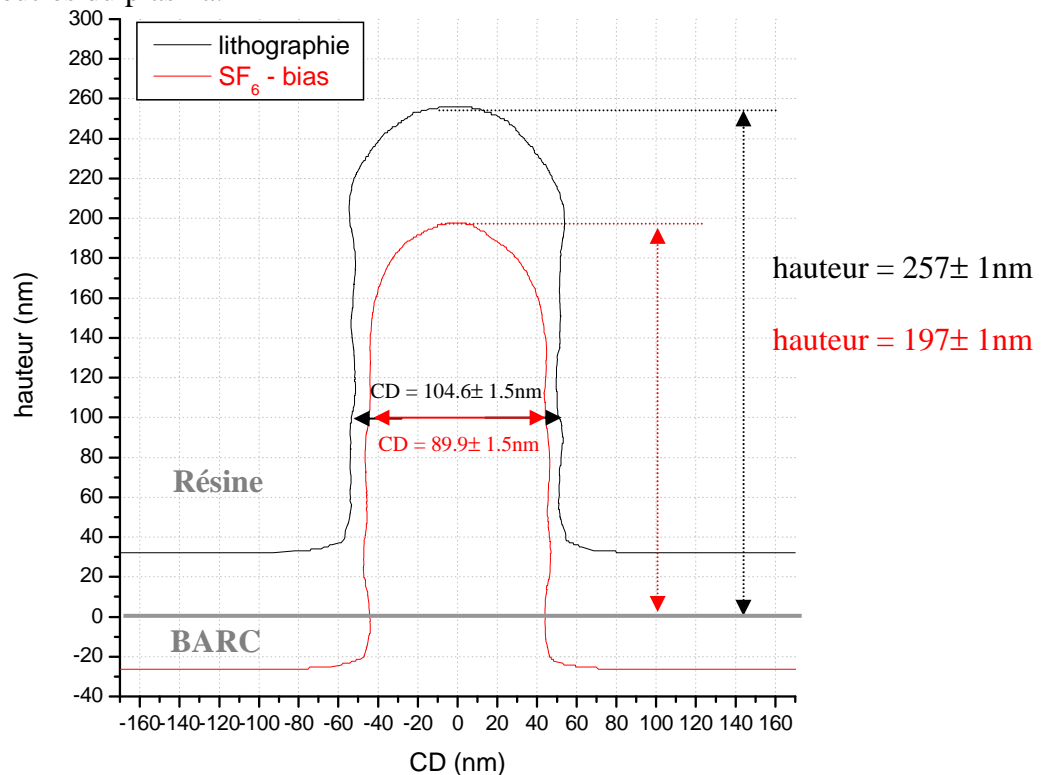


Figure 3-26 : Reconstitution de l'évolution du profil AFM de résine avant et après gravure.

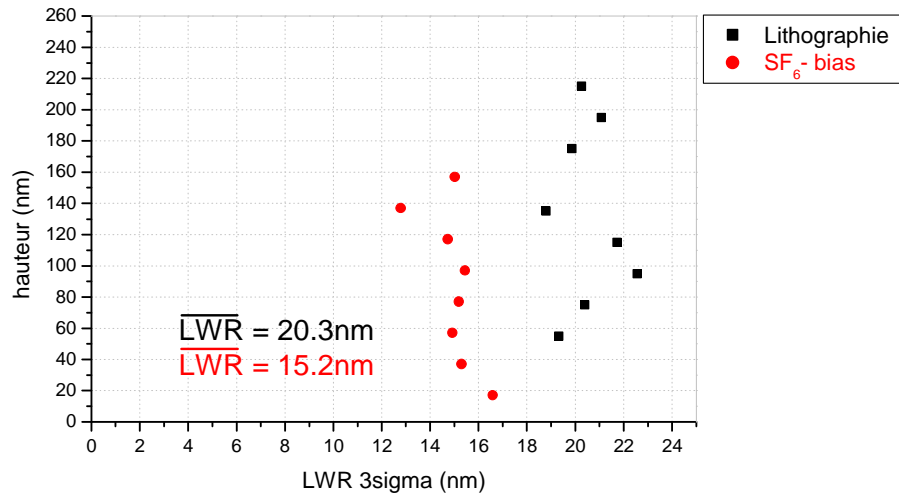


Figure 3-27 : Evolution de LWR à 3σ à différentes hauteurs sur le motif, avant et après gravure.

La figure 3-27 montre les mesures de LWR prises à différentes hauteurs sur le motif, avant et après gravure, par CD-AFM. Nous remarquons une diminution de LWR moyen de 5,1 nm après gravure. Cette tendance est également confirmée par les mesures effectuées par CD-SEM, figure 3-28, qui indiquent également une réduction de LWR après gravure. Comme dans le cas du plasma d'oxygène, l'augmentation de l'énergie des ions incidents diminue donc la rugosité de bord initiale de la résine.

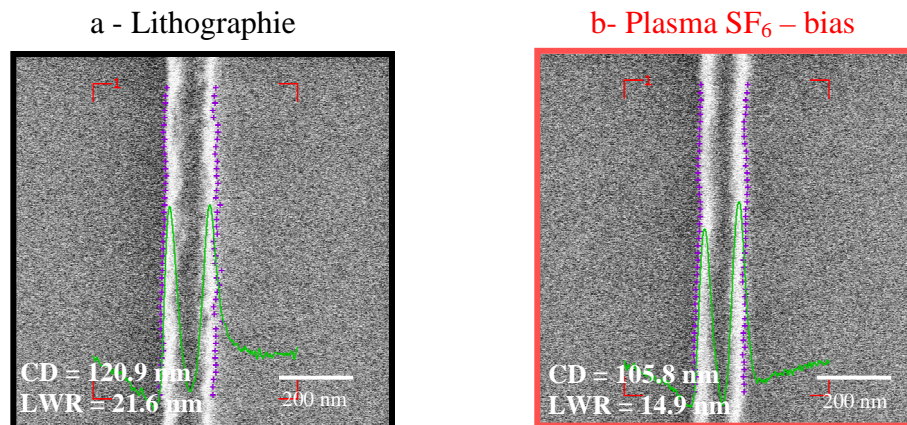


Figure 3-28 : Mesure CD-SEM de la même ligne de résine, a) Après lithographie, b) Après plasma de SF₆ avec puissance d'autopolarisation.

Un agrandissement du flanc gauche du profil moyen de la résine avant et après gravure est montré sur la figure 3-29. Nous constatons que l'amplitude de la rugosité, présente initialement sur les flancs de la résine, s'est légèrement atténuée après gravure. Ce résultat suggère à nouveau que le bombardement ionique énergétique et directionnel érode partiellement les protubérances présentes initialement sur le flanc de la résine. Cet effet de lissage des flancs du motif de résine par le bombardement ionique énergétique pourrait alors expliquer la réduction de LWR.

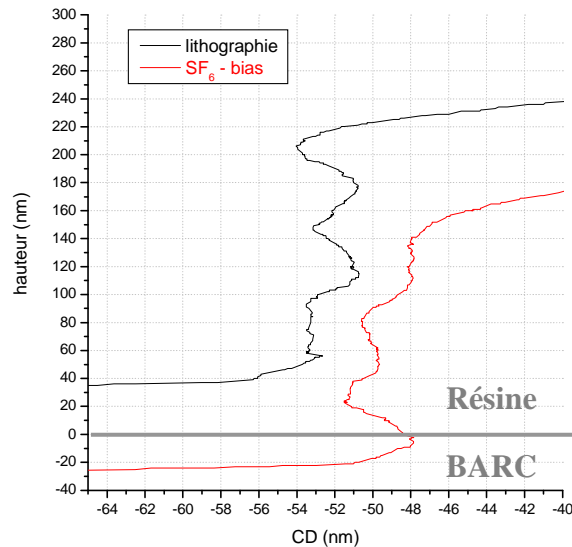


Figure 3-29 : Agrandissement du flanc gauche du profil moyen de la résine, avant et après gravure.

Finalement, l'ensemble des résultats montrent qu'un accroissement de l'énergie des ions arrivant sur le substrat, dans des plasmas qui interagissent chimiquement avec la résine, tels que des plasmas d'O₂ ou de SF₆, entraîne un lissage des flancs de la résine ainsi qu'une diminution de la rugosité de bord initiale de la résine. Ces tendances nous suggèrent donc que le bombardement ionique énergétique et directionnel semble être responsable du lissage de la rugosité de bord de ligne de la résine en érodant les protubérances présentes initialement sur le flanc de la résine.

3.2.3.3. Plasma d'Argon

L'étude de l'influence d'un plasma chimiquement inerte à la résine, tel qu'un plasma de gaz rare (Argon ou Hélium), sur la rugosité de bord initiale de la résine a été réalisée en exposant une ligne de résine à un plasma d'Argon sans puissance d'auto polarisation. Cette expérience a été menée sur une ligne isolée de résine de 100nm, pour deux temps d'exposition au plasma, l'un de 20 secondes, l'autre de 50s. La figure 3-30 montre l'évolution du profil moyen de la ligne isolée de résine avant et après gravure.

Nous remarquons une réduction de la dimension de la résine de 19,5 nm après application du plasma d'Argon. De plus, la même diminution de CD est notée quelque soit le temps de gravure. Ce résultat est surprenant si l'on considère que l'argon est chimiquement inerte vis-à-vis de la résine. Dans un premier temps, nous avons émis l'hypothèse que cette réduction de côté résine pouvait être due au fluor provenant des parois du réacteur. Nous avons alors préalablement conditionné les parois du réacteur pour obtenir des parois en carbone afin de minimiser l'apport de fluor lors de l'exposition de la résine au plasma d'argon. Le résultat de cette expérience est présenté sur la figure 3-31.

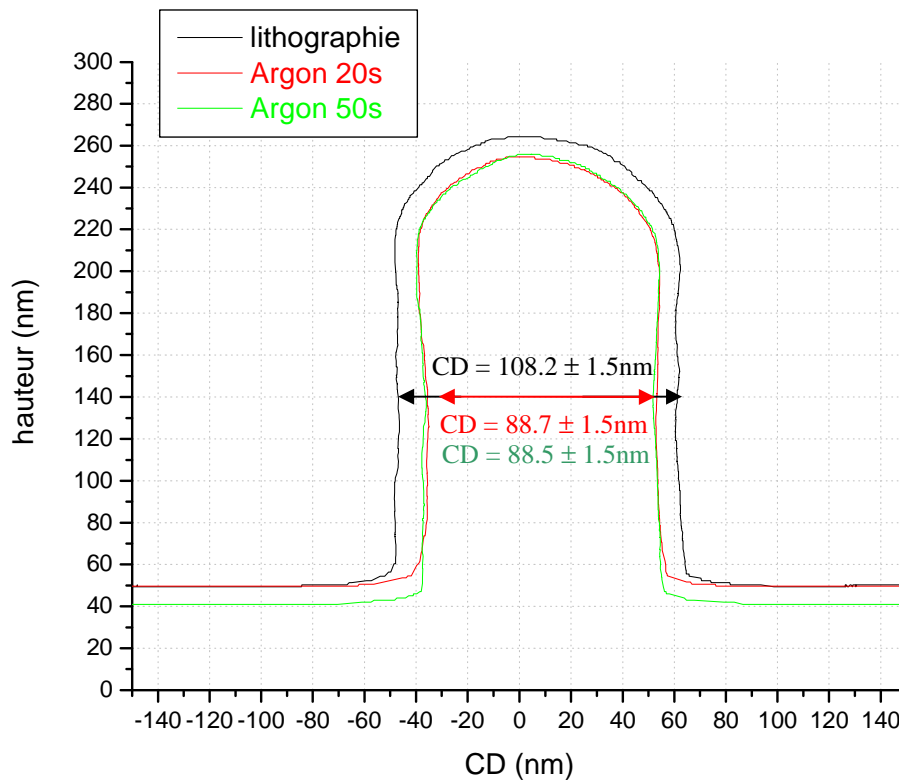


Figure 3-30 : Reconstitution de l'évolution du profil AFM du motif de résine avant et après gravure.

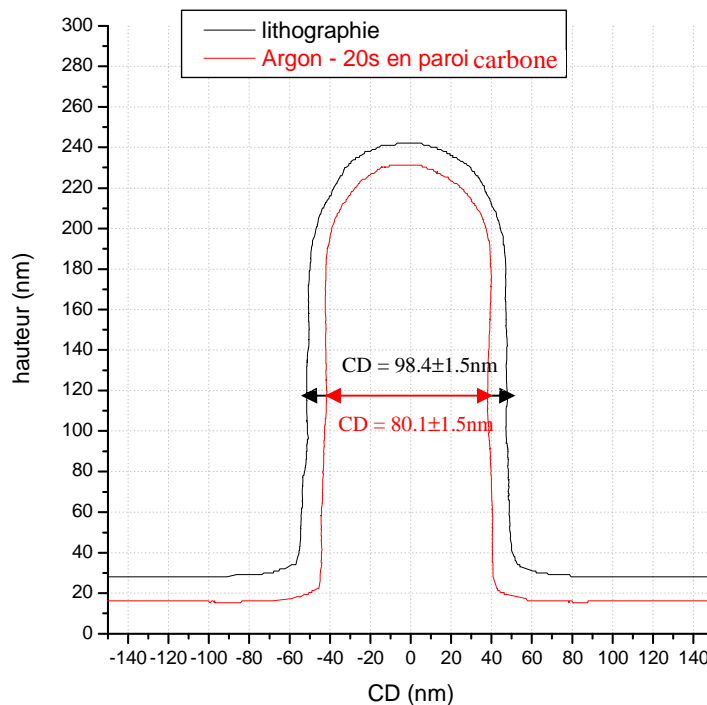


Figure 3-31 : Reconstitution de l'évolution du profil AFM du motif de résine avant et après gravure en paroi propre.

Chapitre 3 : La rugosité de bord de la résine

Dans le cas de paroi carbone, nous mesurons la même réduction de la cote résine qu'auparavant. Le fluor ne semble donc pas être responsable de cette diminution de cote résine. Il semble donc que le plasma d'argon entraîne une densification du motif de résine. Des études récentes ont montré qu'un plasma d'argon modifiait chimiquement la résine utilisée pour une insolation à une longueur d'onde de 193nm [Kim 06]. Il est alors fortement probable que cette modification entraîne une densification de la résine et donc une réduction de la dimension du motif.

Concernant la rugosité de bord de ligne, la figure 3-32 montre les mesures par CD-AFM de LWR pris à plusieurs hauteurs sur le motif, avant et après gravure. Nous observons une diminution de LWR moyen d'environ 4,5 nm après gravure quelques soit le temps de gravure. Cette tendance est également confirmée par les mesures effectuées par CD-SEM, figure 3-33.

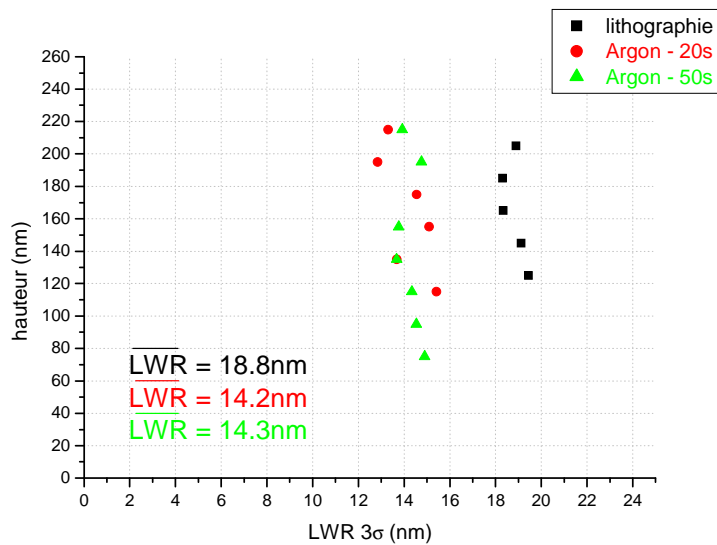


Figure 3-32 : Evolution de LWR à 3σ à différentes hauteurs sur le motif, avant et après gravure.

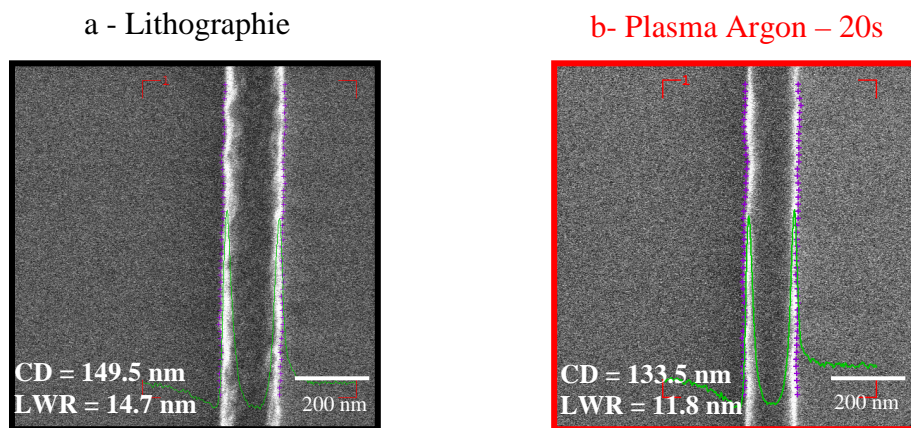


Figure 3-33 : Mesure CD-SEM de la même ligne de résine, a) Après lithographie, b) Après plasma d'Argon de 20s.

Un agrandissement du flanc gauche du profil moyen de la résine, avant et après gravure, est présenté sur la figure 3-34.

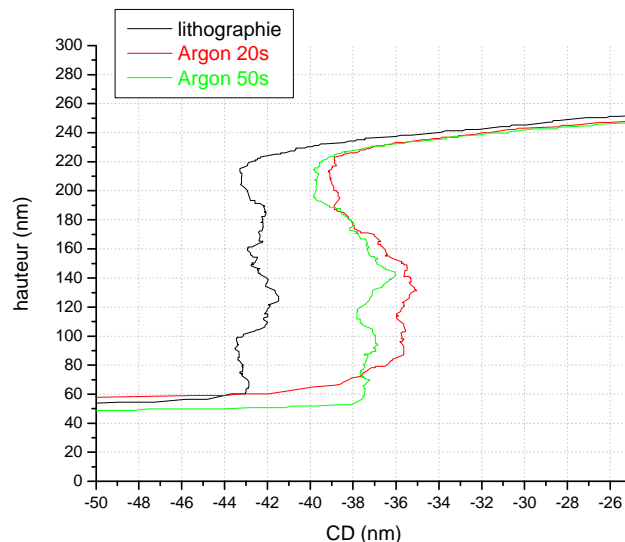


Figure 3-34 : Agrandissement du flanc gauche du profil moyen de la résine, avant et après gravure.

Nous constatons que la rugosité périodique initiale n'est plus présente après gravure. Comme dans le cas de la gravure chimique de la résine assistée par les ions, le bombardement ionique énergétique semble donc éroder les protubérances d'origine sur le flanc de la résine.

✓ Conclusion

Au travers de ces résultats, nous pouvons conclure que l'aspect chimique du plasma ne conduit pas à un lissage de la rugosité de bord initiale de la résine. En revanche, l'augmentation de l'énergie des ions arrivant sur le substrat provoque une réduction de LWR ainsi qu'un lissage des flancs de la résine. Cet effet est également observable lors de la gravure de la résine par plasma d'Argon. Toutes ces tendances amènent à penser que le bombardement ionique est directement responsable de la diminution de la rugosité de bord de la résine en érodant les protubérances initialement présentes sur le flanc de la résine.

3.3. Evolution de la rugosité de bord de ligne lors d'un procédé industriel de traitement de la résine.

Actuellement, l'industrie de la microélectronique utilise pour l'étape de lithographie, des résines à amplification chimique spécialement conçue pour une insolation à une longueur d'onde de 193nm. Cependant, ces résines présentent une faible résistance à la gravure [Wallraff 93] comparées à la génération de résine utilisée pour une insolation à 248nm. Pour palier à cet inconvénient, un procédé plasma de traitement de la résine à base d'HBr, intervenant après l'étape de lithographie, a été introduit dans le procédé de fabrication afin d'améliorer la résistance de la résine à la gravure [Mahorowala 05].

Dans cette section, nous nous sommes donc intéressés à l'influence de cette étape de traitement de la résine sur la rugosité de bord du motif de résine. Pour cela, nous avons appliqué dans la DPS, un procédé de traitement de résine couramment utilisé dans l'industrie, sur une ligne de résine isolée de 100nm. Le procédé utilisé est décrit ci-dessous :

Chapitre 3 : La rugosité de bord de la résine

Traitement résine : 100sccm HBr / puissance source 1200W / pression 5mT/ temps 60s

La figure 3-35 montre l'évolution du profil AFM d'une ligne de résine de 100nm avant et après traitement de la résine en HBr.

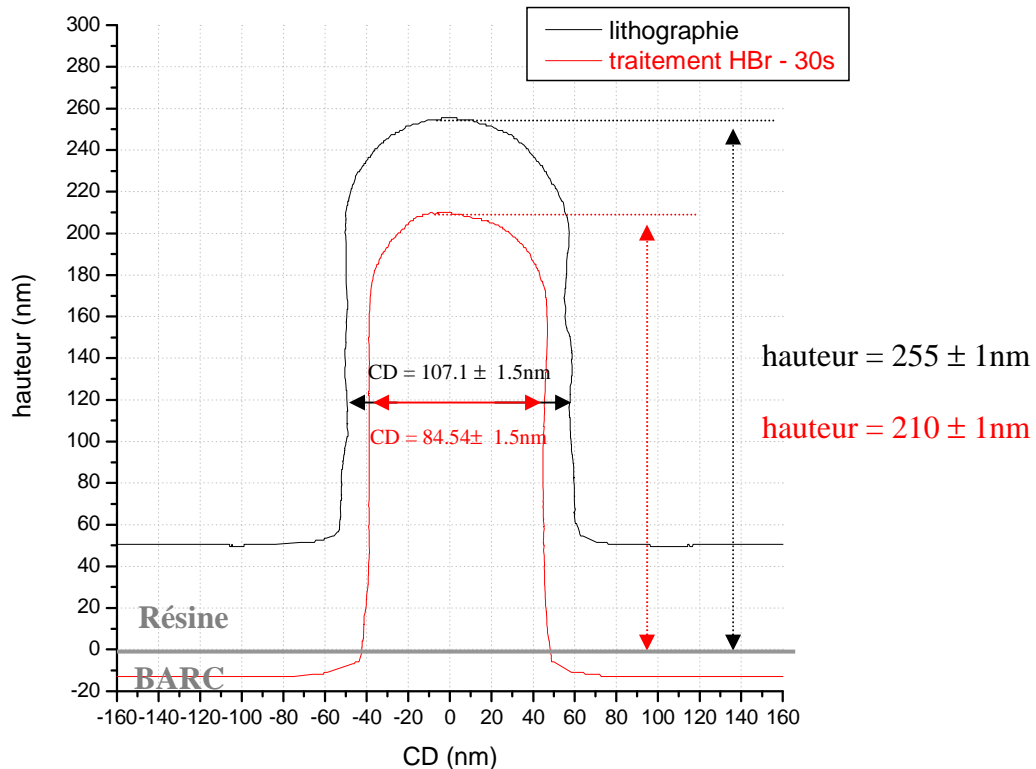


Figure 3-35 : Reconstitution de l'évolution du profil AFM du motif de résine avant et après traitement de la résine en HBr.

Nous remarquons que ce procédé entraîne une diminution de la dimension de la ligne. Il semble donc que ce type de plasma modifie en volume le motif de résine. Pour vérifier cette hypothèse, nous avons effectué des analyses par Spectroscopie Infrarouge par Transformé de Fourier (FTIR) sur une plaque de résine avant et après traitement de la résine en HBr. Cette technique, basée sur l'absorption d'un rayonnement infrarouge par le matériau analysé, permet, via la détection des vibrations caractéristiques des liaisons chimiques, d'effectuer l'analyse des fonctions chimiques présentes dans le matériau. Pour des informations plus détaillées sur cette technique, le lecteur pourra se référer au livre de J.R. Ferraro et L.J. Basile [Ferraro 82]. Les résultats de cette analyse sont montrés sur la figure 3-36.

a) région de l'élongation de la liaison C=O

b) région de l'élongation de la liaison C-H

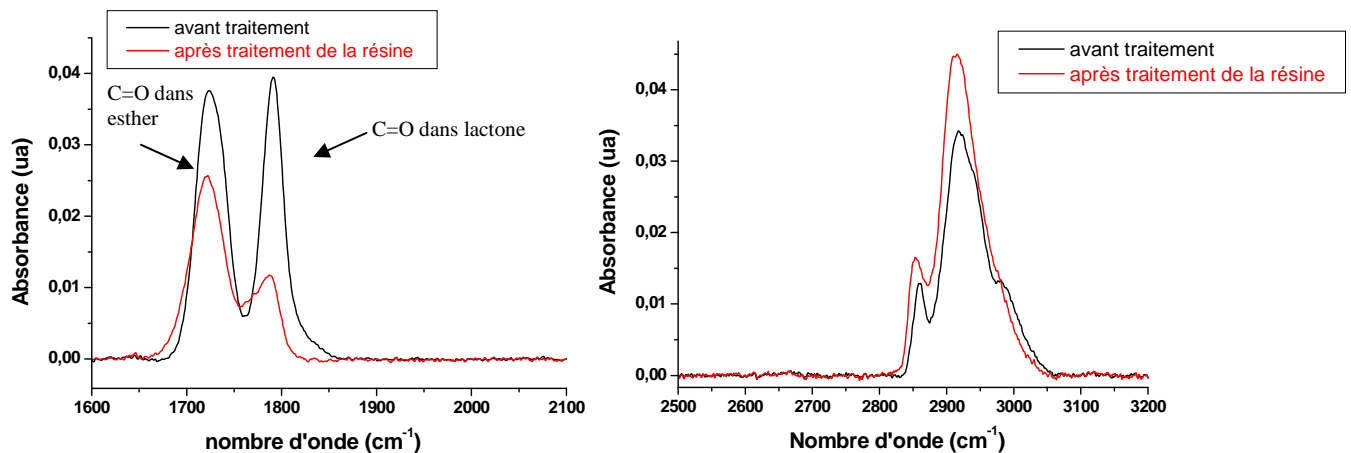


Figure 3-36 : Résultats de l'analyse FTIR sur la résine, avant et après traitement de la résine.

a) région de l'élongation de la liaison C=O, b) région de l'élongation de la liaison C-H.

Chapitre 3 : La rugosité de bord de la résine

Nous remarquons, après traitement de la résine, une diminution des liaisons C=O des groupements lactone et ester contenus dans la résine, et une augmentation des liaisons C-H. Le procédé de traitement résine à base d'HBr modifie donc chimiquement et en volume le motif de résine. Ce résultat est cohérent avec la littérature qui indique également une modification chimique de la résine après plasma de HBr [Kim 06]. Par ailleurs nous avons effectué une étude sur pleine plaque de résine pour déterminer la vitesse de gravure verticale de la résine par plasma d'oxygène avec et sans traitement de la résine préalable. Les résultats de cette étude sont présentés dans le tableau 3-2.

Plasma d'O ₂	Vitesse de gravure verticale de la résine (nm/s)
Sans traitement de la résine	6.3
Avec traitement de la résine	4

Tableau 3-2 : Résultats sur la vitesse de gravure de la résine par plasma d'O₂, avec et sans traitement préalable de la résine.

D'après ces résultats, il est clair que le traitement de la résine améliore la résistance à la gravure de la résine. Or, nous avons vu précédemment que le traitement de la résine permettait une diminution des liaisons CO dans la résine. Cet effet du traitement en HBr sur la résine pourrait alors expliquer à la fois la meilleure résistance à la gravure de la résine et la réduction en dimension de la résine. En effet, le fait que les CO soient remplacés, volatilisés ou substitués après traitement de la résine, peut entraîner une densification de la résine et donc une réduction de sa dimension.

Concernant l'évolution de la rugosité de bord de ligne, la figure 3-37 montre les mesures de LWR, prises à différentes hauteurs sur le motif, avant et après traitement de la résine en HBr.

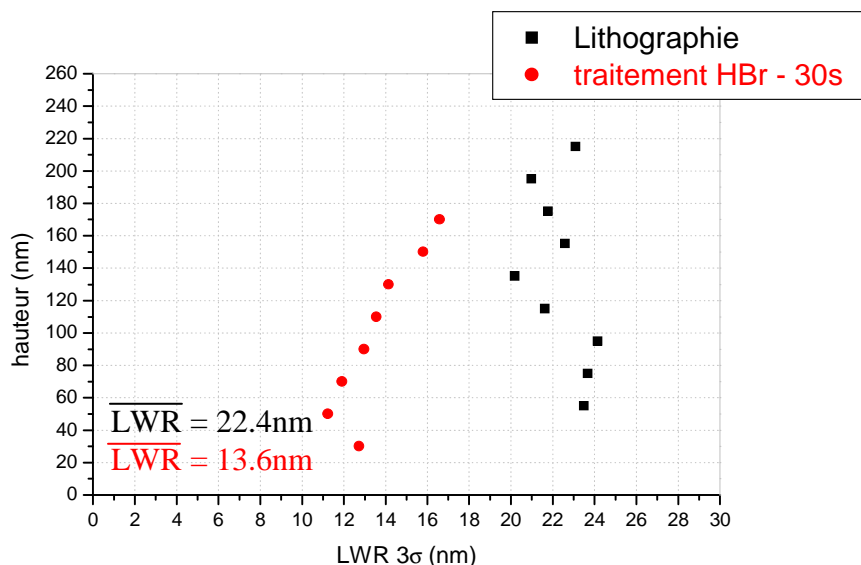


Figure 3-37 : LWR à 3σ à différentes hauteurs sur le motif, avant et après traitement de la résine en HBr.

Chapitre 3 : La rugosité de bord de la résine

Nous remarquons une nette diminution de LWR moyen après traitement de la résine. Un agrandissement du flanc gauche du profil moyen de la résine avant et après traitement de la résine est montré sur la figure 3-38. Nous constatons que l'amplitude de la rugosité, présente initialement sur les flancs de la résine, n'est plus présente après traitement de la résine. Dans le cas du traitement de la résine en HBr, nous sommes en présence d'un procédé avec un fort flux ionique (puissance source = 1200W) et un bombardement ionique faiblement énergétique (pas de puissance d'autopolarisation). Comme dans le cas du plasma d'Argon, il semble donc qu'un flux ionique important permet de lisser la rugosité de bord en érodant les protubérances présentes initialement sur le flanc de la résine. Cette remarque suggère à nouveau que le bombardement ionique énergétique et directionnel est principalement responsable du lissage des flancs du motif de résine.

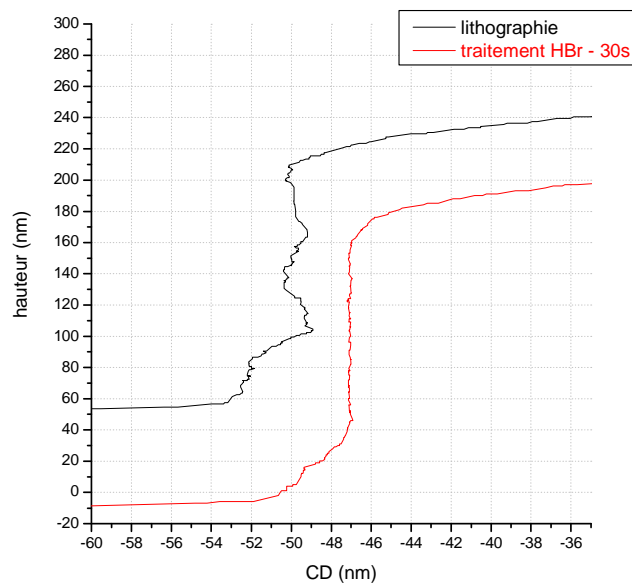


Figure 3-38 : Agrandissement du flanc gauche du profil moyen de la résine, avant et après traitement de la résine en HBr.

3.4. Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons tenté de comprendre les origines de la rugosité de bord de ligne. D'après nos résultats et ceux de la littérature, nous remarquons que la formation de la rugosité de bord est un problème complexe qui fait intervenir de nombreux facteurs. Cependant, plusieurs paramètres ont montré leur effet sur la rugosité. Parmi ceux-ci, nous pouvons citer ceux qui sont les plus influents : la taille de la zone de transition, la taille des agrégats de polymères et le phénomène de diffusion de l'acide. En revanche, des études sur le sujet sont encore nécessaires pour clairement comprendre les origines du phénomène et obtenir des motifs de résine qui répondent aux exigences industrielles pour les futures générations de transistors. Pour atteindre cet objectif, l'utilisation du CD-AFM comme outil de caractérisation est aujourd'hui indispensable.

Dans la seconde partie du chapitre, nous avons examiné l'influence d'un procédé plasma sur la rugosité de bord de la résine. Cette étude nous a permis de mettre en évidence l'impact des deux aspects de la gravure par plasma. Tout d'abord, nous pouvons conclure que l'aspect chimique du plasma ne conduit pas à un lissage de la rugosité de bord de la résine. En effet, la rugosité de bord d'un motif de résine n'a pas évolué après exposition à des plasmas d'O₂ et de SF₆, connus pour les actions essentiellement chimique sur la résine. Dans le cas d'un dépôt

Chapitre 3 : La rugosité de bord de la résine

essentiellement contrôlé par les neutres du plasma, une augmentation de la rugosité est même observée. Concernant l'aspect physique de la gravure par plasma, les différents résultats nous montrent que l'ajout de bombardement ionique à un procédé plasma interagissant chimiquement avec la résine permet de diminuer la rugosité de bord d'une ligne de résine. Ces résultats nous suggèrent donc que le bombardement ionique directif et énergétique est responsable de la diminution de la rugosité de bord de la résine en érodant les protubérances initialement présentes sur le flanc de la résine. Finalement, l'étude d'un procédé industriel de traitement de la résine nous a permis de montrer qu'un plasma d'HBr entraînait une modification en volume de la composition chimique de la résine, une densification du motif et une réduction de la rugosité de bord.

3.5. Bibliographie

- [Cain 86] **S.R.Cain, F.D.Egitto, et F. Emmi,**
J. Vac. Sci. Technol. A (5), pp. 1578, 1986.
- [Coburn 79] **J.W. Coburn and H.F. Winters,**
J. Appl. Phys, 50, pp. 3189-3196, 1979.
- [Ferraro 82] **J. R. Ferraro et L. J. Basile,**
"Fourier Transform Infrared Spectroscopy", Vol. 3, Chap. 3, p. 83,
L. A. Nafie et D. W. Vidrine Eds., Academic Press, New-York, 1982.
- [Foucher 07] **J. Foucher, A. Pikon, C. Andes, J. Thackeray,**
En cours de publication, 2007.
- [Fukuda 03] **H. Fukuda,**
Jpn. J. Appl. Phys, Vol42, pp. 3748-3754,2003.
- [Hasko 00] **D.G. Hask, S. Yasin, et A. Mumtaz,**
J. Vac. Sci. Techno. B 18(6), pp. 3441-3444, Nov/Dec 2000
- [Hinsberg 98] **W.Hinsberg, F.A. Houle, J. Hoffnagle, M. Sanchez, G. Wallraff,**
M. Morrison, et S. Frank,
J. Vac. Sci. Techno. B 16(6), pp. 3689-3694, Nov/Dec 1998.
- [ITRS 05] **International Technology Roadmap for Semiconductors,**
2005 edition, <http://itrs.net>
- [Kim 06] **M.C. Kim, D. Shamiryan ,Y. Jung,W. Boullart , C. H. Kang et**
H.K.Cho,
J. Vac. Sci. Techno. B 24(6), pp. 2645-2652, Nov/Dec 2006.
- [Kotera 02] **M. Kotera, T. Yamada, et Y. Ishida,**
Jpn. J. Appl. Phys, Vol 41, pp. 4150-4156, 2002.
- [Kotera 05] **M. Kotera, K. Yagura, et H. Niu,**
J. Vac. Sci. Techno. B 23(6), pp. 2775-2779, Nov/Dec 2005.
- [Kyser 75] **D. F. Kyser et N. S. Viswanathan,**
J. Vac. Sci. Techno. A 12(6), pp. 1305-1308, Nov/Dec 1975.
- [Leunissen 05] **L.H.A. Leunissen, M. Ercken, et G.P. Patsis,**
Microelectronic Engineering 78-79, pp. 2-10,2005.
- [Ma 98] **S. Ma, M. Jain et J. D. Chinn,**
J. Vac. Sci. Techno. A 16, pp. 1440, 1998.

Chapitre 3 : La rugosité de bord de la résine

- [Ma 03] **Y. Ma, J. Shin, et F. Cerrina,**
J. Vac. Sci. Techno. B 21(1), pp. 112-117, Jan/Feb 2003.
- [Mack 94] **C.A. Mack,**
Microlithography world, pp. 22-24, 1994.
- [Mahorowala 05] **A. P. Mahorowala, K. J. Chen, R. Sooriyakumaran, A. Clancy, D. Murthy, et S. Rasgon,**
Proc SPIE 5753, pp. 380, 2005.
- [Marks 93] **J. Marks, K. Collins, C. L. Yang, D. Groechel, P. Keswick, et C. Cunningham,**
Proc SPIE, 1803, pp. 235, 1993.
- [Matsunami 84] **N. Matsunami, Y. Yamamura, Y. Itikawa, et H. Tawara,**
At. Data. Nucl. Data Tables 31, 1, 1984.
- [Namatsu 98] **H. Namatsu, M. Nagase, T. Yamaguchi, K. Yamazaki, et K. Kurihara,**
J. Vac. Sci. Techno. B 16(6), pp. 3315-3321, Nov/Dec 1998.
- [Pan 97] **S. Pan, S. Xu, et D. Podlesnik,**
Jap. J. Appl. Phys. 36, pp.2514, 1997
- [Pargon 04] **E. Pargon,**
Thèse de l'université Joseph Fourier de Grenoble, 2004.
- [Patsis 05] **G.P. Patsis et E. Gogolides,**
J. Vac. Sci. Techno. B 23 (4), pp. 1371-1375, Jul/Aug 2005.
- [Rau 98] **N. Rau, F. Stratton, C. Fields, T. Ogawa, Neureuther, R. Kubena, et G. Willson,**
J. Vac. Sci. Techno. B 16(6), , pp3784-3788, Nov/Dec 1998.
- [Reynolds 99] **G.W. Reynolds et J.W. Taylor,**
J. Vac. Sci. Techno. B 17(2), pp. 334-344, Mar/Apr 1999.
- [Saeki 06] **A. Saeki, T. Kozawa, S. Tagawa, et H.B. Cao,**
Nanotechnology 17, pp1543-1546, 2006.
- [Shin 01] **J. Shin, G. Han, Y. Ma, K. Moloni, et F. Cerrina,**
J. Vac. Sci. Techno. B 19(6), pp. 2890-2895, Nov/Dec 2001.
- [Shin 02] **J. Shin, Y. Ma, et F. Cerrina,**
J. Vac. Sci. Techno. B 20(6), pp. 2927-2931, Nov/Dec 2002.
- [Shiraishi 94] **H. Shiraishi, T. Yoshimura, T. Sakamizu, T. Ueno, et S. Okazaki,**
J. Vac. Sci. Techno. B 12(6), pp.3895-3899, Nov/Dec 1994.

Chapitre 3 : La rugosité de bord de la résine

- [Steinbrüchel 89] **C. Steinbrüchel,**
Appl.Phys.Lett. 55, pp. 1960, 1989.
- [Takada 00] **N. Takada, K. Shibagaki, K. Sasaki, K. Kadota, et K.I.Oyama,**
J. Vac. Sci. Technol. A 19(2), pp. 689-692, 2000.
- [Yamaguchi 97] **T. Yamaguchi, H. Namatsu, M. Nagase, K. Yamazaki,
et K. Kurihara,**
Appl. Phys. Lett. 71 (16), pp. 2388-2390, Oct 1997.
- [Williamson 04] **M. Williamson, et A. Neureuther,**
Proc. SPIE 5376, pp. 404-413, 2004.
- [Yamaguchi 03] **T. Yamaguchi, K. Yamazaki, M. Nagase, et H. Namatsu,**
Jpn. J. Appl. Phys, Vol 42, pp. 3755-3762, 2003.
- [Yamaguchi 04^a] **T.Yamaguchi and H.Namatsu,**
J. Vac. Sci. Techno. B 22(3), pp. 1037-1043, May/Jun 2004.
- [Yamaguchi 04^b] **T.Yamaguchi, K.Yamazaki, and H.Namatsu,**
J. Vac. Sci. Techno. B 22(6), pp. 2604-2610, Nov/Dec 2004.
- [Yasin 04] **S. Yasin, D.G. Hasko, M.N. Khalid, D.J. Weaver, et H. Ahmed,**
J. Vac. Sci. Techno. B22 (2), pp. 574-578, Mar/Apr 2004.
- [Yoshimura 93] **T. Yoshimura, H. Shiraishi, J. Yamamoto, et S. Okazaki,**
Jpn. J. Appl. Phys, Vol 32, , pp. 6065-6070, Dec 1993.
- [Yoshizawa 02] **M. Yoshizawa et S. Moriya,**
J. Vac. Sci. Techno. B20 (4), pp.1342-1347, Jul/Aug 2002.
- [Wallraff 93] **G. M. Wallraff et al,**
J. Vac. Sci. Techno. B11, pp.2783, 1993.

Chapitre 4.

Transfert de la rugosité de bord de ligne lors d'un procédé de gravure grille.

Ce chapitre est destiné à l'étude du transfert de la rugosité de bord de ligne dans les différentes couches minces qui permettent de réaliser une grille de transistor CMOS. Quelle que soit la stratégie de gravure employée, les deux étapes technologiques présentes dans la réalisation d'une grille de transistor sont l'ouverture du BARC et la gravure de la grille. C'est pourquoi dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à ces deux étapes. Pour cela, nous avons tout d'abord examiné l'influence du procédé d'ouverture du BARC sur la rugosité de bord de la résine, puis l'impact de certains paramètres de l'étape de la gravure du poly silicium de grille sur la rugosité de bord de la grille finale. Parmi ceux-ci, nous avons étudié l'influence de l'épaisseur des couches de passivation, de la chimie de gravure, et des étapes d'atterrissage sur l'oxyde de grille et de surgravure. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous nous sommes intéressés au transfert complet de la rugosité de bord de ligne, avec différents masques de gravure utilisés (masque résine, masque dur en SiO₂ et masque carbone).

4.1. Introduction

4.1.1. Etat de l'art

Le transfert de la rugosité de bord de ligne à travers différentes couches a fait l'objet de peu de travaux. La microscopie à force atomique (AFM), en mode tapping, a tout d'abord été utilisée pour imager le flanc des motifs et caractériser la rugosité de bord. Pour obtenir ces images, la plaque est clivée le long d'une ligne et le flanc du motif est orienté face à la pointe AFM, comme le montre la figure 4-1.

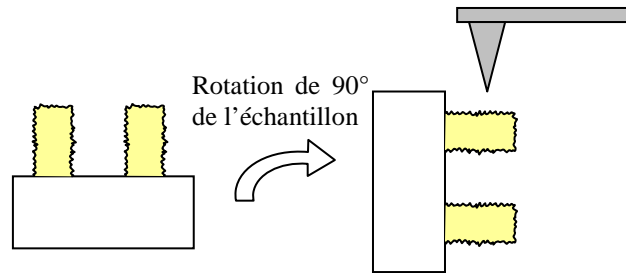


Figure 4-1 : Schéma de la technique AFM utilisée pour caractériser la rugosité de bord de ligne

Par cette technique, Yahata montre la formation de striations sur les flancs de lignes de silicium gravé par plasma. Il suggère également que la rugosité de bord de ligne de la résine est une des causes majeures de la rugosité de bord de ligne dans le silicium [Yahata 97]. Par la suite, Goldfarb a étudié le transfert de la rugosité de bord dans les différentes couches nécessaires à la fabrication de motifs inférieurs à 100 nm (résine, couche anti-réfléctive, masque dur et silicium) [Goldfarb 04]. Il souligne que la rugosité isotrope de la résine après lithographie devient anisotrope après gravure de la couche anti-réfléctive et du masque dur. Il démontre également que les striations générées dans la résine se propagent dans les couches gravées. Ce type d'étude a également été effectué par des mesures de LWR réalisées au CD-SEM. Par cette technique, Leunissen met en évidence le fait que la rugosité de bord de ligne est transférée dans le silicium après gravure plasma et que les hautes fréquences du LER (de quelques nm) sont supprimées après gravure [Leunissen 03].

En revanche, des études par CD-AFM permettraient d'obtenir des informations dimensionnelles complémentaires à celle par CD-SEM et notamment la rugosité de bord sur toute la hauteur de la structure. C'est la raison pour laquelle, nous avons décidé d'utiliser le CD-AFM comme outil de caractérisation de LWR pour étudier le transfert de la rugosité de bord de ligne dans les différentes couches nécessaires à la fabrication d'une grille de transistor CMOS. A partir de la mesure du profil du motif par CD-AFM, réalisée après chaque étape de gravure, un protocole expérimental de mesure a été mis au point. Il permet ainsi de remonter aux paramètres dimensionnels importants du procédé de gravure (LWR, CD_{bias} , épaisseur des couches de passivation, vitesse de gravure et sélectivité).

4.1.2. Protocole expérimental

La majeure partie de cette étude a été réalisée sur des plaques de 200mm présentant l'empilement décrit figure 4-2. La lithographie utilisée est la même que celle du chapitre 3, à savoir : une résine à amplification chimique de tonalité positive, d'une épaisseur d'environ

Chapitre 4 : Transfert de la rugosité de bord de ligne

260nm, insolée à une longueur d'onde de 193nm. Le masque lithographique, nommé H10L13, est constitué de 30 puces de 20mm sur 30mm. Sur chaque puce se trouve une zone réservée à la métrologie, constituée de lignes denses et isolées de différentes dimensions. Dans le cadre de la thèse, nous avons uniquement observé les lignes isolées de dimensions visées de 120nm, 140nm et 160nm. Plusieurs étapes de gravure sont nécessaires pour obtenir la grille finale en poly silicium. L'enchaînement de ces différentes étapes est schématisé sur la figure 4-2.

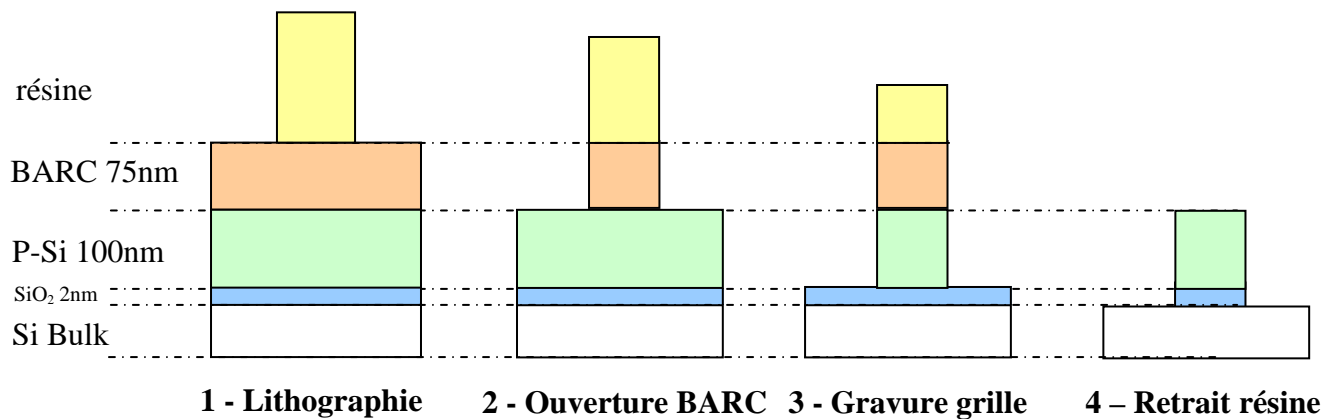


Figure 4-2 : Schéma de l'enchaînement des étapes de gravure nécessaires à la fabrication d'une grille de transistor avec un masque en résine.

Après chacune de ces étapes de gravure, nous avons mesuré, à l'aide du CD-AFM, le profil des lignes afin d'obtenir les valeurs du CD, de LWR et de la hauteur des motifs. Suivant l'information que nous souhaitons obtenir, nous avons appliqué deux protocoles de mesures différents. Le CD et le LWR ont été mesurés à l'aide d'une pointe d'une longueur de 200nm et de 50nm de diamètre (CDR50S), sans toucher le fond du motif. Chaque mesure est constituée de 100 lignes de mesures intégrées sur 2 μ m (cf : chap 2). La faible longueur de ces pointes (200nm) ne permet pas de mesurer l'épaisseur total des lignes d'environ 250nm, après lithographie, ouverture du BARC et gravure de la grille. Nous avons alors utilisé une pointe de 500nm de longueur et de 120nm de diamètre (CDR 120), avec laquelle nous avons appliqué 20 lignes de mesures intégrées sur 2 μ m, pour déterminer la hauteur totale des lignes après ces trois étapes. Ces deux protocoles de mesure ont été appliqués pour chaque étape technologique de fabrication afin d'acquérir un maximum d'informations.

Après chaque étape, nous avons tenté de positionner la pointe toujours au même endroit sur la ligne à l'aide de la vision optique de l'équipement. L'incertitude de placement de la vision optique donnée par le constructeur est de $\pm 1,5\mu$ m. Cette incertitude ne nous garantit donc pas de mesurer toujours la même portion de 2 μ m de la ligne. Néanmoins, par cette méthode de placement, nos mesures sont effectués dans une zone très proche.

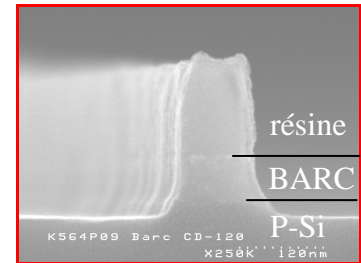
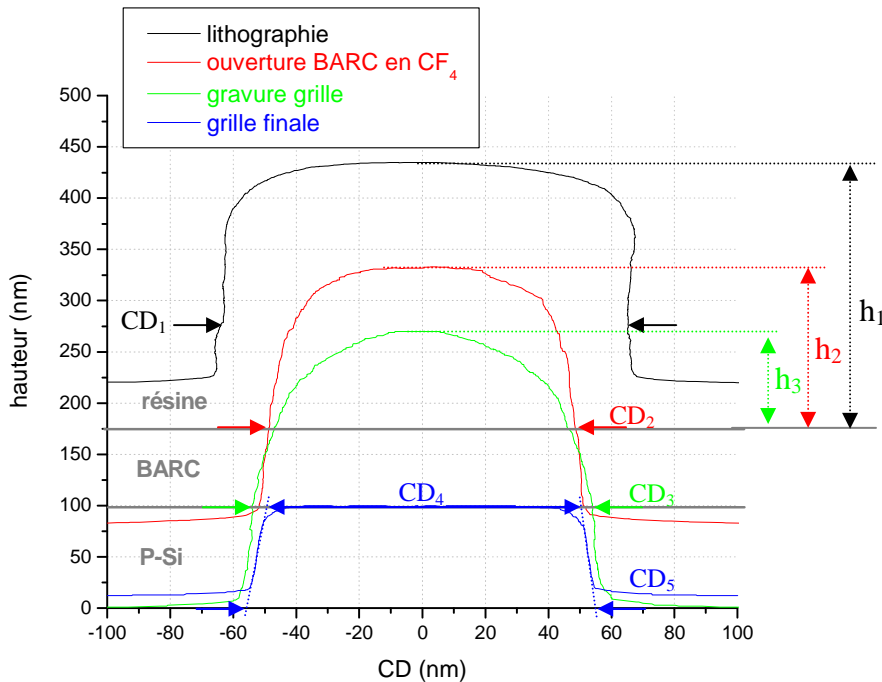
En complément des mesures par CD-AFM, des photos MEB, en vue de coupe, ont été réalisées après chaque étape de gravure. Pour obtenir ces photos, une des puces de la plaque est protégée du plasma, après chaque étape de gravure, par un morceau de silicium fixé par du Kapton.

Chapitre 4 : Transfert de la rugosité de bord de ligne

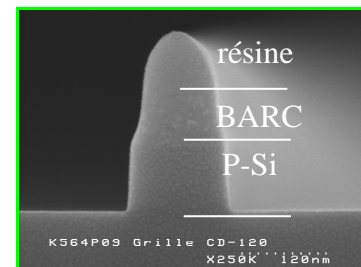
4.1.2.1. Reconstitution de l'évolution du profil de la ligne après chaque étape de gravure

A partir de la mesure AFM du profil moyen de la ligne, après chaque étape technologique et l'épaisseur connue des différentes couches, il est possible de reconstituer l'évolution du profil AFM de la ligne, comme le montre la figure 4-3.

a) Evolution du profil AFM après chaque étape technologique de fabrication d'une grille de transistor



b) Après ouverture BARC



c) Après gravure de la grille

Figure 4-3 : Protocole de reconstitution de l'évolution du profil AFM d'une grille de transistor, après chaque étape technologique de fabrication. a) Evolution du profil AFM, b) Image MEB du profil de la ligne après ouverture BARC, c) Image MEB du profil de la ligne après gravure de la grille.

La hauteur totale de la ligne après lithographie est mesurée à l'aide d'une CDR120. Le profil AFM après lithographie, obtenu avec une CDR50S, est placé en hauteur par rapport à l'interface BARC/résine. Le profil AFM après ouverture du BARC, obtenu avec une CDR120, est ajusté en hauteur d'après la mesure par MEB de l'épaisseur de BARC gravé (figure 4-3c). Après confirmation par imagerie MEB que la totalité du poly silicium de grille a été gravée, le profil AFM après gravure grille, obtenu avec une CDR120, est placé par rapport à l'interface SiO_2 /P-Si. Après le retrait de la résine et des couches de passivation, le haut de la grille correspond à l'interface P-Si/BARC. Le profil de la grille finale, obtenue avec une CDR50S, est alors placé en hauteur par rapport à cette interface.

Cette représentation nous permet alors de déterminer les dimensions importantes de la ligne au cours des différentes étapes ($CD_{1,2,3,4,5}$ et $h_{1,2,3}$). Ces dimensions sont données à $\pm 1,5nm$ (cf : chap 2). A partir de ces mesures, les paramètres importants du procédé de gravure en terme de vitesse de gravure et de sélectivité sont calculés :

- ✓ Vitesse de gravure verticale de la résine lors de l'ouverture du BARC
- ✓ Vitesse de gravure verticale de la résine lors de la gravure de la grille
- ✓ Sélectivité résine / BARC lors de l'ouverture BARC
- ✓ Sélectivité résine / P-Si lors de la gravure de la grille

Chapitre 4 : Transfert de la rugosité de bord de ligne

Dans le but de déterminer le CD_{bias} et l'épaisseur des couches de passivation, nous avons mis en place un protocole de mesure spécifique.

4.1.2.2. Protocole de mesure de l'épaisseur de la couche de passivation et du CD_{bias}

Le profil de la grille finale étant légèrement arrondi en haut du motif, il est difficile de déterminer avec précision la dimension en haut de la ligne, CD_{haut} . Par ailleurs, l'effet d'ombrage de la pointe au pied de la ligne (cf : chap2) ne nous permet pas de déterminer la dimension au pied du motif, CD_{bas} . Pour déterminer ces deux dimensions, nous avons extrapolé le profil de la grille finale à partir de la pente du profil AFM, comme le montre la figure 4-4. Le CD_{haut} et CD_{bas} sont alors définis comme l'intersection de la droite d'extrapolation avec les deux interfaces. Ces deux dimensions nous permettent alors de calculer le CD_{bias} défini par la formule suivante :

$$CD_{bias} = CD_{bas} - CD_{haut}$$

Le CD_{haut} et la dimension de la ligne au niveau de l'interface P-Si /BARC après gravure de la grille, CD_{grille} , nous permettent alors de calculer l'épaisseur de la couche de passivation en haut de la grille, $e_{passivation}$, défini par la formule suivante :

$$e_{passivation} = (CD_{grille} - CD_{haut})$$

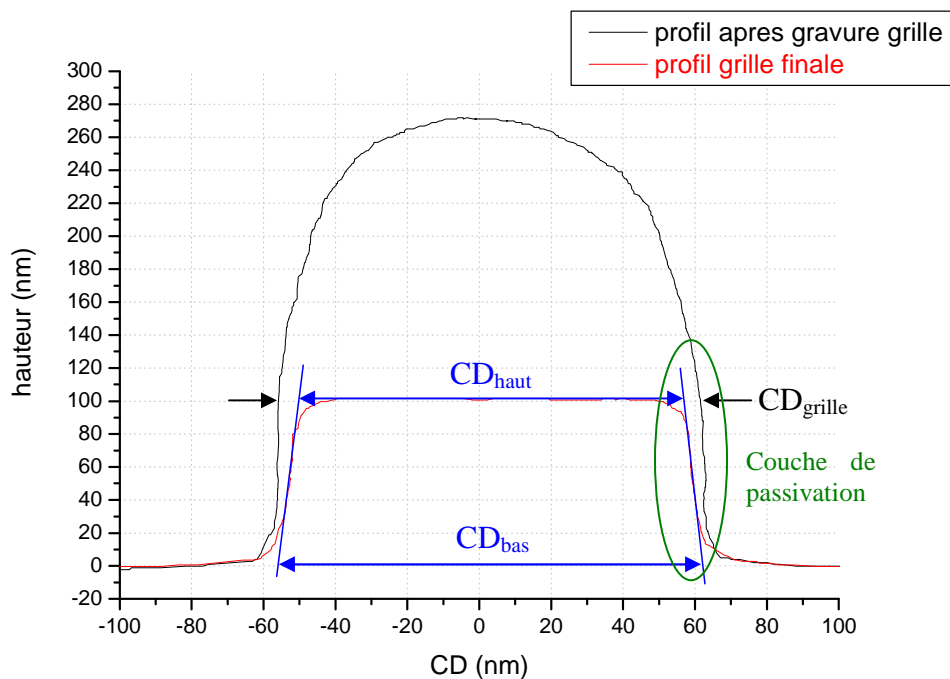


Figure 4-4 : Schéma du protocole de mesure de l'épaisseur de la couche de passivation ($e_{passivation}$) et du CD_{bias} , à partir de la mesure du profil AFM, après gravure de la grille et grille finale.

4.1.2.3. Mesure de LWR

D'après le protocole expérimental de mesure de LWR décrit dans le chapitre 2, à savoir 100 lignes de mesure sur $2\mu\text{m}$, nous obtenons, après chaque étape technologique de

Chapitre 4 : Transfert de la rugosité de bord de ligne

fabrication, un LWR à différentes hauteurs de la ligne (tous les 20nm). Ces valeurs nous permettent alors de calculer le LWR moyen sur l'épaisseur de la ligne. Sur les graphes de l'évolution de LWR, au cours des différentes étapes de gravure, présentés dans ce chapitre, le LWR donné, correspond à cette valeur moyenne sur la hauteur de la ligne. Les barres d'erreurs correspondent aux mesures de répétabilité de LWR à 3σ , présenté dans le chapitre 2 section 2.4.3.2. Ces barres d'erreurs sont égales sur résine et BARC à 20% de la valeur mesurée et 12% sur silicium.

Du fait de la faible longueur des pointes de mesures de LWR (200nm), les mesures ne sont accessibles après ouverture du BARC, que dans la résine et après gravure de la grille, seulement dans le BARC.

4.2. Evolution de la rugosité de bord après ouverture du BARC et gravure de la grille.

4.2.1. Evolution de la rugosité de bord de la résine après ouverture du BARC

L'objectif de cette étude est d'identifier l'influence du procédé d'ouverture BARC sur la rugosité de bord de ligne de la résine. Les chimies de plasma utilisées pour graver le BARC, qui est un composé organique, sont souvent à base d'oxygène ou de gaz fluorocarbonés. Il est alors difficile de trouver des chimies de gravure qui soient sélectives vis-à-vis du masque en résine, qui est lui-même un polymère organique. Pour cette étude, deux chimies de gravure du BARC ont été mises au point : une à base de CF_4 et l'autre à base de Cl_2/O_2 . Les deux procédés d'ouverture BARC étudiés et mis au point dans la DPS sont les suivants :

- ✓ **Procédé en CF_4** : 100sccm de CF_4 / Puissance Source de 1000 W / Puissance d'auto polarisation de 50W / Pression de 20mT.
- ✓ **Procédé en Cl_2/O_2** : 40 sccm de Cl_2 / 20 sccm d' O_2 / puissance Source de 360 W / puissance d'auto polarisation de 50W / pression de 4mT.

Le BARC est un polymère composé de Carbone, Hydrogène et Oxygène. Un des produits de gravure principale du BARC est le CO dont la raie d'émission optique se situe à 483nm. La chute de l'intensité d'émission de cette raie lors du procédé de gravure, nous indique la fin de la gravure du BARC et l'arrivée du plasma sur le poly-silicium. La figure 4-5 présente les traces de l'évolution de l'intensité de la raie d'émission optique du CO à 483nm, au cours des deux procédés de gravure du BARC employés.

Dans le cas du procédé en CF_4 , nous observons que la raie CO a complètement chuté au bout de 29 s de procédé, indiquant l'arrivée du plasma sur le poly-silicium de grille. Or, le procédé de gravure a été appliqué pendant 34s. La chimie de gravure en CF_4 est connue pour être très peu sélective vis-à-vis du silicium, le poly silicium a donc été gravé durant les 5s restantes du procédé. L'image MEB du profil de la ligne après ouverture du BARC en CF_4 , figure 4-6a, nous indiquent que nous avons effectivement commencé à graver le poly silicium sur une épaisseur de 20nm. Dans le cas du procédé en Cl_2/O_2 , la gravure a été arrêtée en suivant la raie d'émission du CO (arrêt après 27 s de procédé). La raie d'émission du CO n'ayant pas complètement diminuée au bout de 27 s, le BARC n'a probablement pas été entièrement gravé. L'image MEB du profil de la ligne après ouverture du BARC en Cl_2/O_2 , figure 4-6b, nous confirme que seulement 62 nm de BARC ont été gravé, sur les 75 nm initialement présent.

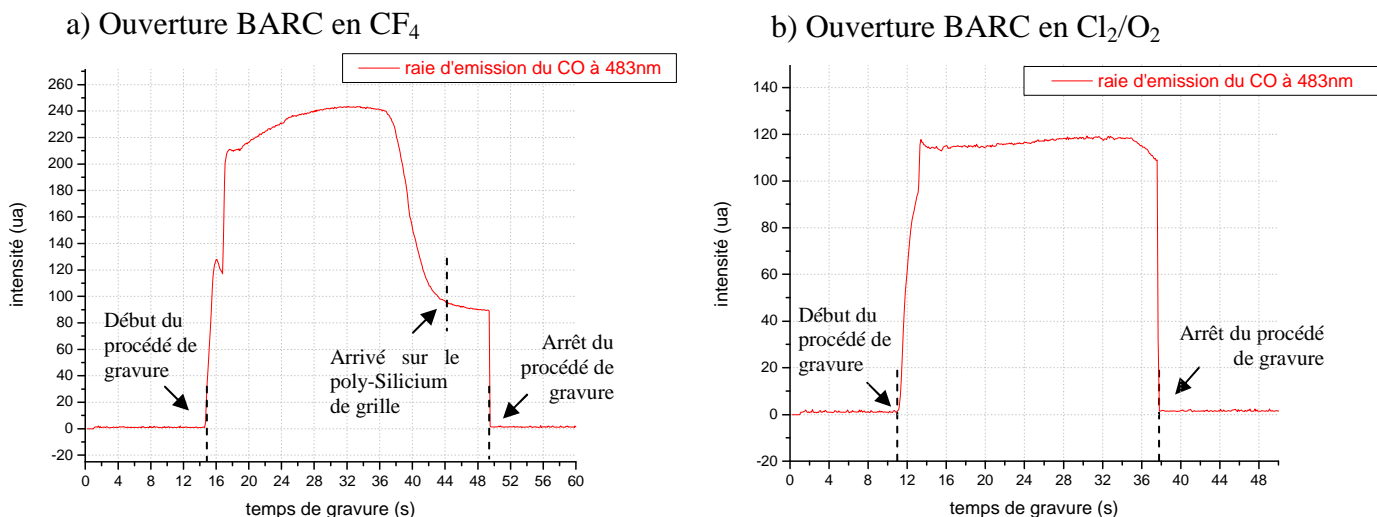


Figure 4-5 : Evolution de l'intensité d'émission optique du CO à 483nm a) lors du procédé de gravure du BARC en CF₄, b) lors du procédé d'ouverture du BARC en Cl₂/O₂

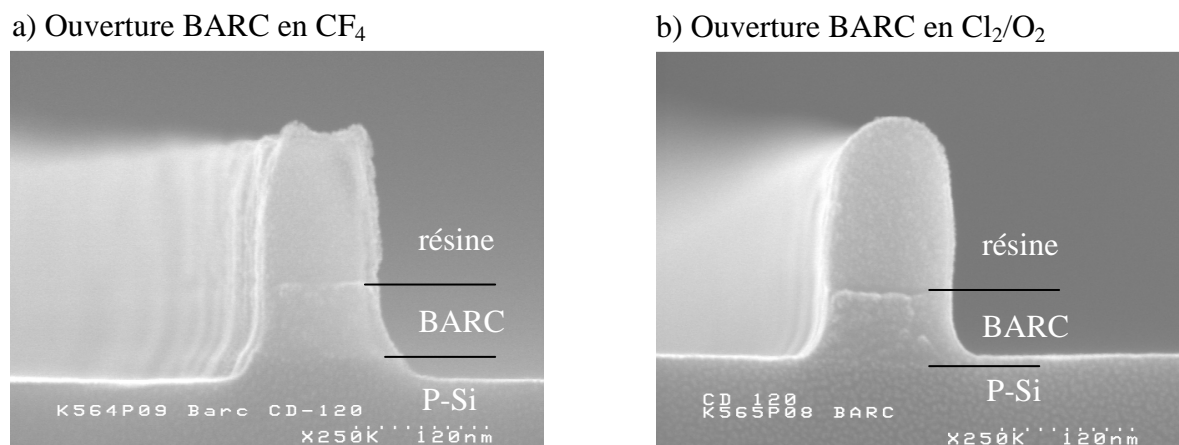
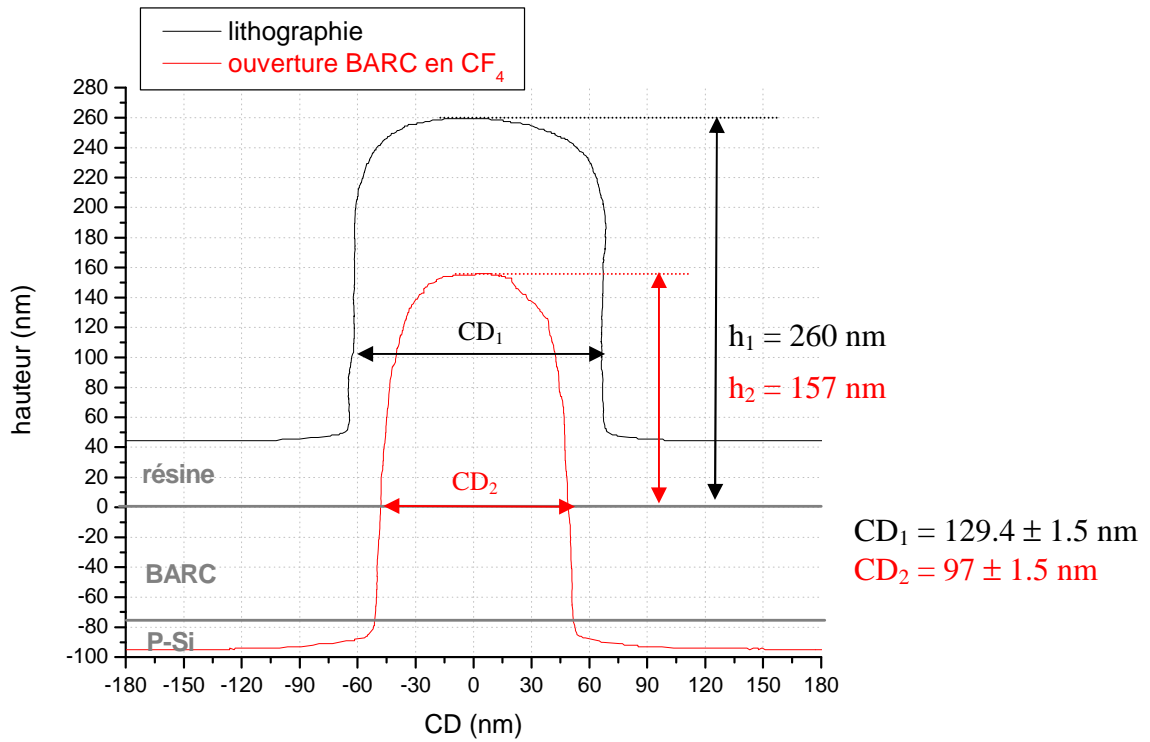


Figure 4-6 : Image MEB, en vue de coupe, du profil d'une ligne isolée de 120nm a) après gravure du BARC en CF₄, b) après gravure du BARC en Cl₂/O₂.

4.2.1.1. Contrôle dimensionnel

A l'aide du protocole expérimental décrit précédemment (section 5.1.2), l'évolution du profil d'une ligne de 120nm, avant et après gravure du BARC en CF₄ et en Cl₂/O₂, a été reconstituée, figure 4-7.

a) Ouverture BARC en CF_4



b) Ouverture BARC en Cl_2/O_2

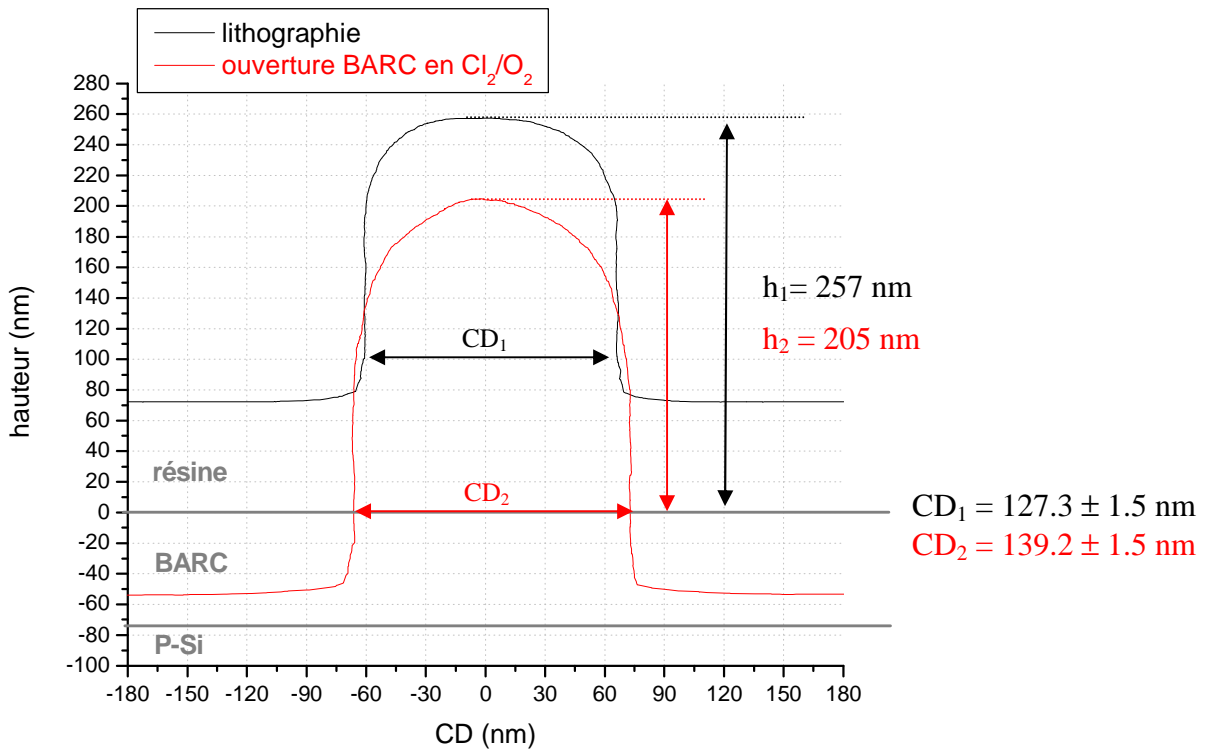


Figure 4-7 : Evolution du profil AFM d'une ligne isolée de 120nm avant et après gravure du BARC a) après ouverture du BARC en CF_4 durant 34s, b) après ouverture du BARC en Cl_2/O_2 durant 23s

Chapitre 4 : Transfert de la rugosité de bord de ligne

Ces mesures nous permettent ainsi de calculer les paramètres importants du contrôle dimensionnel. Le tableau 4-1 donne les résultats en terme de vitesse de gravure et de contrôle dimensionnel pour les deux procédés d'ouverture BARC utilisés.

	Ouverture du BARC en CF ₄	Ouverture du BARC en Cl ₂ /O ₂
Vitesse de gravure verticale de la résine (nm/s)	3	2.3
Vitesse de gravure verticale du BARC (nm/s)	2.6	2.3
Sélectivité BARC / résine = vitesse BARC / vitesse résine	0.86	1
Perte (-) ou gain de CD (+) de la résine après ouverture BARC (nm) = CD ₁ - CD ₂	- 32.4 ± 3	+ 11.9 ± 3

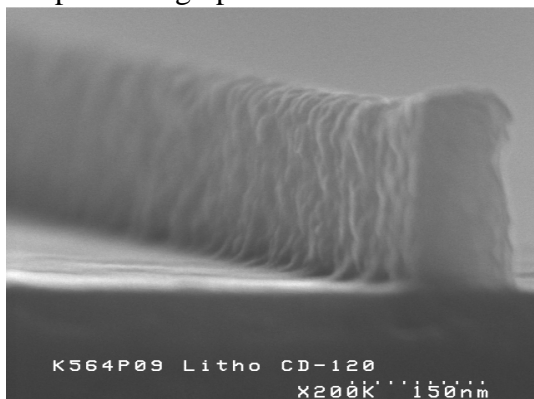
Tableau 4-1 : Résultats sur le contrôle dimensionnel des procédés d'ouverture BARC en CF₄ et Cl₂/O₂.

Tout d'abord, le procédé en Cl₂/O₂ présente la meilleure sélectivité de gravure. Nous remarquons que le procédé d'ouverture du BARC en CF₄ entraîne une érosion latérale de la résine contrairement au procédé en Cl₂/O₂ qui élargit la dimension initiale du motif de résine. Des études, basées sur des analyses XPS, montrent que la gravure du BARC en Cl₂/O₂, aboutit à la formation d'une couche chloro-carbonée épaisse sur les flancs de la résine et du BARC qui élargit la dimension de la ligne [Parg 04]. Pour la gravure du BARC en CF₄, ces analyses XPS montrent la présence d'une couche réactive fluorocarbonée relativement fine (de l'ordre du nm) sur les flancs de la résine. Ces mesures dimensionnelles, par CD-AFM, sont donc en accord avec les résultats de ces analyses XPS.

4.2.1.2. Evolution de LWR

Dans cette partie, nous nous sommes intéressés à l'évolution de la rugosité de bord de ligne de la résine, après ouverture du BARC. Pour les deux procédés utilisés, des images MEB du flanc d'une ligne isolée de 120nm, avant et après ouverture du BARC, sont montrées sur les figures 4-8 et 4-9.

a- après lithographie



b- après ouverture BARC en CF₄

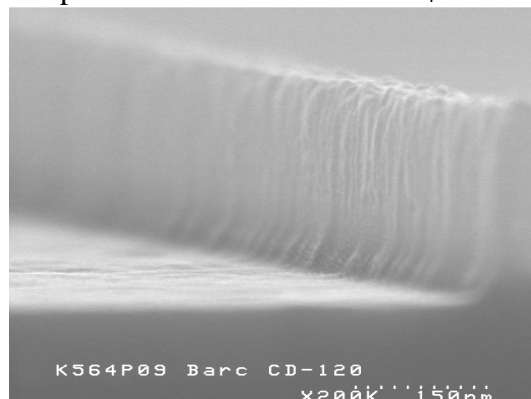
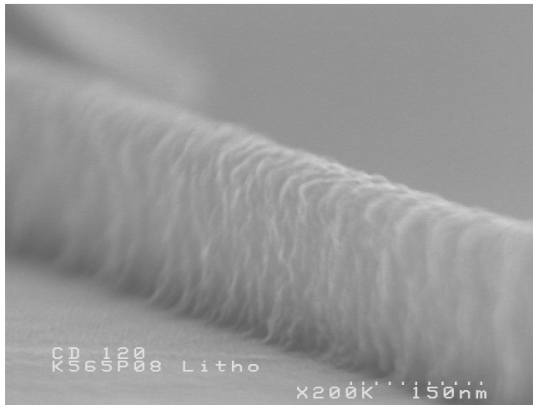


Figure 4-8 : Images MEB du flanc d'une ligne isolée de 120nm a) après lithographie, b) après gravure du BARC en CF₄.

a- après lithographie



b- après ouverture BARC en Cl₂/O₂

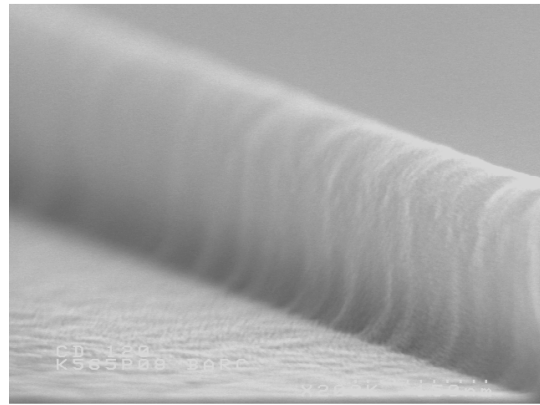


Figure 4-9 : Images MEB du flanc d'une ligne isolée de 120nm a) après lithographie, b) après gravure du BARC en Cl₂/O₂.

Quelque soit le procédé de gravure utilisé, nous remarquons que le flanc du profil de la ligne après ouverture BARC, apparaît moins rugueux qu'après lithographie. Nous avons voulu confirmer cette observation en mesurant la rugosité de bord de ligne par CD-AFM, avant et après ouverture du BARC.

Cependant, la mesure par CD-AFM, du profil de la ligne après ouverture du BARC en Cl₂/O₂, a posé de nombreux problèmes. En effet, la plupart du temps, le diamètre de la pointe augmentait fortement après plusieurs lignes de mesures. Un exemple de l'évolution du profil de la pointe après plusieurs mesures AFM d'une ligne gravée en Cl₂/O₂ est montré sur la figure 4-10. Nous remarquons que le diamètre de la pointe augmente de manière quasi linéaire au fur et à mesure du nombre de lignes de mesures, figure 4-11. Cette augmentation du diamètre de la pointe lors de la mesure empêche la validation de la mesure (cf : chap 2). Ce phénomène est probablement dû à l'interaction, lors de la mesure, entre la pointe et la couche chloro-carbonée présente sur le flanc de la ligne après gravure. En effet, lors de la mesure, la pointe se colle sur le flanc du motif (cf : chap 2). Lors du décollage de la pointe, il est possible que des particules de résine faiblement solidaires restent sur la pointe, augmentant alors son diamètre. Malgré cet inconvénient de mesure, nous avons réussi à obtenir une mesure valable après ouverture BARC en Cl₂/O₂, nous permettant ainsi de pouvoir comparer l'évolution de la rugosité de bord de ligne de ce procédé à celui en CF₄.

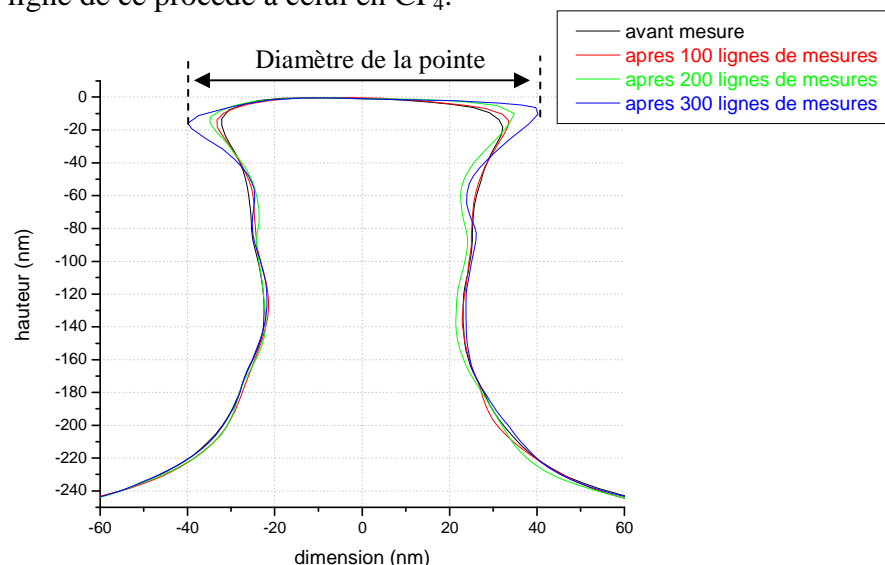


Figure 4-10 : Evolution du profil de la pointe après plusieurs mesures d'une ligne gravée en Cl₂/O₂

Chapitre 4 : Transfert de la rugosité de bord de ligne

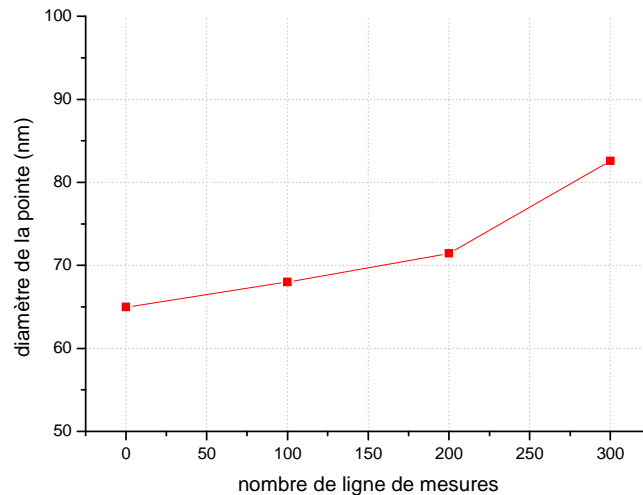


Figure 4-11 : Evolution du diamètre de la pointe en fonction du nombre de ligne de mesures effectuées sur une ligne gravé en Cl_2/O_2 .

La figure 4-12 présente les mesures, par CD-AFM, de LWR à différentes hauteurs sur une ligne de 120nm, avant et après gravure du BARC, pour les deux procédés utilisés. Les valeurs chiffrées de LWR indiquées sur les graphes, correspondent à la valeur moyenne et l'écart type de LWR sur toute la hauteur du motif.

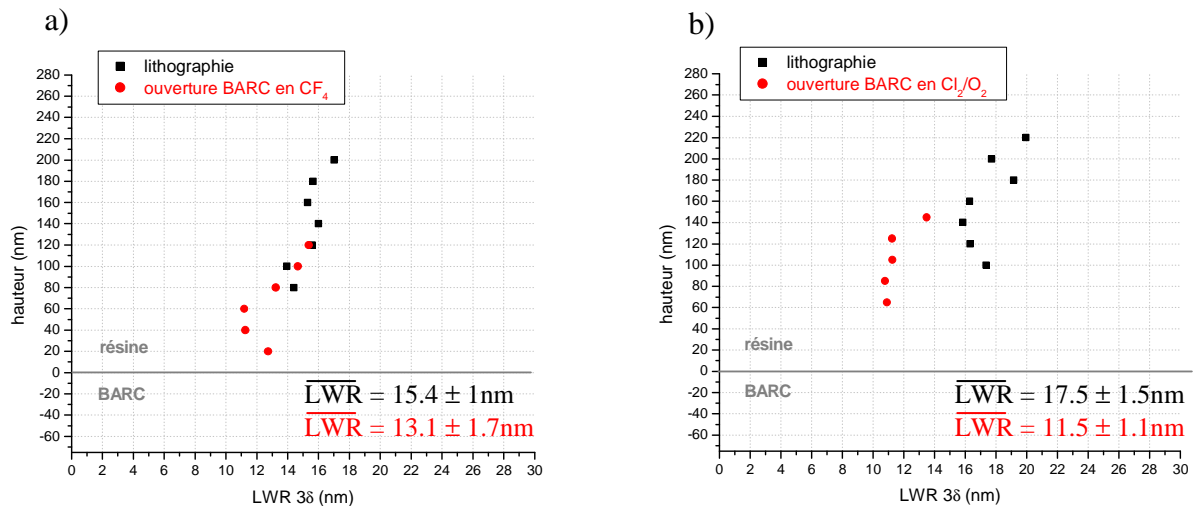


Figure 4-12 : Mesures de LWR à différentes hauteurs sur une ligne de 120nm après lithographie et après gravure du BARC, a) après ouverture BARC en CF_4 , b) après ouverture BARC en Cl_2/O_2 .

Pour les deux procédés d'ouverture du BARC, nous notons une réduction de LWR après gravure. Il semble donc qu'un procédé d'ouverture BARC diminue la rugosité de bord de ligne de la résine. Pour les deux procédés de gravure employés, nous sommes en présence d'une gravure assistée par le bombardement ionique. D'après les résultats du chapitre 4, ce lissage de la rugosité de bord de ligne peut être attribué à l'action du bombardement ionique énergétique et directif sur la résine. Par ailleurs, il semble que la diminution de LWR sur la résine après ouverture du BARC en Cl_2/O_2 est plus importante qu'après gravure en CF_4 . En considérant la directivité et l'énergie des ions, comme principaux facteurs responsables du lissage de la rugosité de bord, il est possible d'expliquer la cause de cet effet. En effet, dans le cas du procédé d'ouverture BARC en Cl_2/O_2 , la puissance source appliquée (360W) est plus faible qu'avec le procédé en CF_4 (1000W). Par conséquent, la densité ionique doit être plus faible en Cl_2/O_2 qu'en CF_4 . Or, la puissance d'auto polarisation est égale pour les deux

procédés, le bombardement ionique arrivant sur le substrat doit donc être plus énergétique pour le procédé en Cl_2/O_2 que celui en CF_4 . En outre, la pression est moins importante en Cl_2/O_2 , le nombre de collisions dans la gaine est donc moins important. Ainsi les ions qui arrivent sur le substrat sont plus directionnels dans le cas du procédé d'ouverture du BARC en Cl_2/O_2 .

Le procédé d'ouverture du BARC en Cl_2/O_2 semble lisser plus la rugosité de bord de ligne de la résine, mais élargit la dimension du motif et pose de nombreux problèmes de mesures. C'est pourquoi, nous avons préféré utiliser le procédé d'ouverture du BARC en CF_4 , pour la suite de nos études sur le transfert de la rugosité de bord de ligne lors de l'étape de gravure de la grille.

4.2.2. Evolution de la rugosité de bord de la grille finale lors de l'étape de gravure de la grille.

Dans cette partie, nous nous sommes uniquement intéressés à l'évolution de la rugosité de bord de la grille finale, lors de l'étape de gravure de la grille, indépendamment de l'ouverture du BARC. Pour cela, nous avons appliqué, pour chaque expérience, la même ouverture du BARC en CF_4 , que celle étudiée dans la partie précédente (section 5.1.1). Dans un premier temps, nous avons étudié l'influence d'une augmentation de la concentration d'oxygène lors de la gravure principale de la grille, pour deux poly silicium de grille différents. Ensuite, l'influence de la chimie de gravure de la grille a été examinée. Finalement, nous avons étudié l'impact de l'ajout d'une étape d'atterrissage sur l'oxyde et de sur gravure à l'étape de gravure principale afin d'étudier un procédé de gravure de grille complet.

4.2.2.1. Influence de la concentration d'oxygène

Dans cette partie, nous avons voulu observer l'influence de l'épaisseur des couches de passivation sur la rugosité de bord de la grille finale. Il est connu qu'une augmentation du débit d'oxygène lors de l'étape de gravure principale de la grille entraîne une augmentation de l'épaisseur des couches de passivation formées sur le flanc de la grille en silicium [Parg 04]. Cette étude a été réalisée sur deux poly silicium de grille différents ; le HIGV et le DEPAMOXA. Le HIGV est déposé à 580°C et présente une structure colonnaire, sa rugosité de surface (à un σ) est de 2.97nm. Le DEPAMOXA est un poly silicium amorphe déposé à 550°C , présentant une rugosité de surface (à un σ) de 0.48nm. Dans les deux cas, nous avons appliqué le même procédé de gravure de la grille, décrit ci-dessous, et modifié uniquement le débit d'oxygène.

Procédé de gravure du poly-silicium de grille :

BT : 70 sccm CF_4 / Puissance source de 1000W / Puissance d'auto polarisation de 150W / Pression totale de 4mT / Temps de gravure de 5s

ME : 120sccm HBr / 40sccm Cl_2 / **Variation débit O_2** / Puissance source de 250W / Puissance d'auto polarisation de 120W / Pression totale de 4mT

✓ Cas du poly-silicium HIGV

Pour cette étude, trois débits d'oxygène différents ont été appliqués : 1,5sccm, 5sccm et 8sccm. Le débitmètre d'oxygène ne pouvant délivrer un flux stable inférieur à 5sccm, nous avons introduit 5sccm d'un mélange hélium-oxygène contenant 30% d'oxygène, pour obtenir un débit d'oxygène de 1.5sccm. Pour les trois expériences, la gravure a été arrêtée dès la chute de la raie d'émission à 288nm du silicium, qui indique qu'il n'y a plus de silicium à graver.

A l'aide du protocole expérimentale décrit précédemment (section 5.1.2), nous avons voulu vérifier que le fait d'augmenter le débit d'oxygène entraînait bien une augmentation de l'épaisseur de la couche de passivation. La figure 4-13 présente les mesures de l'épaisseur de la couche de passivation des trois lignes isolées de dimension visées 120, 140 et 160nm, suivant le débit d'oxygène introduit dans le réacteur de gravure lors de l'étape de gravure de la grille.

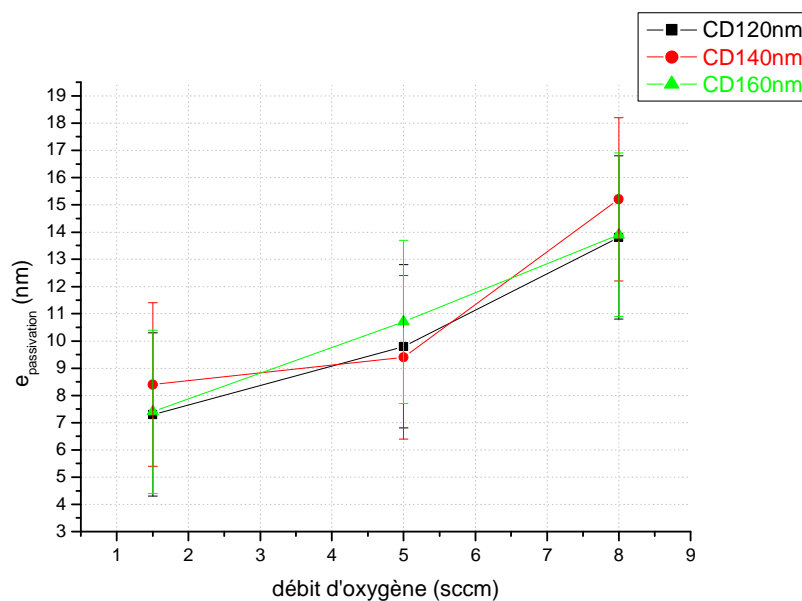


Figure 4-13 : Evolution de l'épaisseur de la couche de passivation en fonction du débit d'oxygène introduit dans le réacteur pour trois lignes isolées de dimensions visées 120nm, 140nm, 160nm.

Malgré l'importance des barres d'incertitude, la tendance qui se dégage du graphe est qu'une hausse de la concentration d'oxygène entraîne bien une augmentation de l'épaisseur de la couche de passivation formée sur les flancs de la grille en poly-silicium et ceci quelque soit la dimension visée. Ce résultat n'a rien de surprenant et confirme bien les résultats d'études antérieures [Pargon 04].

Chapitre 4 : Transfert de la rugosité de bord de ligne

✓ Contrôle dimensionnel

La figure 4-14 montre les mesures de l'épaisseur des couches de passivation en fonction du CD_{bias} de la grille finale, pour les trois dimensions mesurées.

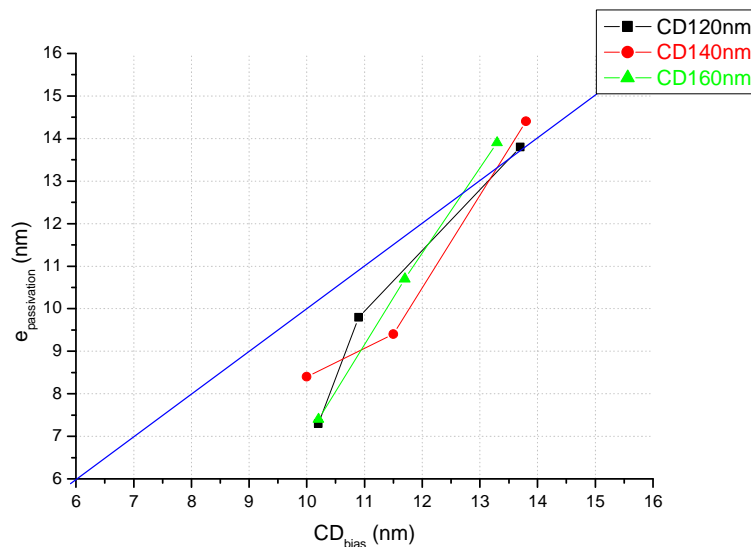


Figure 4-14 : Evolution de l'épaisseur des couches de passivation en fonction du CD_{bias} pour les trois dimensions mesurées, 120, 140 et 160nm.

Nous remarquons qu'une diminution de l'épaisseur de la couche de passivation améliore le contrôle dimensionnel. En effet, le CD_{bias} obtenu est faible lorsque que les couches de passivation sont fines. Ceci indique une forte corrélation entre l'épaisseur des couches de passivation formées sur les flancs de la grille en silicium et la pente générée dans le profil de la grille finale. L'utilisation d'une chimie pauvre en oxygène semble donc une solution intéressante pour la mise au point de procédé de gravure grille visant des dimensions de grilles sub-50nm.

Par ailleurs, à l'aide du protocole expérimental décrit précédemment (section 4.1.2), nous calculons les paramètres importants du contrôle dimensionnel suivant le débit d'oxygène introduit dans le réacteur. Le tableau 4-2 récapitule ces résultats.

Débit oxygène lors de la gravure de la grille (sccm)	1.5	5	8
Vitesse de gravure verticale de la résine (nm/s)	1.37	1.39	1.42
Vitesse de gravure verticale du silicium (nm/s)	1.86	1.95	2
Sélectivité silicium / résine	1.36	1.4	1.4
$CD_{\text{bias_grille}} \text{ (nm)} = CD_5 - CD_4$	10.2	11.7	13.3
$e_{\text{passivation}} \text{ (nm)} = CD_3 - CD_4$	7.4	10.7	13.9
$CD_{\text{bias_total}} \text{ (nm)} = CD_5 - CD_1$	- 18.6	-18.4	-15.2

Tableau 4-2 : Résultats sur le contrôle dimensionnel, pour une ligne de 160nm, du procédé de gravure de la grille (HIGV).

Chapitre 4 : Transfert de la rugosité de bord de ligne

Nous remarquons que la vitesse de gravure verticale du silicium augmente légèrement avec la concentration d'oxygène introduite dans le réacteur. Ce résultat est cohérent avec la littérature [Cunge 02, Cunge 04]. En effet, lors de la gravure du silicium à base de Chlore, l'augmentation de la concentration d'oxygène favorise le dépôt de SiOCl sur les parois du réacteur. La formation de ce dépôt augmente alors la concentration de chlore atomique disponible pour la gravure du silicium, du fait de la diminution de la probabilité de recombinaison du chlore atomique pour former du Cl_2 [Cunge 06].

✓ Evolution de LWR

La figure 4-15 présente l'évolution de LWR après chaque étape technologique de fabrication, d'une ligne de 160nm, pour les trois débits d'oxygène expérimentés.

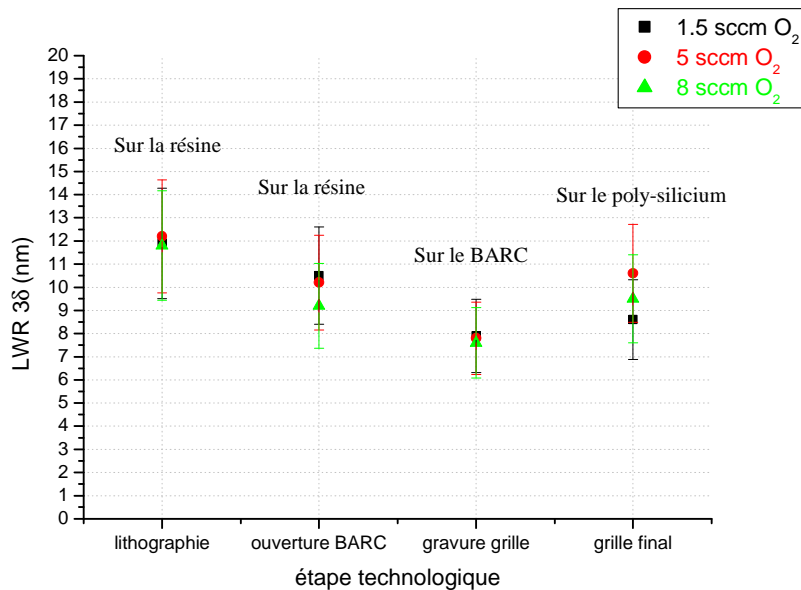


Figure 4-15 : Evolution de LWR à 3σ, après chaque étape technologique de fabrication, d'une ligne de 160nm, suivant le débit d'oxygène introduit dans le réacteur lors de la gravure principale de la grille en poly silicium de type HIGV.

Pour les trois débits d'oxygène, aucune différence flagrante de LWR de la grille finale n'est remarquée. En effet, les différences de LWR sont comprises dans les incertitudes de mesure. L'épaisseur de la couche de passivation ne semble donc pas avoir d'impact sur le transfert de la rugosité de bord finale de la grille. Nous remarquons également que, pour les trois débits d'oxygène, le LWR de la grille finale correspond au LWR sur la résine après ouverture du BARC. La rugosité de bord de ligne sur la résine après ouverture du BARC semble donc se transférer dans la grille. Par ailleurs, nous notons une légère diminution de LWR sur le BARC après gravure de la grille. D'après les résultats du chapitre 3, un procédé plasma avec bombardement ionique conduit à un lissage de la rugosité de bord de la résine. Or, ce procédé de gravure grille est une gravure ionique réactive. La diminution de LWR sur le BARC après l'étape de gravure de la grille peut alors être expliquée par l'action du bombardement ionique sur le BARC.

✓ Cas du poly silicium DEPAMOXA

Cette étude a également été effectuée avec un poly-Silicium de grille différent, nommé DEPAMOXA, qui présente une rugosité de surface moins importante que le HIGV. Pour cette étude, nous avons appliqué deux débits d'oxygène différents lors de l'étape de gravure de la grille ; 1,5 et 8sccm d'O₂.

A l'aide du protocole expérimental décrit précédemment (section 4.1.2), nous avons également voulu vérifier que le fait d'augmenter le débit d'oxygène entraînait bien une augmentation de l'épaisseur de la couche de passivation. La figure 4-16 présente les mesures de l'épaisseur de la couche de passivation, des trois lignes isolées de dimension visées 120, 140 et 160nm, suivant les deux débits d'oxygène introduits dans le réacteur de gravure lors de l'étape de gravure de la grille.

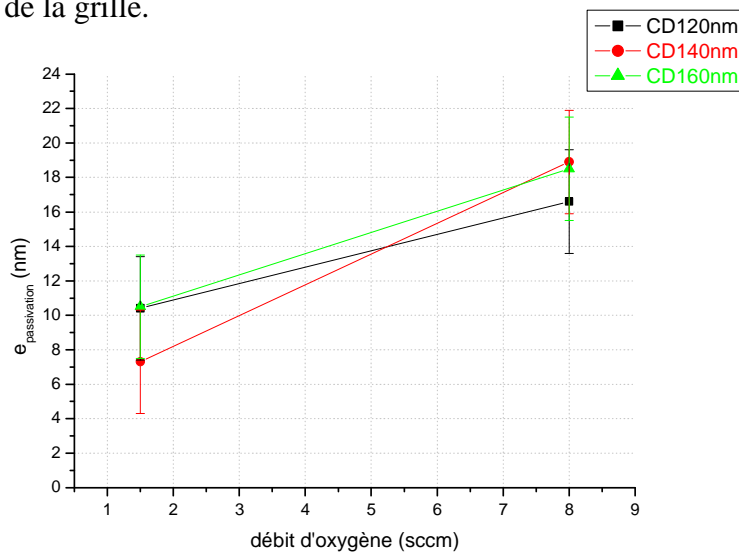


Figure 4-16 : Evolution de l'épaisseur de la couche de passivation en fonction du débit d'oxygène introduit dans le réacteur pour trois lignes isolées de dimensions visées 120nm, 140nm, 160nm.

Comme pour le poly-silicium HIGV, nous remarquons qu'une hausse de la concentration d'oxygène entraîne bien une augmentation de l'épaisseur des couches de passivation présentes sur les flancs du poly silicium après gravure. Par ailleurs, nous remarquons que l'épaisseur des couches de passivation est plus importante que dans le cas du HIGV.

✓ Contrôle dimensionnel

A l'aide du protocole expérimental décrit précédemment (section 4.1.2), nous calculons les paramètres importants du contrôle dimensionnel. Le tableau 4-3 récapitule ces résultats pour une ligne de 160nm.

Chapitre 4 : Transfert de la rugosité de bord de ligne

Débit oxygène lors de la gravure de la grille (sccm)	1.5	8
Vitesse de gravure verticale de la résine lors de la gravure grille (nm/s)	1.25	1.56
Vitesse de gravure verticale du silicium (nm/s)	1.77	2.16
Sélectivité silicium / résine	1.42	1.38
$CD_{bias_grille} (nm) = CD_5 - CD_4$	14	21
$e_{passivation} (nm) = CD_3 - CD_4$	10.5	18
$CD_{bias_total} (nm) = CD_5 - CD_1$	-12.5	-7.6

Tableau 4-3 : Résultats sur le contrôle dimensionnel, pour une ligne de 160nm, du procédé de gravure de la grille (DEPAMOXA).

Comme dans le cas du HIGV, nous constatons qu'une augmentation de la concentration d'oxygène entraîne également une augmentation de la vitesse de gravure du silicium. La figure 4-17 montre les mesures de l'épaisseur des couches de passivation en fonction du CD_{bias} de la grille finale pour les trois dimensions mesurées.

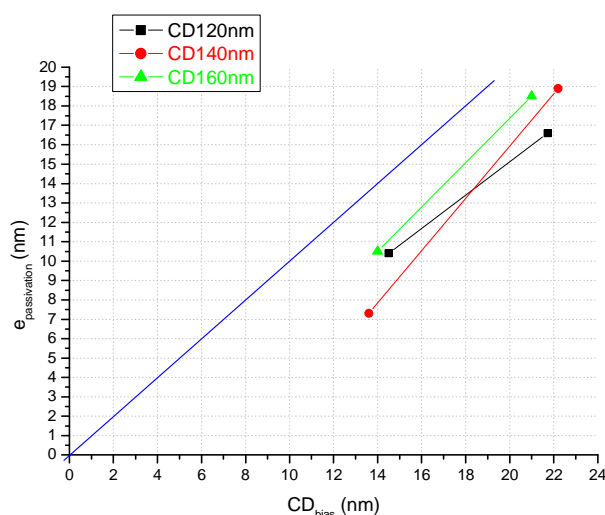


Figure 4-17 : Evolution de l'épaisseur des couches de passivation en fonction du CD_{bias} pour les trois dimensions mesurées, 120, 140 et 160nm.

Comme dans le cas du HIGV, nous remarquons une forte corrélation entre l'épaisseur des couches de passivation formées sur les flancs de la grille en silicium et le contrôle dimensionnel lors de l'étape de gravure de la grille. D'après les résultats de ces expériences, l'utilisation d'une chimie pauvre en oxygène semble donc une solution intéressante pour la mise au point de procédé de gravure grille visant des dimensions de grilles sub-50nm.

Evolution de LWR

La figure 4-18 présente l'évolution de LWR, après chaque étape technologique de fabrication, d'une ligne de 160nm, pour les deux débits d'oxygène expérimentés.

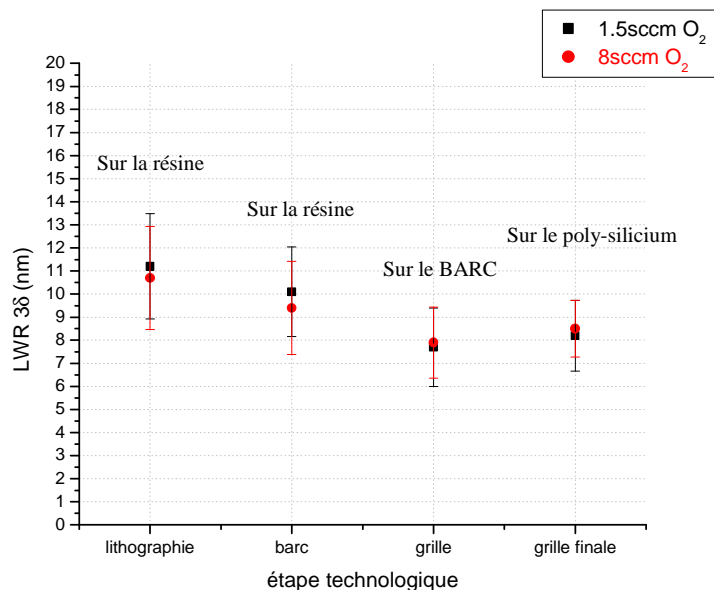


Figure 4-18 : Evolution de LWR à 3σ, après chaque étape technologique, d'une ligne de 160nm, suivant le débit d'oxygène introduit dans le réacteur lors de la gravure principale de la grille en poly silicium de type DEPAMOXA.

Nous ne remarquons aucune différence de LWR sur la grille finale suivant le débit d'oxygène introduit dans le réacteur. Cette remarque confirme que l'épaisseur des couches de passivation ne semble pas influencer pas la rugosité de bord de la grille finale.

✓ Influence de la nature du matériau de grille

Les deux poly-siliciums étudiés dans cette partie présentent des rugosités de surface différentes. Le HIGV, de structure colonnaire, a une rugosité de surface de 2.97nm, et le DEPAMOXA, amorphe, a une rugosité de surface (à un σ) égale à 0.48nm. A partir des résultats de cette partie, nous avons comparé l'évolution de la rugosité de bord, suivant le poly silicium de grille utilisé. Pour cette comparaison, la gravure de la grille s'est effectuée avec un débit d'oxygène de 1.5sccm. La figure 4-19 présente l'évolution de LWR après chaque étape technologique d'une ligne de 160nm, pour les deux poly-siliciums employés.

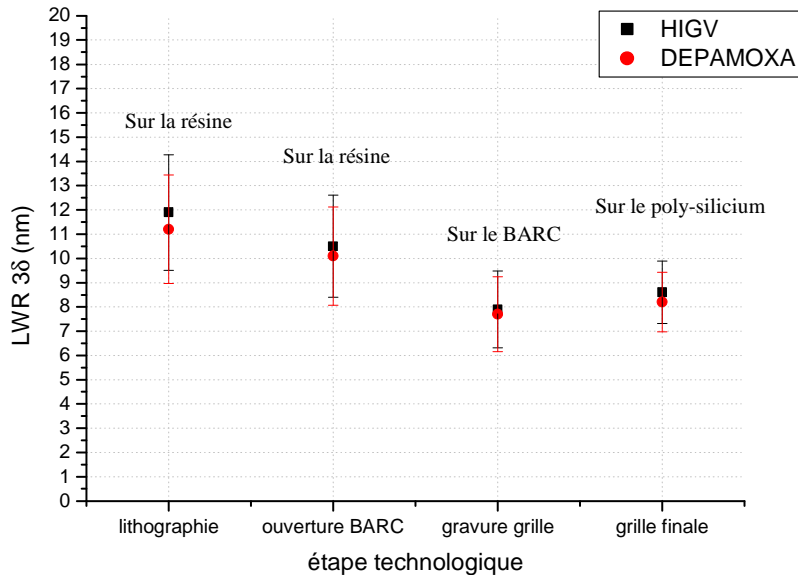


Figure 4-19 : Evolution de LWR à 3σ, après chaque étape technologique de fabrication, d'une ligne de 160nm, suivant le type de poly silicium de grille utilisé.

Aucune différence de LWR n'est notée sur la grille finale suivant le poly-silicium utilisé. Par conséquent, il semble que la nature du matériau de grille n'influence pas la rugosité de bord de la grille finale. Cependant, il est probable que ce paramètre puisse influencer la rugosité de bord finale, mais avec le protocole expérimental utilisé pour mesurer le LWR, il est possible que nous ne soyons pas assez précis pour distinguer une différence de LWR.

4.2.2.2. Influence de la chimie de gravure de la grille

Dans cette partie, nous avons voulu observer l'influence de la chimie de gravure sur la rugosité de bord de ligne de la grille finale. Il est connu que le fluor attaque le silicium de manière spontanée et isotrope. Par ailleurs, des chimies de gravure fluorées sont couramment employées pour graver de grilles en silicium à partir d'un masque en carbone où l'oxygène est proscrit. Nous avons alors développé un procédé de gravure de la grille en poly-silicium à base d'une chimie fluorée. Le procédé utilisé est le suivant :

Procédé de gravure du poly-silicium :

BT : 70 sccm CF₄ / Puissance source de 1000W / Puissance d'auto polarisation de 150W / Pression totale de 4mT / Temps de gravure de 5s

ME : 10sccm SF₆ / 20sccm CH₂F₂ / 90sccm Ar / Puissance source de 450W / Puissance d'auto polarisation de 75W / Pression totale de 5mT / Temps de gravure de 70s

✓ Contrôle dimensionnel

La figure 4-20 montre le profil AFM d'une ligne de 160nm après chaque étape technologique de fabrication. Contrairement au procédé en HBr/Cl₂/O₂, cette chimie de gravure forme des couches de passivation fluorocarbonées sur les flancs du poly-silicium. Ce type de couche est facilement retiré par plasma d'oxygène. Dans ce cas, le profil de la grille finale a donc été obtenu directement après l'étape de retrait de la résine par plasma d'oxygène.

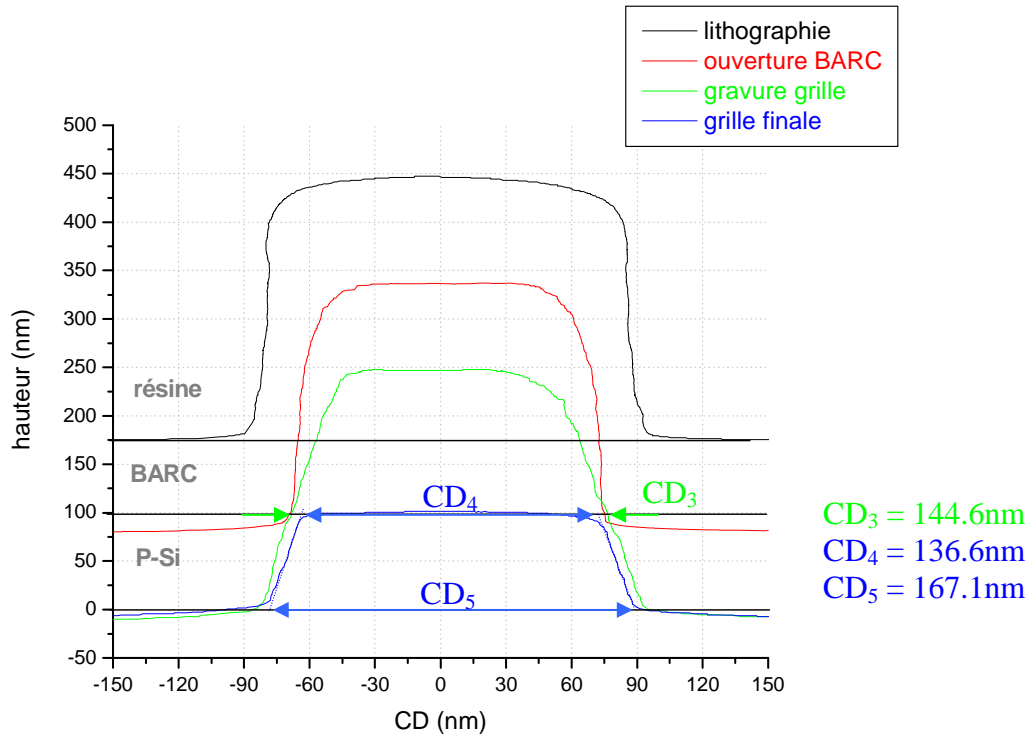


Figure 4-20 : Mesure par CD-AFM, de l'évolution du profil d'une ligne isolée de 160nm après chaque étape technologique de fabrication (lithographie, ouverture BARC, gravure grille en SF₆/CH₂F₂, retrait résine)

Nous remarquons que le profil de la grille finale est très pentu ($CD_{\text{bias}} = 30.5\text{nm}$). Avec ce type de chimie de gravure fluorée, il est difficile d'obtenir un profil de grille droit à partir d'un masque en résine. En effet, l'action spontanée et isotrope du fluor érode latéralement le motif de résine lors de la gravure, ce qui génère de la pente dans le profil de la grille en poly silicium. Une solution pour obtenir un profil de gravure droit serait de baisser la concentration de fluor introduit dans le réacteur. Or, dans notre cas, le débitmètre de SF₆ ne permet pas l'introduction de débit inférieure à 10sccm. L'optimisation de ce procédé de gravure n'a pu donc être réalisée. Malgré la pente du profil de la grille, cette expérience nous permet néanmoins d'observer l'influence de la nature chimique des couches de passivation sur la rugosité de bord de la grille finale.

✓ Evolution de LWR

La figure 4-21 présente l'évolution de LWR après chaque étape technologique d'une ligne de 160nm, pour les deux chimies de gravure de la grille utilisées.

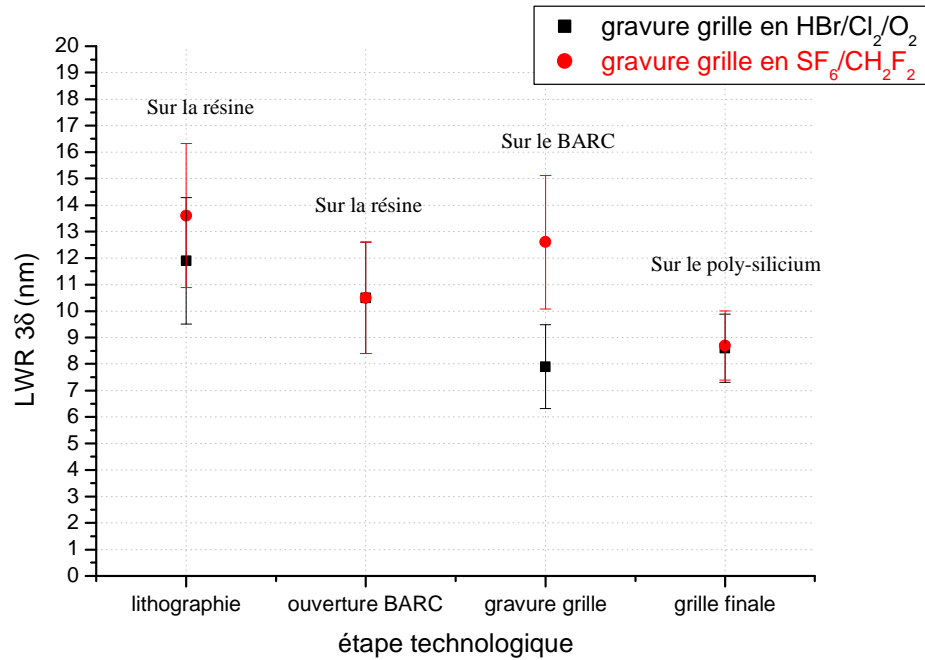


Figure 4-21 : Evolution de LWR à 3σ après chaque étape technologique de fabrication

Aucune différence de LWR sur la grille finale n'est observée suivant la chimie de gravure de la grille utilisée. Ce paramètre ne semble donc pas avoir d'impact sur le transfert de la rugosité de bord de ligne, au moins pour les deux chimies de gravure expérimentées. En revanche, nous notons une différence de LWR sur le BARC après gravure de la grille. Contrairement au procédé en HBr/Cl₂/O₂, le procédé de gravure en SF₆/CH₂F₂ détériore le profil de résine, comme le montre la figure 4-22. Cet effet peut être attribué à l'action combinée du Fluor, et du bombardement ionique énergétique sur la résine [Kim 03]. Malgré la détérioration du masque en résine pendant la gravure de la grille en SF₆/CH₂F₂, nous obtenons une rugosité de bord sur le poly silicium de grille quasi identique à celle après ouverture du BARC, comme dans le cas de la chimie de gravure en HBr/Cl₂/O₂. La rugosité de bord dans le poly silicium de grille semble donc étroitement liée au LWR après ouverture du BARC, qui correspond au masque au commencement de la gravure de la grille.

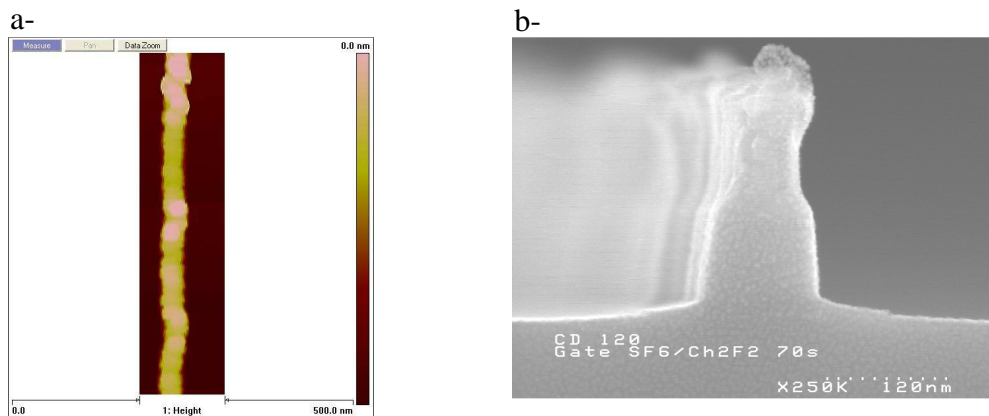


Figure 4-22 : Détérioration du profil de résine après gravure de la grille en SF₆/CH₂F₂ :
a) Image AFM, en vue de dessus, d'une ligne de 120nm après gravure de la grille
b) Image MEB, en vue de coupe, du profil d'une ligne de 120nm après gravure de la grille

Chapitre 4 : Transfert de la rugosité de bord de ligne

4.2.2.3. Influence de l'ajout d'une étape d'atterrissage sur l'oxyde et de sur gravure

Un procédé standard de gravure de grille se déroule généralement en trois étapes :

- ✓ Une étape de gravure principale qui consiste à graver les trois-quarts de la grille
- ✓ Une étape d'atterrissage sur l'oxyde, moins énergétique que la gravure principale afin d'arriver doucement sur l'oxyde de grille pour éviter de le percer.
- ✓ Une étape de sur gravure qui consiste à éliminer les résidus de silicium encore présents sur l'oxyde de grille.

Dans cette partie, nous avons ajouté une étape d'atterrissage sur l'oxyde et de sur gravure à l'étape de gravure principale de la grille en HBr/Cl₂/O₂, étudiée dans la section 4.2.2.1. Pour cette expérience, le poly silicium de grille utilisé est de type DEPAMOX. Le procédé de gravure de la grille appliqué est le suivant :

- ✓ **Perçage de l'oxyde natif** : 70sccm CF₄/ Puissance Source de 1000 W / Puissance d'autopolarisation de 150W / Pression de 4mT / Temps de gravure de 5s
- ✓ **Gravure principale** : 120sccm HBr / 40sccm Cl₂ / 5sccm HeO₂ / Puissance Source de 250W / Puissance d'autopolarisation de 120W / Pression de 4mT / Temps de gravure de 43s
- ✓ **Atterrissage sur l'oxyde** : 180sccm HBr / 30sccm Cl₂ / 5sccm O₂ / Puissance Source de 640W / Puissance d'autopolarisation de 100Wb/ Pression de 30mT / Temps de gravure de 13s
- ✓ **Surgravure** : 180sccm HBr / 7sccm HeO₂ / Puissance Source de 400W / Puissance d'autopolarisation de 70W / Pression de 65mT / Temps de gravure de 15s

✓ Contrôle dimensionnel

A l'aide du protocole expérimental décrit précédemment (section 4.1.2), nous mesurons, pour la ligne de 160nm, une épaisseur de la couche de passivation de 11nm de chaque côté. Après gravure principale de la grille, nous mesurons une épaisseur de 7nm de chaque côté (section 4.2.2.1). Cette augmentation de l'épaisseur de la couche de passivation peut être attribué à l'action de l'oxygène présent dans les deux étapes supplémentaires, qui favorise l'oxydation de la couche de passivation. Dans le cas du procédé de gravure de la grille complet, une mesure juste du CD_{bias} par CD-AFM ne peut être obtenue. En effet, l'élimination du pied de gravure, lors des étapes d'atterrissage sur l'oxyde et de sur gravure, crée une rupture de la pente du profil au niveau du bas de la grille, figure 4-23. Nous ne pouvons pas alors appliquer notre méthode d'extrapolation, à partir de la pente principale du profil, pour déterminer la dimension du pied de la grille finale et donc le CD_{bias}.

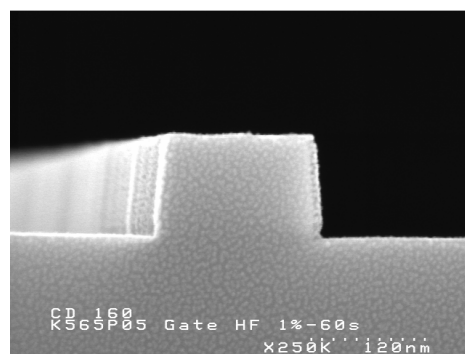


Figure 4-23 : Image MEB du profil d'une grille après un procédé de gravure grille complet

Chapitre 4 : Transfert de la rugosité de bord de ligne

✓ Evolution de LWR

La figure 4-24 présente l'évolution de LWR, d'une ligne de 160nm, après gravure principale de la grille et après un procédé complet de gravure de la grille.

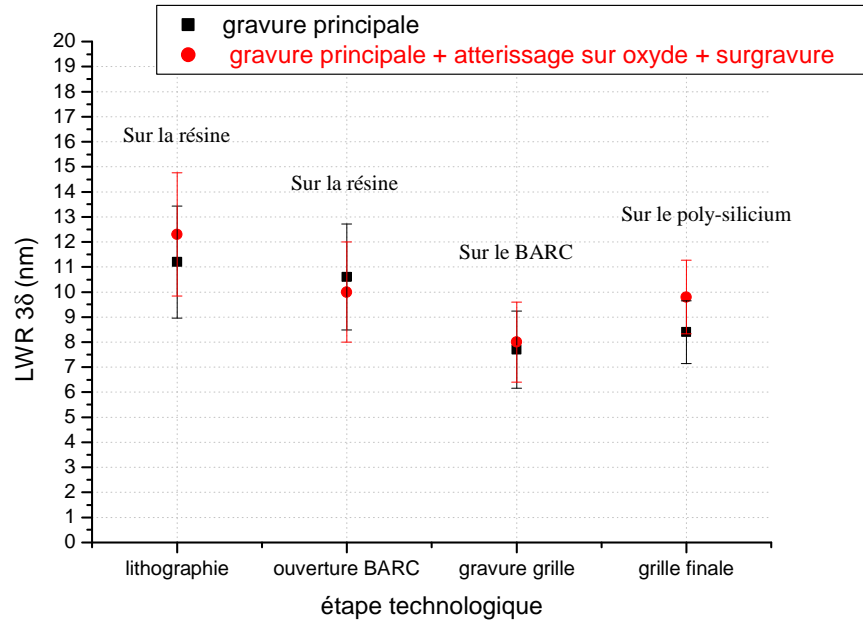


Figure 4-24 : Evolution de LWR à 3σ après chaque étape technologique de fabrication

Les étapes d'atterrissage sur l'oxyde et de sur gravure ne semblent pas influencer le LWR de la grille finale. En effet, nous n'observons pas d'évolution flagrante de LWR par l'ajout de ces deux étapes supplémentaires à la gravure principale de la grille. Les images MEB du flanc de la grille finale avec et sans étape d'atterrissage sur l'oxyde et de sur gravure, figure 4-25, n'indiquent pas non plus de différence notable de la rugosité de bord de la grille finale. Nous pouvons donc en conclure que l'ajout de ces deux étapes dans le procédé de gravure de la grille ne semble pas influencer la rugosité de bord de la grille finale.

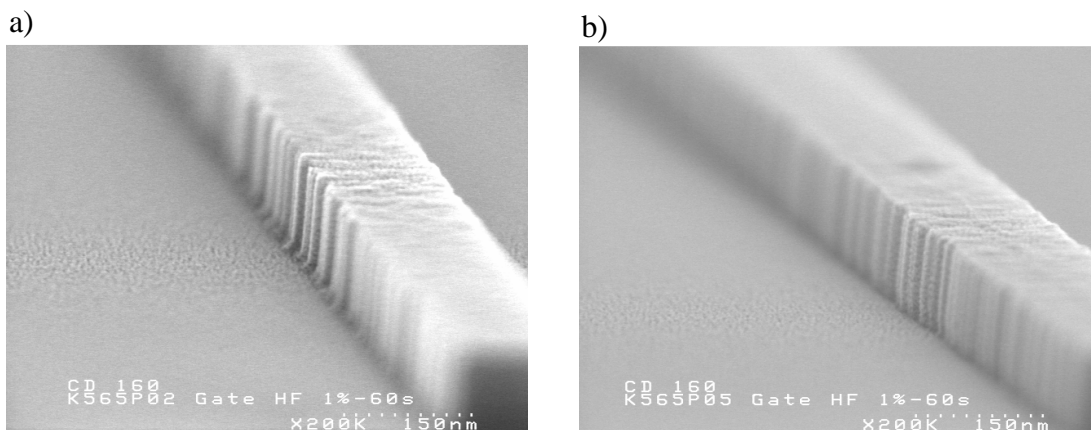


Figure 4-25 : Images MEB du flanc de la grille finale : a) après gravure principale b) après gravure principale, atterrissage sur l'oxyde et sur gravure.

4.2.2.4. Conclusion.

D'après toutes ces expériences, les paramètres du procédé de gravure grille et la nature du poly silicium gravé, ne semblent pas avoir d'impact sur la rugosité de bord de la grille finale. En effet, quelque soient les modifications apportées au procédé de gravure grille (débit d'oxygène, chimie de gravure, ajout étape d'atterrissage et de sur gravure) nous ne notons pas de différence flagrante de LWR sur la grille finale. Dans tous les cas, nous remarquons également que le LWR de la résine après ouverture du BARC (masque avant gravure) semble se transféré fidèlement dans la grille finale. Le paramètre important pour contrôler la rugosité de bord finale de la grille semble donc être la rugosité de bord du masque au moment de commencer la gravure de la grille, soit le LWR après ouverture du BARC. Les questions qui se posent maintenant sont :

Lors d'une stratégie masque résine, transfère-t-on toujours la rugosité du masque avant gravure dans la grille finale quelque soit la valeur de sa rugosité de bord initiale ? Peut-on améliorer la rugosité de bord de la grille finale en employant d'autres stratégies de gravure ?

4.3. Etude du transfert complet de la rugosité de bord avec différents masques de gravure.

4.3.1. Influence du procédé d'ouverture du BARC sur la rugosité de bord de la grille finale, gravée avec un masque résine.

Dans la partie précédente, nous avons remarqué que le LWR sur la résine après ouverture du BARC semblait se transférer fidèlement dans la grille finale. Dans cette partie, nous avons voulu confirmer cette hypothèse en partant de valeurs de LWR différentes avant gravure de la grille. D'après les résultats de la partie sur l'ouverture du BARC, nous avons remarqué que le LWR sur la résine après ouverture du BARC en Cl_2/O_2 était plus faible que celui gravé en CF_4 (section 4.2.1.2). Nous avons donc voulu vérifier si l'on retrouvait cette tendance dans la grille finale. Pour cette étude, nous avons donc gravé le poly silicium de grille, à partir des deux ouvertures BARC étudiées dans la partie précédente (section 4.2.1), avec le même procédé de gravure, décrit ci-dessous.

Procédé de gravure du poly-silicium :

BT : 70 sccm CF_4 / Puissance source de 1000W / Puissance d'auto polarisation de 150W / Pression totale de 4mT / Temps de gravure de 5s

ME : 120sccm HBr / 40sccm Cl_2 / 5sccm He- O_2 / Puissance source de 250W / Puissance d'auto polarisation de 120W / Pression totale de 4mT

Pour pouvoir comparer un procédé à un autre, le procédé de gravure de la grille a été arrêté grâce au système de détection de fin d'attaque et plus particulièrement au suivi au cours du temps de gravure, de la raie d'émission du silicium à 288nm. Dans les deux cas, la gravure principale a été arrêtée lorsqu'une diminution importante de l'intensité de la raie d'émission du Silicium à 288nm est observée, ce qui indique qu'il n'y a plus de silicium à graver dans les zones ouvertes, figure 4-26.

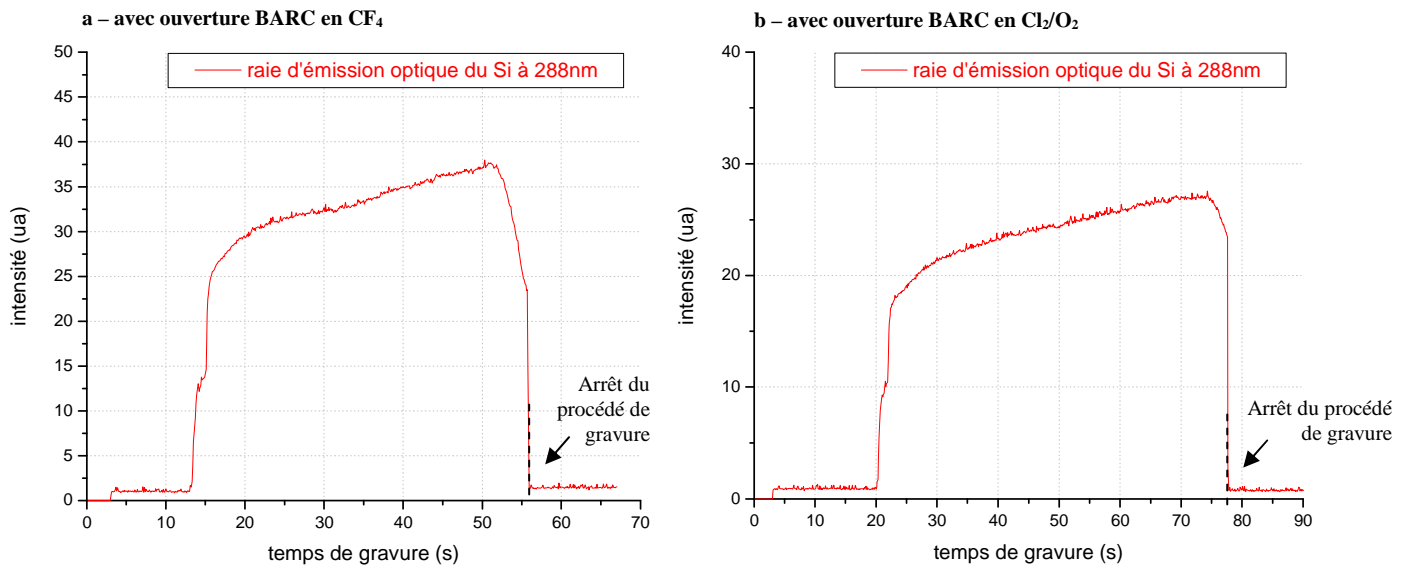


Figure 4-26 : Evolution de l'intensité d'émission optique du Si à 288nm lors de la gravure de grille a) avec le procédé de gravure du BARC en CF₄, b) avec le procédé d'ouverture du BARC en Cl₂/O₂

Dans le cas de la gravure de la grille avec une ouverture du BARC en CF₄, le procédé de gravure du poly-silicium a duré 43s. Dans le cas de la gravure de la grille avec une ouverture du BARC en Cl₂/O₂, le procédé de gravure du poly-silicium a duré 58s. Cette différence de temps de gravure s'explique par le fait que dans le cas de l'ouverture du BARC en CF₄, nous avons commencé à graver le poly silicium de grille sur une épaisseur de 20nm, alors que pour l'expérience avec l'ouverture du BARC en Cl₂/O₂, nous avons gravé seulement 53nm de BARC sur les 75nm initialement présent. Lors de la gravure principale de la grille, les traces du système de détection de fin d'attaque permettent de nous renseigner sur le moment à partir duquel nous avons commencé à graver le poly-Silicium, en l'occurrence après 5s du procédé de gravure principale. Cette information sur le temps de gravure du poly silicium, après une ouverture BARC en Cl₂/O₂, nous permet ainsi de calculer la vitesse de gravure verticale du poly-silicium.

4.3.1.1. Contrôle dimensionnel

A l'aide du protocole expérimental décrit précédemment (section 4.2.1), nous avons reconstitué, pour les deux ouvertures BARC étudiées, l'évolution du profil de la grille après chaque étape technologique de fabrication. Ces évolutions de profil sont présentées sur les figures 4-27 et 4-28.

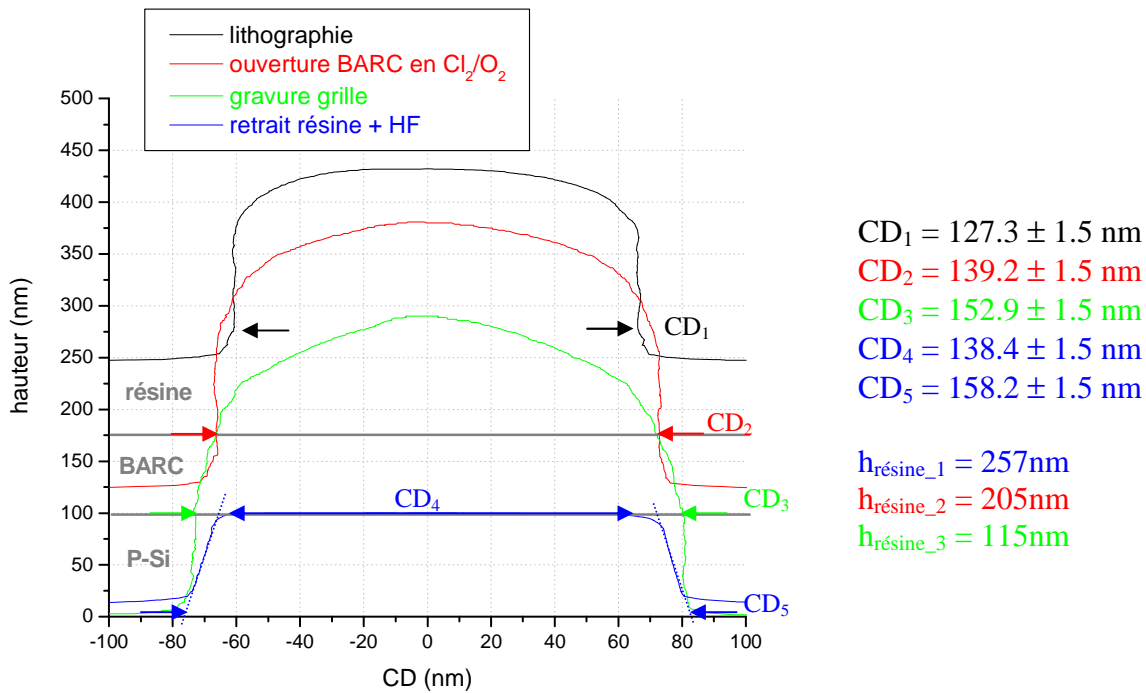


Figure 4-27 : Mesure par CD-AFM de l'évolution du profil d'une ligne isolée de 120nm après chaque étape technologique de fabrication (lithographie, ouverture BARC en Cl_2/O_2 , gravure grille, retrait résine et bain HF).

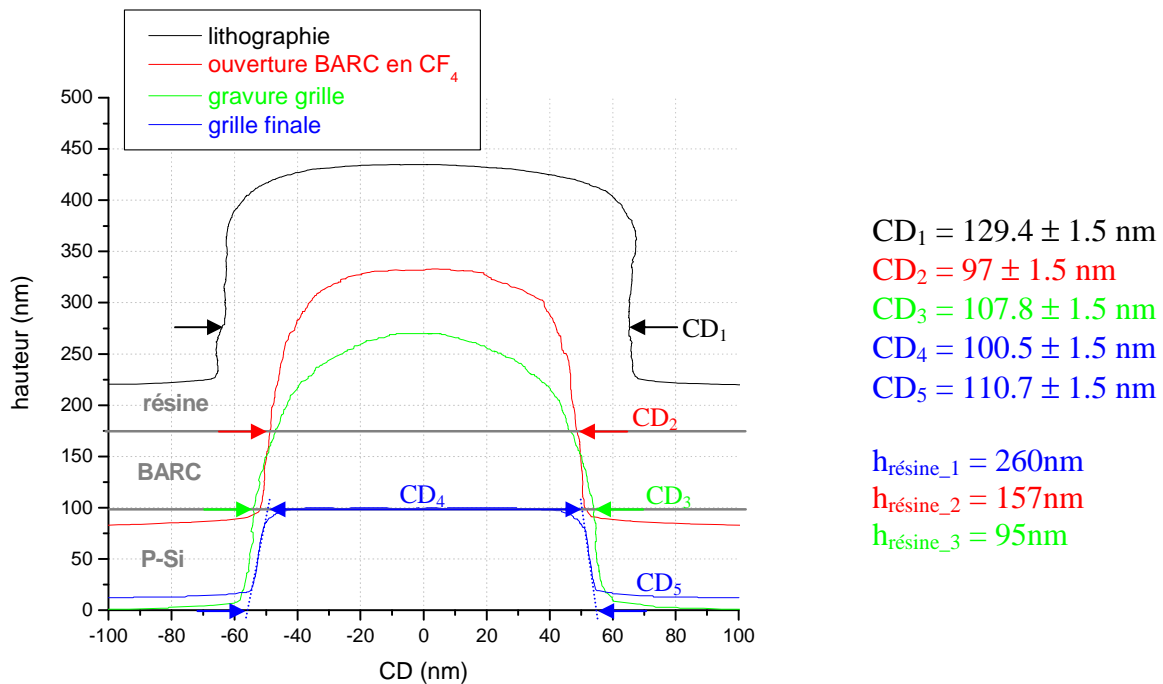


Figure 4-28 : Mesure par CD-AFM de l'évolution du profil d'une ligne isolée de 120nm après chaque étape technologique de fabrication (lithographie, ouverture BARC en CF_4 , gravure grille, retrait résine et bain HF).

Chapitre 4 : Transfert de la rugosité de bord de ligne

Ces mesures après chaque étape, nous permettent de calculer les paramètres dimensionnels importants du procédé de gravure de la grille. Le tableau 4-4 donne les résultats en terme de vitesses de gravure et de contrôle dimensionnel pour les deux procédés d'ouverture BARC utilisés.

	Ouverture BARC en CF ₄	Ouverture BARC en Cl ₂ /O ₂
Vitesse de gravure verticale de la résine lors de la gravure grille (nm/s)	1.4	1.5
Vitesse de gravure verticale du silicium (nm/s)	1.9	1.9
Sélectivité silicium / résine	1.3	1.2
CD _{bias_grille} (nm) = CD ₅ - CD ₄	10.2	19.8
e _{passivation} (nm) = CD ₃ - CD ₄	7.3	14.5
CD _{bias_total} (nm) = CD ₅ - CD ₁	+ 18.7	- 30.9

Tableau 4-4: Résultats sur le contrôle dimensionnel de gravure de la grille suivant le procédé d'ouverture BARC utilisé (CF₄ ou Cl₂/O₂).

Tout d'abord, nous remarquons que la sélectivité silicium / résine lors de la gravure de la grille est quasi identique quelque soit la chimie d'ouverture du BARC. Nous constatons également que le CD_{bias} de la grille et l'épaisseur des couches de passivation, sont deux fois plus importants avec une ouverture BARC en Cl₂/O₂ plutôt qu'en CF₄. Cette remarque confirme le fait que la pente du profil de la grille finale lors de ce procédé de gravure grille est fortement contrôlée par l'épaisseur des couches de passivation. En revanche, des analyses par spectroscopie de photo-électrons X (XPS), qui permettent de déterminer la nature chimique des couches de passivation présentes sur les flancs du poly silicium, seraient nécessaires pour déterminer la cause de l'épaisseur des couches de passivation plus importantes avec une ouverture du BARC en Cl₂/O₂.

4.3.1.2. Transfert de LWR

La figure 4-29 présente l'évolution de LWR d'une ligne de 120nm, après chaque étape technologique, pour les deux procédés de gravure étudiés.

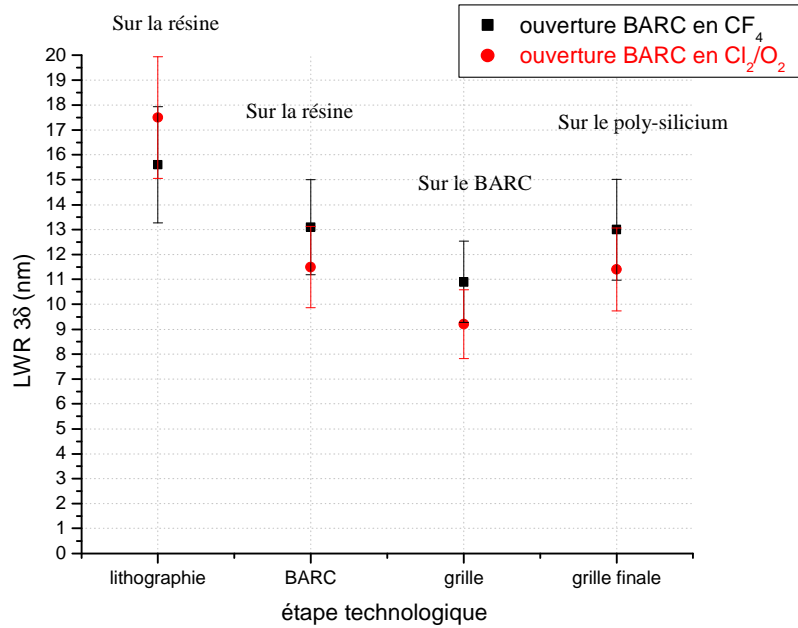
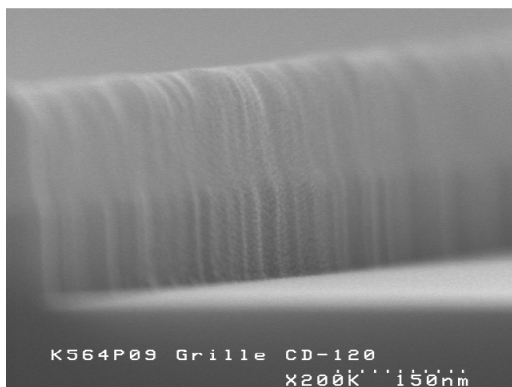


Figure 4-29 : Evolution de LWR après chaque étape technologique, d'une ligne de 120nm

Nous remarquons dans les deux cas que le LWR de la grille finale correspond au LWR sur la résine après ouverture du BARC. La différence de LWR avant gravure de la grille se retrouve également sur la grille finale. Par conséquent, le procédé de gravure grille en $HBr/Cl_2/O_2$ transfère fidèlement la rugosité de bord de ligne du masque de gravure (LWR après ouverture du BARC) dans le poly silicium de grille. Le paramètre important pour contrôler la rugosité de bord de la grille finale semble donc être la rugosité de bord du masque au moment de commencer la gravure de la grille, soit le LWR après ouverture du BARC. Par ailleurs, nous notons une légère diminution de LWR sur le BARC après gravure de la grille. Cette tendance est également légèrement remarquée sur les photos MEB de la figure 4-30, où le flanc de la ligne semble plus lisse sur le BARC que sur le poly-silicium. Comme mentionné dans la section 4.2.2, cet effet peut être attribué à l'action du bombardement ionique sur la résine et le BARC, lors de l'étape de gravure de la grille.

a – avec ouverture BARC en CF_4



b – avec ouverture BARC en Cl_2/O_2

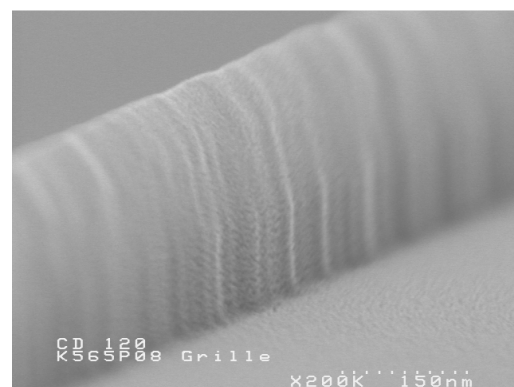


Figure 4-30 : Images MEB du flanc d'une ligne de 120nm après gravure de la grille, a) avec une ouverture BARC en CF_4 , b) avec une ouverture BARC en Cl_2/O_2 .

4.3.2. Transfert de la rugosité de bord avec un masque dur en SiO₂.

Dans cette partie, nous avons examiné le transfert de la rugosité de bord lors d'une stratégie de gravure avec un masque dur en SiO₂. La stratégie masque dur a été introduite dans l'industrie de la microélectronique pour plusieurs raisons. Tout d'abord, elle permet de diminuer le facteur d'aspect du masque en résine afin de mieux contrôler le procédé de gravure de grille. En outre, elle présente l'avantage d'être plus sélective sur l'oxyde de grille du fait qu'il n'y a pas de composé carboné (résine, BARC), lors de l'étape de surgravure de la grille. En effet, avec une stratégie de gravure avec un masque en résine, le carbone présent lors de l'étape de surgravure de la grille peut commencer à graver l'oxyde de grille, ce qui n'est pas tolérable pour le bon fonctionnement du transistor.

Pour cette étude, nous avons rajouté à l'empilement utilisé pour la stratégie masque résine, une couche de SiO₂ entre le BARC et le poly-silicium, qui sera utilisée comme masque pour la gravure de la grille en poly silicium, figure 4-31.

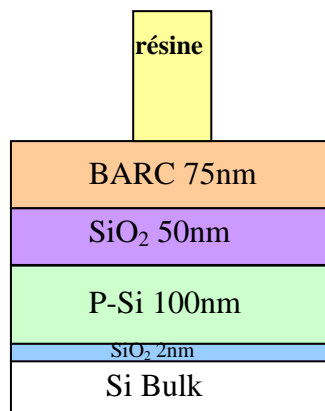


Figure 4-31 : Schéma de l'empilement de grille avec une stratégie masque dur en SiO₂

Les différentes étapes technologiques nécessaires à la réalisation d'une grille de transistor avec une stratégie masque dur en SiO₂, sont montrées sur la figure 4-32.

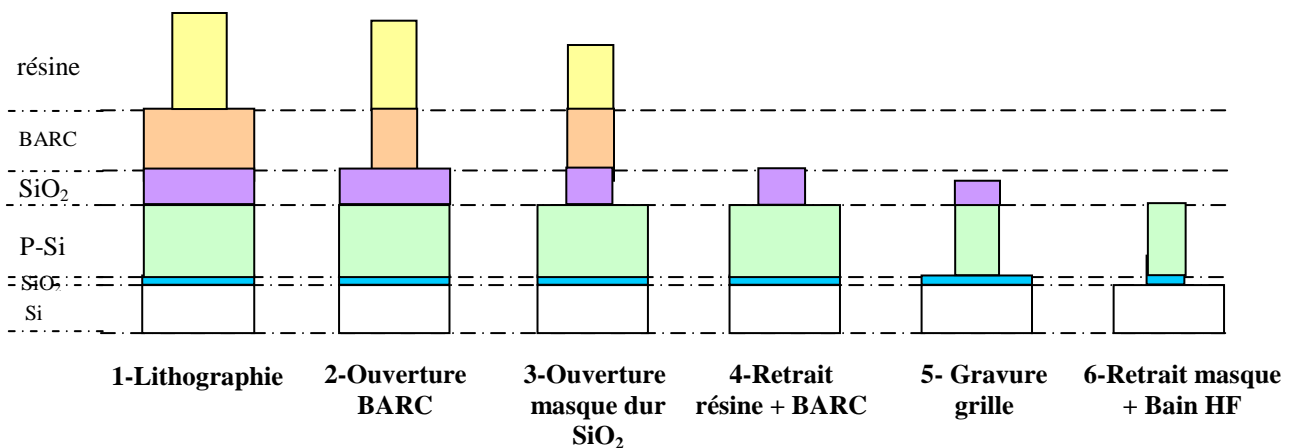


Figure 4-32 : Schéma de l'enchaînement des étapes de gravure nécessaires à la fabrication d'une grille de transistor avec un masque dur en SiO₂.

Cet empilement a été gravé dans la DPS. Les paramètres plasma utilisés pour chaque étape de gravure sont récapitulés dans le tableau 4-5.

Paramètres plasmas		Ouverture BARC	Ouverture masque dur SiO ₂	Retrait résine + BARC	Gravure grille	
					BT	ME
Pression (mT)		20	10	10	4	4
Puissance Source (W)		1000	500	1000	1000	250
Puissance d'autopolarisation (W)		50	50	40	150	120
Débit de gaz (sccm)	HBr	-	-	-	-	120
	Ar	-	130	-	-	-
	CH ₂ F ₂	-	4	-	-	-
	CF ₄	100	20	-	70	-
	Cl ₂	-	-	-	-	40
	HeO ₂	-	-	-	-	5
	O ₂	-	-	100	-	-
Temps de gravure (s)		34	35	60	5	40

Tableau 4-5 : Paramètres plasmas appliqués à chaque étape de fabrication de la grille en polysilicium avec une stratégie masque dur en SiO₂.

A l'aide du CD-AFM, nous avons mesuré le profil de la grille après plusieurs étapes technologiques. L'information de la rugosité de bord de ligne directement après ouverture du masque dur n'a pas pu être obtenue du fait de l'usure trop importante de la pointe de mesure (cf : chap 2). Néanmoins, nous avons mesuré le CD et le LWR de la grille après les autres étapes technologiques, à savoir, après lithographie, ouverture BARC, gravure grille et après bain HF afin de retirer le masque dur et les couches de passivations présentes sur le flanc des motifs.

Chapitre 4 : Transfert de la rugosité de bord de ligne

4.3.2.1. Contrôle dimensionnel

A l'aide du protocole expérimental décrit précédemment (section 4.1.2), l'évolution du profil d'une ligne isolée de 160nm, après chaque étape technologique de fabrication a été reconstitué, figure 4-33.

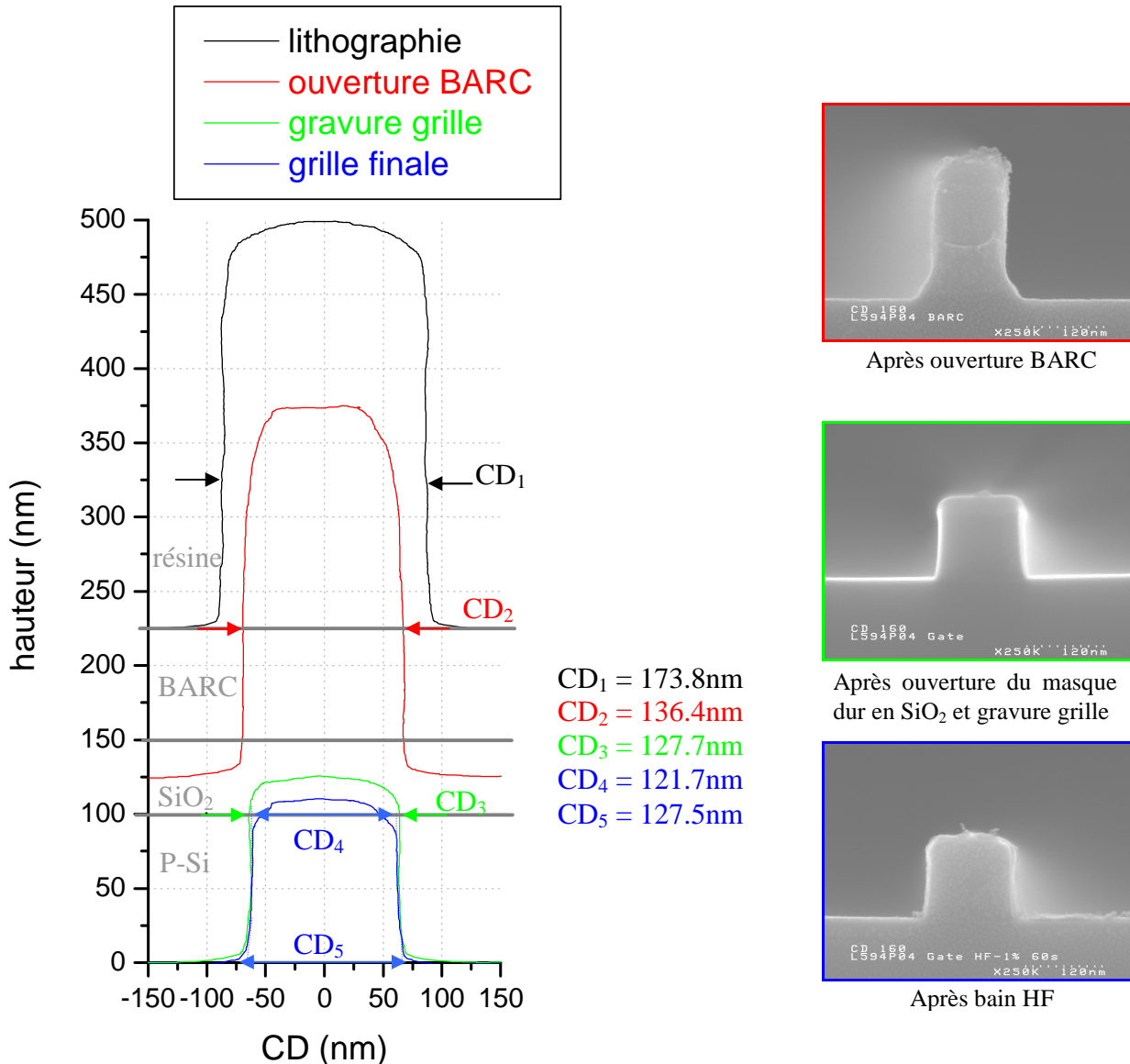


Figure 4-33 : Evolution du profil AFM, d'une ligne isolée de 160nm, gravée avec une stratégie masque dur et les photos MEB, en vue de coupe du profil, après chaque étape technologique.

Nous observons sur la photo MEB après ouverture BARC, figure 33, un pied de gravure important qui n'est pas remarqué sur le profil AFM. Ceci peut être expliqué par la forme de la pointe AFM qui ne peut mesurer le bas du motif (cf : chap 2). Par ailleurs, nous mesurons une épaisseur de la couche de passivation de 3nm de chaque côté et un CD_{bias} de 5.8nm. A partir du même procédé de gravure de la grille, nous remarquons que ces deux valeurs sont plus faibles qu'avec une stratégie masque résine ($e_{\text{passivation}} = 7.3\text{nm}$ et $CD_{\text{bias}} = 10.2\text{nm}$, section 4.3.3.1). La stratégie masque dur permet donc d'assurer un meilleur contrôle dimensionnel. Dans le but de réaliser des grilles de dimensions sub-50nm, il est donc préférable d'utiliser une stratégie de gravure avec un masque dur en SiO₂. Cette remarque confirme les résultats d'études antérieures [Pargon 04].

4.3.2.2. Transfert de LWR

La figure 4-34 présente l'évolution de LWR, de trois lignes de dimensions, 120, 140 et 160nm, après chaque étape technologique de fabrication, lors d'une stratégie de gravure avec un masque dur en SiO₂.

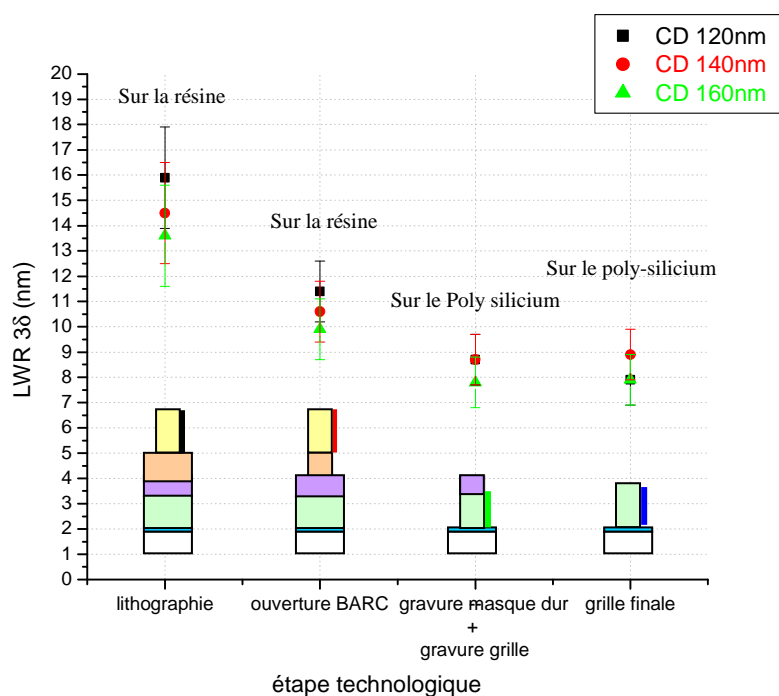


Figure 4-34 : Evolution de LWR après chaque étape de technologie de fabrication d'une grille de transistor réalisée avec une stratégie masque dur en SiO₂.

Comme dans le cas d'une stratégie masque résine, nous remarquons que le LWR de la grille finale est plus faible que celui après lithographie, et ce, pour les trois dimensions mesurées. Par ailleurs, à partir d'un LWR après lithographie quasi identique, nous constatons que le LWR de la grille finale avec une stratégie masque dur (LWR ≈ 8.5nm) est plus faible qu'avec une stratégie masque résine (LWR ≈ 13.3nm). L'introduction d'un masque dur permet donc d'améliorer la rugosité de bord de la grille finale.

4.3.3. Transfert de la rugosité de bord avec un masque en Carbone.

Cette nouvelle stratégie de gravure de la grille a été introduite récemment dans l'industrie de la microélectronique pour répondre aux besoins des nœuds technologiques de 45nm et au delà. Le masque en carbone amorphe présente un double avantage. Il peut être utilisé à la fois comme couche anti-réfléchissante pour l'étape de lithographie - propriétés anti-réfléchissantes équivalentes aux couches anti-réfléchissantes standard - et comme masque dur pour la gravure de la grille. En effet, avec les chimies de gravure à base de fluor couramment utilisées pour la gravure de la grille, le carbone amorphe présente une grande sélectivité vis-à-vis du poly-silicium, de l'oxyde de silicium ou du nitrure de silicium, comparé aux couches anti-réfléchissantes classiques. En outre, ce masque dur peut être facilement retiré par plasma d'oxygène. Ce double avantage permet d'envisager le développement de technologie de

Chapitre 4 : Transfert de la rugosité de bord de ligne

lithographie hybride sur une même puce ; la lithographie par faisceau d'électrons pour réaliser les motifs les plus fins et la lithographie optique à 193nm pour les motifs de taille supérieure.

Pour cette étude, nous avons à notre disposition des plaques de 300mm constituées de l'empilement de grille montré figure 4-35. Cet empilement est utilisé aujourd'hui dans l'industrie de la microélectronique pour le nœud technologique de 65nm.

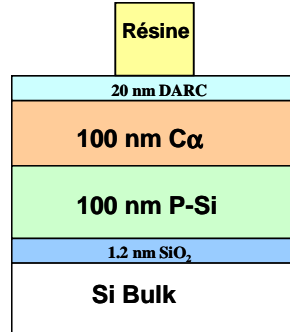


Figure 4-35 : Schéma de l'empilement de grille utilisé avec masque dur en Carbone

La gravure des différentes couches a été effectuée dans la DPS. La DPS ne pouvant accueillir des plaques de 300mm, un morceau de plaque de 300mm comportant 25 puces, a été clivé puis fixé sur une plaque de silicium de 200 mm à l'aide de capton, afin de pouvoir gravé l'empilement dans la DPS. Les différentes étapes technologiques nécessaires à la réalisation d'une grille en poly-silicium avec un masque en carbone sont décrites sur la figure 4-36.

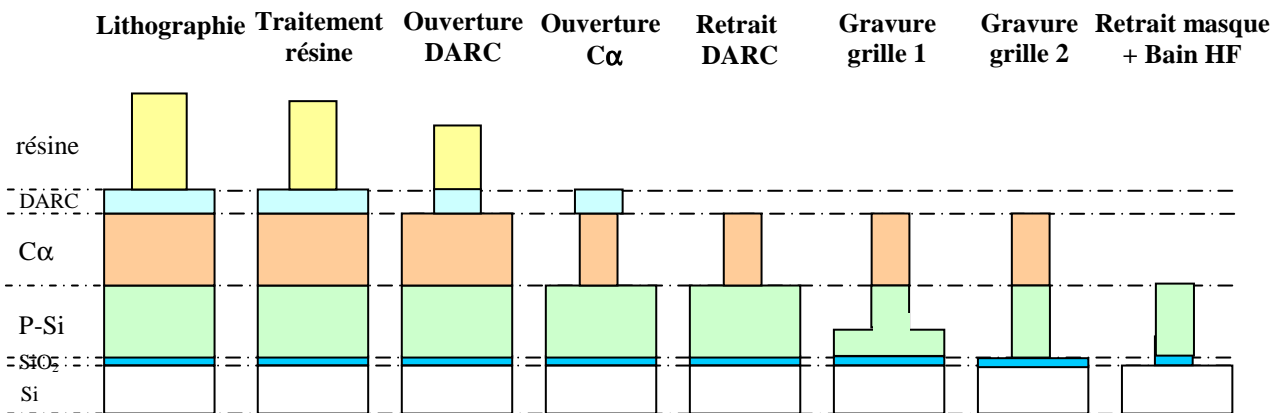


Figure 4-36 : Schéma de l'enchaînement des étapes de gravure nécessaires à la fabrication d'une grille de transistor avec un masque dur en carbone.

Les paramètres plasmas appliqués à chaque étape technologique de fabrication sont récapitulés dans le tableau 4-6.

Chapitre 4 : Transfert de la rugosité de bord de ligne

Paramètres plasmas		Traitement résine	DARC	C α	Retrait DARC	Gravure grille 1	Gravure grille 2	Retrait masque
Pression (mT)		5	7	4	10	10	10	10
Puissance Source (W)		1200	200	350	500	500	550	1200
Puissance d'autopolarisation (W)		-	250	120	95	95	74	-
Débit de gaz (sccm)	HBr	100	-	40	-	-	165	-
	Ar	-	100	40	-	-	-	-
	CH ₂ F ₂	-	20	-	-	-	-	-
	CF ₄	-	40	-	80	80	75	-
	Cl ₂	-	-	-	-	-	30	-
	HeO ₂	-	-	-	-	-	8	-
	O ₂	-	-	18	-	-	-	100
Temps de gravure (s)		30	19	40	5	30	15	40

Tableau 4-6 : Paramètres plasmas appliqués à chaque étape de fabrication de la grille en polysilicium avec une stratégie masque carbone.

A l'aide du CD-AFM, nous avons mesuré le profil de la grille après plusieurs étapes de fabrication :

- 1- lithographie
- 2- traitement résine
- 3- ouverture DARC et C α + retrait DARC
- 4- gravure grille + retrait masque
- 5- après bain HF

En complément, des photos MEB, en vue de coupe, ont été réalisées après chaque étape de gravure. Pour obtenir ces photos après chaque étape, une des puces de la plaque est à chaque fois protégée du plasma par un morceau de silicium fixé sur la puce par du capton.

Chapitre 4 : Transfert de la rugosité de bord de ligne

4.3.3.1. Contrôle dimensionnel

A l'aide du protocole expérimental décrit précédemment (section 5.1.2), le profil d'une ligne de 80nm, après chaque étape technologique de fabrication, a été reconstitué, figure 4-37.

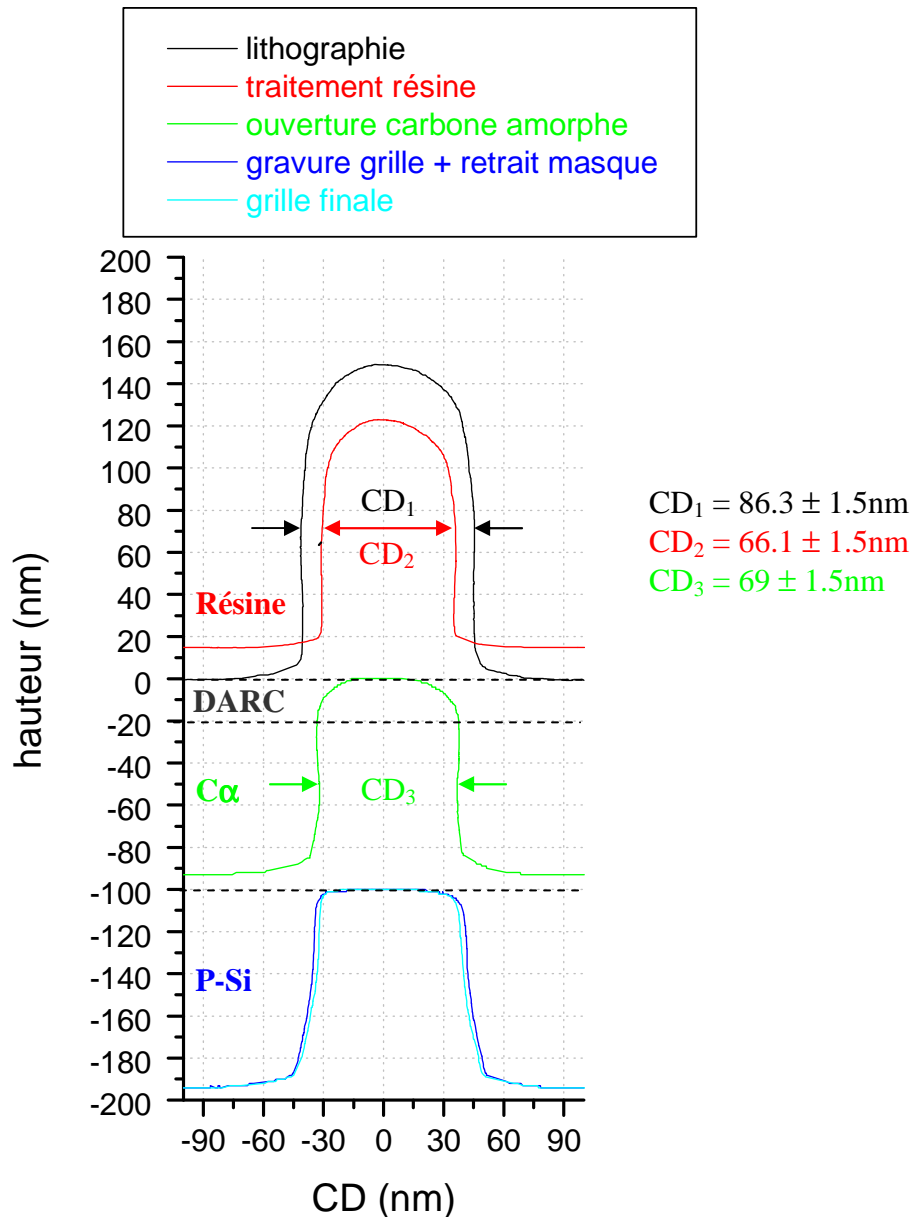


Figure 4-37 : Evolution du profil AFM, d'une ligne isolée de 80nm, lors d'une stratégie masque Carbone.

Nous remarquons tout d'abord, que l'étape de traitement de la résine entraîne une réduction de la cote de la résine de 20.2nm. Ce résultat est cohérent avec celui du chapitre 3. Ensuite, la dimension avant ouverture du masque en carbone (après traitement de la résine) est transférée fidèlement dans le carbone. A partir du principe d'extrapolation décrit précédemment (section 4.1.2), nous mesurons par CD-AFM et par l'image MEB en vue de coupe du profil de la grille, un CD_{bias} d'environ de 29nm, figure 4-38. Cette valeur n'est pas tolérable pour un procédé de gravure industriel. Cependant, l'ajout d'une étape d'atterrissage sur l'oxyde de grille et de sur gravure au procédé de gravure grille permettrait de « rattraper le pied de grille » et par conséquent d'obtenir un CD_{bias} acceptable.

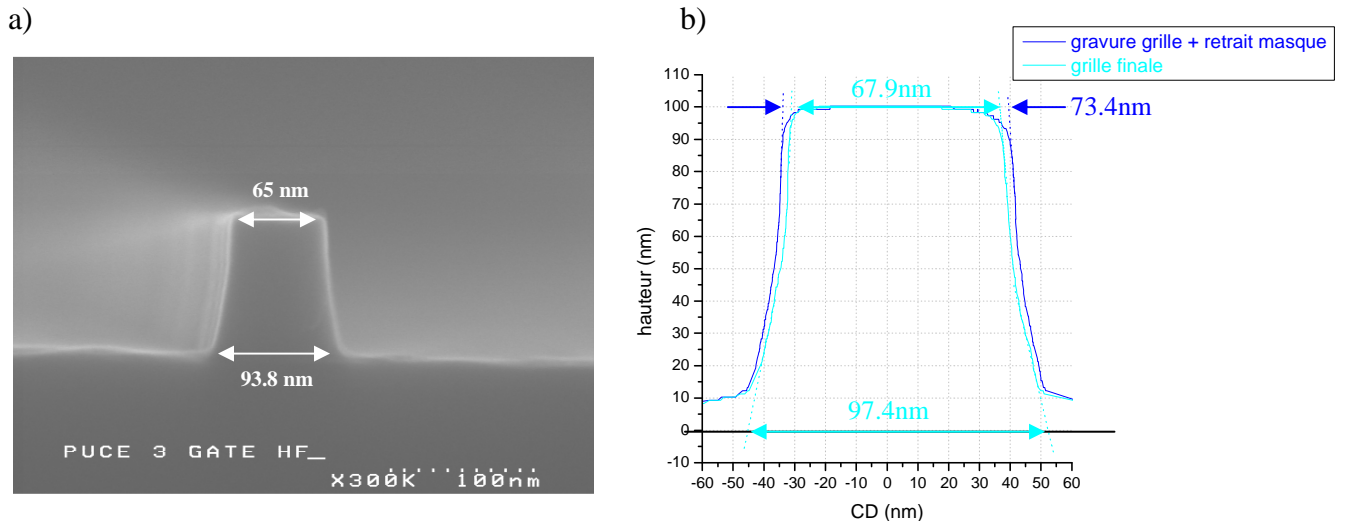


Figure 4-38 : a) Image MEB, en vue de coupe du profil, de la grille finale, b) Profil AFM de la grille, directement après gravure et après bain HF

4.3.3.2. Transfert de LWR

La figure 4-39 montre l'évolution de LWR, après chaque étape technologique de fabrication d'une grille en poly-Silicium, lors d'une stratégie avec un masque en carbone.

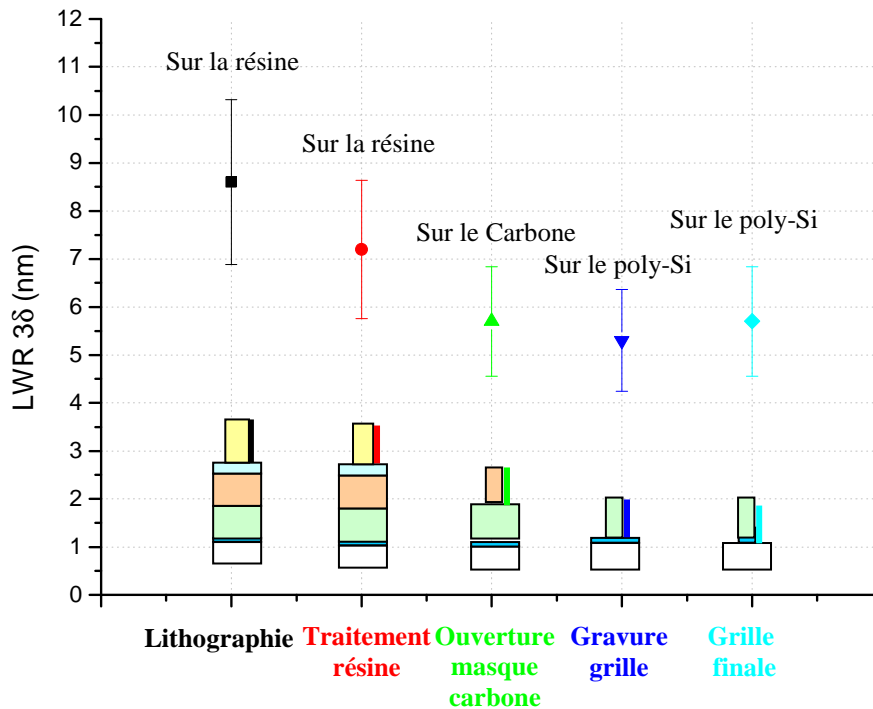


Figure 4-39 : Evolution de LWR, d'une ligne de 80nm, lors d'une stratégie de gravure avec un masque en carbone.

Une première diminution de LWR de la résine est notée après l'étape de traitement de la résine, ce qui est cohérent avec les résultats du chapitre 3. Par la suite, nous remarquons que le LWR est à nouveau diminué après ouverture du masque en carbone. Le procédé de gravure

Chapitre 4 : Transfert de la rugosité de bord de ligne

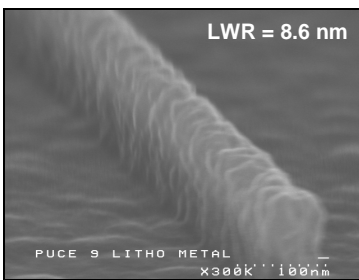
du masque en carbone est une gravure chimique assistée par les ions où le bombardement ionique énergétique joue un rôle important pour obtenir un profil de gravure anisotrope. Comme pour la résine, l'action des ions est probablement responsable de la réduction de LWR sur le carbone.

Nous remarquons également que le LWR du masque de gravure de la grille (LWR après ouverture du masque carbone) est transféré dans la grille finale, confirmant l'hypothèse que le paramètre important pour contrôler la rugosité de bord de la grille finale est le LWR du masque au commencement de la gravure de la grille.

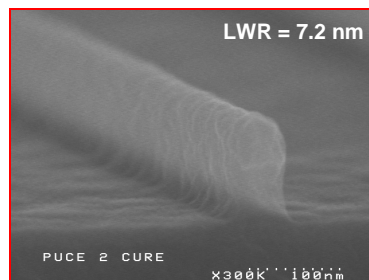
En comparaison avec les deux stratégies de gravure - masque résine et masque dur en SiO_2 - nous obtenons un LWR sur la grille finale plus faible (LWR=5.7nm). Ceci est probablement dû au fait que le LWR initial (après lithographie) est plus faible dans cette étude (LWR = 8.6nm) que pour l'étude des deux autres stratégies (LWR = 16nm). Par conséquent, la rugosité de bord de ligne après lithographie semble également être un élément clé pour l'obtention de grille en poly-silicium avec une faible rugosité de bord de ligne.

Toutes ces observations sur l'évolution de LWR au cours des différentes étapes de gravure sont confirmées par les photos MEB de la figure 4-40. En effet, nous observons un lissage de la rugosité de bord de ligne entre la lithographie et le traitement de la résine, puis à nouveau un lissage après ouverture du masque carbone. Par la suite, la rugosité du masque carbone apparaît semblable à celle de la grille en poly silicium.

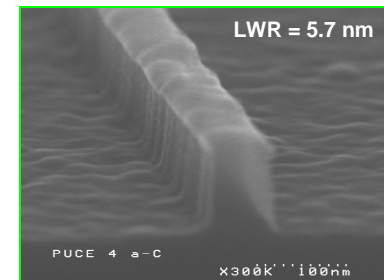
1- Lithographie



2 – Traitement résine



3 - Ouverture masque carbone



4 – Gravure grille



5 – Grille finale

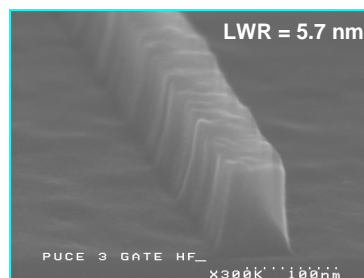


Figure 4-40 : Images MEB du flanc de la ligne après chaque étape technologique de fabrication d'une grille de transistor, réalisée à partir d'une stratégie de gravure avec un masque en Carbone

4.3.3.3. Conclusion

Finalement, à partir d'une lithographie présentant une rugosité de bord assez faible (LWR = 8.6nm), nous avons obtenu un LWR sur la grille finale de 5.7nm, soit une réduction totale de 34%. Cependant, ce résultat est encore loin des exigences de l'ITRS qui requiert un LWR en 2010 de 1.4nm. En revanche, cette étude montre que l'on transfère fidèlement dans le poly silicium de grille, la rugosité du masque avant le commencement de la gravure de la grille (LWR après ouverture du masque en carbone). Par ailleurs, nous montrons que les procédés plasmas intervenant avant la gravure de la grille (traitement résine, ouverture masque carbone) permettent de réduire la rugosité de bord de ligne de la résine et du masque en carbone du fait de l'action du bombardement ionique. A partir des résultats de cette étude, nous montrons également que la rugosité de bord après lithographie est un paramètre capital pour l'obtention de grille en poly-silicium avec une faible rugosité de bord de ligne.

4.4. Conclusion

D'après l'étude sur la rugosité de bord de la résine après ouverture du BARC, nous avons montré que ce procédé de gravure réduisait la rugosité de bord de la résine. Nous avons attribué cette réduction de LWR de la résine à l'action du bombardement ionique énergétique et directif, présent lors de la gravure du BARC.

Ensuite, à partir de l'étude sur la rugosité de bord de ligne de la grille finale après gravure de la grille, nous avons montré que les paramètres du procédé de gravure grille et la nature du poly silicium gravé, ne semblaient pas avoir d'impact sur la rugosité de bord de la grille finale. En effet, quelque soient les modifications apportées au procédé de gravure grille (débit d'oxygène, chimie de gravure, ajout des étapes d'atterrissage sur l'oxyde de grille et de surgravure), aucune différence de LWR n'est notée sur la grille finale.

D'après les résultats du transfert de la rugosité de bord de ligne lors d'une stratégie de gravure avec un masque en résine, nous montrons que la rugosité de bord du masque avant le commencement de la gravure de la grille (LWR après ouverture du BARC) se transfère fidèlement dans la grille en poly silicium. Nous pouvons alors en conclure que le paramètre important pour contrôler la rugosité de bord de ligne de la grille finale, semble être la rugosité du masque au début de la gravure de la grille.

L'étude du transfert de la rugosité de bord de ligne lors d'une stratégie de gravure avec un masque dur en SiO₂ montre que cette méthode permet d'assurer un meilleur contrôle dimensionnel et d'améliorer la rugosité de bord de la grille finale, comparée à la stratégie avec un masque résine. La stratégie masque dur apparaît donc comme une bonne méthode pour la réalisation de grille de transistors de dimensions inférieures à 50nm.

Les résultats de l'étude lors d'une stratégie de gravure avec un masque en carbone, confirme que l'un des éléments clés pour contrôler la rugosité de bord de ligne de la grille finale est le LWR du masque au commencement de la gravure de la grille. En effet, comme dans le cas de la stratégie masque résine et masque dur en SiO₂, le LWR du masque en carbone se transfère fidèlement dans la grille en poly-silicium. Par ailleurs, nous montrons également que la rugosité de bord de la résine après lithographie est un paramètre important pour l'obtention de grille de transistor avec une faible rugosité de bord.

Aux vues de ces résultats, il semble que pour minimiser la rugosité de bord de la grille de transistor, il soit nécessaire d'avoir un masque dur avec une très faible rugosité de bord de ligne. Pour cela, une faible rugosité de bord après lithographie et l'application de procédé plasma avec du bombardement ionique pour diminuer la rugosité de bord du masque avant la gravure même de la grille, semblent essentiels.

4.5. Bibliographie

- [Cunge 04] **G. Cunge et al,**
J. Vac. Sci. Techno. B20 (5), pp2137-2148, Sep/Oct 2002.
- [Cunge 04] **G. Cunge, M. Kogelschatz et N. Sadeghi,**
Plasma Sources Sci. Technol. 13, pp522-530, 2004
- [Cunge 06] **G. Cunge , M. Mori, M.Kogelschatz et N.Sadeghi,**
Appl. Phys. Lett, 88, 2006.
- [Goldfarb 04] **D.L.Goldfarb et al,**
J. Vac. Sci. Techno. B22 (2), pp. 647-653, Mar/Apr 2004
- [Kim 03] **J. Kim et al,**
J. Vac. Sci. Techno. B21 (2), pp790-794, Mar/Apr 2003
- [Leunissen 04] **L.H.A. Leunissen , R. Jonckheere, K. Ronse et G.B. Derksen,**
J. Vac. Sci. Techno. B 21(6), pp. 3140-3143, Nov/Dec 2003.
- [Pargon 04] **E. Pargon,**
Thèse de l'université Joseph Fourier de Grenoble, 2004.
- [Yahata 97] **A. Yahata, S. Urano et T. Inoue,**
Jpn. J. Appl. Phys. Vol 36, pp. 6722-6723, Nov 1997.

Conclusion générale

Ce travail de thèse s'inscrit dans le contexte de miniaturisation des transistors MOS afin de mener la technologie CMOS à ces dimensions ultimes. Avec les technologies actuelles de fabrication et pour des grilles de transistor inférieur à 30nm, la rugosité de bord des grilles de transistor devient critique. En effet, elle entraîne des fluctuations électriques dans les transistors qui ne sont pas acceptables pour le bon fonctionnement des futures générations de dispositifs. Il convient donc de contrôler ce paramètre afin de le réduire. En revanche, aucune méthode de mesure standard de la rugosité de bord n'est actuellement mise en place pour en déterminer une valeur. L'objectif de ce projet de recherche, a donc été, dans un premier temps, de trouver un protocole de caractérisation de la rugosité de bord afin, dans un second temps, de comprendre ses origines et d'étudier son évolution lors des différentes étapes technologiques de fabrication d'une grille de transistors MOS afin de la contrôler pour pouvoir la réduire.

Le chapitre 1 nous a permis de situer ce travail de thèse dans le contexte actuel de la microélectronique et d'identifier les défis technologiques liés à la miniaturisation. Un des problèmes critiques pour les futures générations de circuits intégrés est la rugosité de bord de la grille de transistor dont les effets deviennent de plus en plus apparents sur les performances des dispositifs.

Dans le chapitre 2, nous avons évalué les capacités des différents outils de métrologie capable de donner une mesure de la rugosité de bord. Les outils les plus largement utilisés actuellement dans l'industrie des semi-conducteurs, le CD-SEM et la scattérométrie, présentent certaines limitations pour une mesure précise de la rugosité de bord qui répond aux exigences requises pour les transistors de futures générations. En effet, ces deux équipements ne sont pas optimisés pour mesurer des structures complexes en trois dimensions avec des surfaces verticales, et leur résolution spatiale est proche des valeurs de rugosité de bord demandées. Pour ce projet de recherche, nous avons donc décidé d'étudier et d'utiliser une technique récente et très prometteuse : la microscopie à force atomique en trois dimensions. Cet outil permet de venir directement mesurer les flancs verticaux des structures afin d'obtenir une mesure tridimensionnelle précise du motif. Dans un premier temps, nous avons évalué les capacités de cet équipement et montré que la mesure de la rugosité de bord était possible. Après analyse, nous avons pu mettre au point un protocole de caractérisation de la rugosité de bord qui permet une mesure fiable de ce paramètre sur toute la hauteur de la structure. Cependant, ce protocole est spécifique au CD-AFM. La rugosité de bord étant un paramètre statistique, il est aujourd'hui indispensable que la communauté scientifique définisse un protocole de mesure de la rugosité de bord commun à tous. Par ailleurs, les tests de performance de ce nouvel équipement nous ont permis de mettre en évidence certaines limitations, tels que le manque de mesure dimensionnel au pied des structures qui est une dimension capitale à connaître pour le développement de procédé, ou des problèmes liés à l'interaction pointe-surface comme la prise de particule ou l'usure importante des pointes sur les matériaux durs qui sont particulièrement gênants pour une introduction du CD-AFM en production. Ces difficultés montre que des optimisations sont encore nécessaire afin d'améliorer la précision de mesure et d'éviter des problèmes liés à l'interaction pointe-surface.

Par la suite, et à l'aide du CD-AFM, nous avons effectué différentes études sur la rugosité de bord. Dans la première partie du chapitre 3, nous avons tenté de comprendre les origines de la rugosité de bord d'une ligne de résine réalisée par lithographie optique à une longueur d'onde de 193nm. D'après nos résultats et ceux de la littérature, nous avons remarqué que la formation de la rugosité de bord est un problème complexe qui fait intervenir de nombreux facteurs. Quelques paramètres ont montré leur effet sur la rugosité, et les plus influents semblent être : la taille de la zone de transition qui est définie par le contraste de l'image aérienne et la courbe de contraste de la résine, la taille des agrégats de polymères et le phénomène de diffusion de l'acide. En revanche, des études sur le sujet sont encore nécessaires pour clairement comprendre les origines du phénomène et obtenir des motifs de résine qui répondent aux exigences industrielles pour les futures générations de transistors. Pour atteindre cet objectif, l'utilisation du CD-AFM est aujourd'hui indispensable.

Dans la suite du procédé de fabrication d'une grille de transistor, la rugosité de bord du motif de résine sert principalement de guide pour le transfert dans les couches sous-jacentes. Ce transfert s'effectue principalement par des procédés de gravure par plasma. Dans la seconde partie du chapitre 3, nous avons donc examiné l'influence d'un procédé de gravure plasma sur la rugosité de bord de la résine. Cette étude nous a permis de mettre en évidence l'impact de l'aspect chimique et physique de la gravure par plasma. Tout d'abord, nous pouvons conclure que l'aspect chimique du plasma ne conduit pas à un lissage de la rugosité de bord de la résine. En effet, la rugosité de bord d'un motif de résine n'a pas évolué après exposition à des plasmas d'O₂ et de SF₆, connus pour leur action essentiellement chimique sur la résine. Dans le cas d'un dépôt principalement contrôlé par les neutres du plasma, nous avons même observé une augmentation de la rugosité de bord. Concernant l'aspect physique de la gravure par plasma, les différents résultats nous ont montré que l'ajout de bombardement ionique à un procédé plasma interagissant chimiquement avec la résine permettait de diminuer la rugosité de bord d'une ligne de résine. Ces résultats nous suggèrent donc que le bombardement ionique directif et énergétique est responsable de la diminution de la rugosité de bord de la résine en érodant les protubérances initialement présentes sur le flanc de la résine. Finalement, l'étude d'un procédé industriel de traitement de la résine nous a permis de montrer qu'un plasma d'HBr entraînait une modification en volume de la composition chimique de la résine, une densification du motif et une réduction de la rugosité de bord.

Dans le chapitre 4 nous nous sommes intéressés à l'évolution de la rugosité de bord de ligne après chaque étape technologique de fabrication d'une grille de transistor MOS afin de déterminer les paramètres importants qui contrôlent la rugosité de bord de la grille finale. Cette étude a été effectuée avec différents masques de gravure (masque résine, masque dur en SiO₂ et masque carbone). Pour chaque stratégie de gravure, les deux étapes technologiques présentes dans le procédé de gravure sont l'ouverture du BARC et la gravure de la grille. Dans un premier temps, nous avons donc examiné l'influence de ces deux étapes sur l'évolution de la rugosité de bord de la résine. L'étude du procédé d'ouverture du BARC nous a permis de montrer que cette étape réduisait la rugosité de bord de la résine. D'après les résultats du chapitre 3, nous avons attribué cette réduction à l'action du bombardement ionique énergétique et directif, présent lors de la gravure du BARC. Dans un second temps, nous avons examiné l'impact de certains paramètres de l'étape de gravure du poly silicium de grille sur la rugosité de bord de la grille finale. Parmi ceux-ci, nous avons étudié l'influence de l'épaisseur des couches de passivation, de la chimie de gravure, et des étapes d'atterrissage sur l'oxyde et de surgravure. Cette étude nous a permis de montrer que les paramètres du procédé de gravure grille et la nature du poly silicium gravé, ne semblaient pas avoir d'impact sur la rugosité de bord de la grille finale. En effet, quelque soient les modifications apportées

au procédé de gravure grille, aucune différence de rugosité de bord n'est notée sur la grille finale.

Dans la deuxième partie du chapitre 4, nous nous sommes intéressés au transfert complet de la rugosité de bord de ligne, selon la nature du masque de gravure utilisé (masque résine, masque dur en SiO_2 et masque carbone). A partir d'un masque en résine, nous avons montré que la rugosité de bord du masque avant le commencement de la gravure de la grille (après ouverture du BARC) se transfère fidèlement dans la grille en poly silicium. De ce résultat, nous pouvons alors en conclure que le paramètre important pour contrôler la rugosité de bord de ligne de la grille finale, est la rugosité du masque au début de la gravure de la grille. A partir d'un masque dur en SiO_2 , nous avons montré que cette méthode permettait d'assurer un meilleur contrôle dimensionnel et d'améliorer la rugosité de bord de la grille finale, comparée à la stratégie avec un masque résine. La stratégie masque dur apparaît donc comme une stratégie intéressante pour la réalisation de grille de transistors de dimensions inférieures à 50nm. Les résultats de l'étude lors d'une stratégie de gravure avec un masque en carbone, confirme que l'un des éléments clés pour contrôler la rugosité de bord de ligne de la grille finale est la rugosité de bord du masque au commencement de la gravure de la grille. En effet, comme dans le cas de la stratégie masque résine, la rugosité de bord du masque en carbone se transfère fidèlement dans la grille en poly-silicium. Par ailleurs, avec ces trois études, nous avons mis en évidence que la rugosité de bord de la résine après lithographie est un paramètre important pour l'obtention de grille de transistor avec une faible rugosité de bord.

Finalement, aux vues de ces résultats, il semble que pour réaliser une grille de transistor avec une faible rugosité de bord de ligne, il est nécessaire d'avoir un masque au début de la gravure de la grille en poly silicium, avec une très faible rugosité de bord de ligne. Pour cela, une faible rugosité de bord après lithographie et l'application de procédé plasma avec du bombardement ionique pour diminuer la rugosité de bord du masque avant la gravure même de la grille, sont essentielles.

Ce travail a permis de mieux appréhender le problème de la rugosité de bord qui devient critique pour le bon fonctionnement des futures générations de composants. Les valeurs de rugosité de bord des grilles de transistor actuellement obtenus ($\text{LWR}_{\text{minimum}} = 5.7\text{nm}$) sont encore nettement supérieures aux exigences industrielles pour 2007 ($\text{LWR} = 2\text{nm}$). Des études sur le sujet sont donc encore nécessaires pour réduire cette valeur. Pour réussir ce défi technologique, il est primordiale de comprendre clairement les origines de la rugosité de bord du motif de résine après lithographie, afin d'obtenir des motifs de résine présentant une très faible rugosité de bord. Dans un second temps, il est essentiel de développer des procédés de réduction de la rugosité de bord. Pour atteindre ces objectifs, il est actuellement indispensable d'utiliser le CD-AFM qui offre des informations complémentaire aux mesures par CD-SEM.

Cependant, la technique de la microscopie à force atomique en trois dimensions, a encore besoin d'être optimiser afin d'obtenir des mesures encore plus précise. Pour cela, le développement de pointe de mesure avec un plus faible diamètre, tel que des pointes avec un nanotube de carbone, est obligatoire. Par ailleurs, il est primordiale pour le développement de la technique d'améliorer le mode de mesure dans le but d'éviter les difficultés dues à l'interaction pointe- surface. Pour cela, il serait judicieux soit de modifier les algorithmes de retrait de la pointe, soit de faire osciller la pointe perpendiculairement aux surfaces verticales comme en mode contact intermittent et ainsi éviter le phénomène de collage de la pointe sur les surfaces verticales.

Finalement, le phénomène de rugosité de bord met en évidence les difficultés technologiques d'assurer aujourd'hui une simple réduction d'échelle pour continuer

l'évolution des performances des futures générations de composants. Dans le but de suivre l'évolution de l'industrie de la microélectronique, la technologie CMOS passera donc inévitablement par des ruptures technologiques. Dans un premier temps, ceci passera pour de nouveaux matériaux de grille et d'oxyde de grille et de nouvelles architectures (transistor sur SOI, sur SON, transistor à grille multiples). Mais après, la nanoélectronique avec les nanotubes de carbones, l'électronique moléculaire ou l'ordinateur quantique devrait rapidement remplacer la microélectronique.