



HAL
open science

Développement et optimisation d'un procédé de gravure grille polysilicium pour les noeuds technologiques 45 et 32 nm

Laurene Babaud

► To cite this version:

Laurene Babaud. Développement et optimisation d'un procédé de gravure grille polysilicium pour les noeuds technologiques 45 et 32 nm. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2010. Français. NNT: . tel-00668102

HAL Id: tel-00668102

<https://theses.hal.science/tel-00668102>

Submitted on 9 Feb 2012

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.

Remerciements

Index des abréviations et sigles utilisés

aC	amorphous Carbon
ANOVA	ANalysis Of VAriance
ARC	Anti-Reflective Coating
ARDE	Aspect Ratio Dependent Etching
BARC	Bottom Anti-Reflective Coating
BEOL	Back End Of Line
BT	Break Through
CCD	Charge-Coupled Device
CD	Critical Dimension
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
CMP	Chemical mechanical polishing
CVD	Chemical Vapor Deposition
Darc	Dielectric Anti-Reflective Coating
DOE	Design Of Experiment
DRAM	Dynamic Random Access Memory
EPD	End Point Detection
ESC	Electro-Static Chuck
FDC	Fault Detection and Classification
FEOL	Front End Of Line
GP	General Purpose
HM	Hard Mask
HP	High Performance
ICP	Inductively Coupled Plasma
ITRS	International Technology Roadmap for Semiconductor
LDD	Lightly Doped Drain
LER	Line Edge Roughness
LPCVD	Low Pressure CVD
LSR	Light Signal Reflectometry
LTM	Laboratoire des Technologies de la Microélectronique
LWR	Line Width Roughness
ME	Main Etch
MERIE	Magnetically Enhanced Reactive Ion Etching

MES	Manufacturing Execution System
MOS	Metal-Oxide-Semiconductor
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
MPU	MicroProcessor Unit
NA	Numerical Aperture
OCD	Optical CD
OE	Over Etch
OES	Optical Emission Spectroscopy
PD	Pull Down
PG	Pass Gate
PU	Pull Up
R&D	Recherche et Développement
RAM	Random Access Memory
RF	Radiofréquence
RIE	Reactive Ion Etching
RX	Rayon X
SD	Source Drain
SEM HR	SEM Haute résolution
SEM	Scanning Electron Microscopy
SH	Step Height
SPC	Statistical Process Control
SRAM	Static Random Access Memory
STI	Shallow Trench Isolation
TCP	Transformer Coupled Plasma
TEM	Transmitted Electron Microscopy
TEOS	Tetra-Ethyl-Ortho-Silicate
UV	Ultra Violet
XPS	X-ray Photoelectron Spectroscopy

Sommaire

Index des abréviations et sigles utilisés.....	3
Introduction	9
Chapitre I : Contexte général de l'étude.....	11
I.1 La microélectronique : complexité et hétérogénéité	11
I.1.1 Entre histoire et actualité	11
I.1.2 La technologie MOS	14
a) Structure et principe de fonctionnement d'un transistor MOS	15
b) Du MOS au circuit intégré	17
I.1.3 Les étapes de fabrication d'un circuit intégré	20
a) Le Front End of Line	21
b) Le Back End of Line	23
I.2 Les bases de la gravure en microélectronique	24
I.2.1 Les plasmas	24
I.2.2 La gravure par plasma.....	26
a) Les réacteurs de gravure.....	26
b) La gravure plasma entre gravure physique et chimique.....	28
c) Les paramètres clefs de la gravure par plasma.....	31
I.2.3 Elaboration d'une grille	32
a) La lithographie	32
b) La gravure des grilles et ses critères.....	34
I.3 Les challenges de la gravure grille pour le nœud technologique 45nm et au delà	37
I.3.1 Réduction en dimension "more Moore law"	37
I.3.2 Contrôle dimensionnel	40
I.3.3 Objectifs de la thèse	44
Chapitre II : Dispositifs expérimentaux	45
II.1 Les plateformes de gravure.....	45
II.1.1 La plateforme de gravure 300mm LAM Kiy45.....	45
II.1.2 La plateforme de gravure 300mm d'Applied Materials Centura 300.....	48
II.2 Techniques de caractérisation in situ	49
II.2.1 Détection de fin d'attaque ou EPD (End Point Detection).....	49
a) Détection par spectroscopie d'émission optique (OES « Optical Emission Spectroscopy)	49
b) Détection par réflectométrie (LSR « Light Signal Reflectometry »)	50
II.2.2 La spectroscopie de photoélectron X ou XPS	51
a) Principe.....	51
b) Analyse des spectres.....	52
c) Dispositif expérimental	54
d) Analyse topographique chimique.....	56
II.3 Techniques de caractérisation ex situ	57
II.3.1 Le microscope électronique à balayage.....	57
II.3.2 La scattérométrie	59
II.3.3 Les mesures électriques	61
II.4 Structure et méthode de caractérisation.....	61
II.4.1 Les masques lithographiques.....	61
II.4.2 Quelques outils statistiques en microélectronique :	63
a) Notion d'écart type et de variance.....	63
b) Les analyses de variance	64

c) Les plans d'expériences	64
II.5 Conclusion	70
Chapitre III : Caractérisation du procédé de gravure grille 45nm	71
III.1 Stratégie de STMicroelectronics pour le 45nm	71
III.1.1 L'empilement grille utilisé	71
III.1.2 Le procédé gravure grille	72
a) La gravure HM	72
b) La gravure polysilicium	74
c) La stratégie de conditionnement	75
III.1.3 Contrôle dimensionnel	76
III.2 Etude du procédé de gravure HM	78
III.2.1 Impact de la température lors de la gravure HM	79
III.2.2 Etude paramétrique de l'étape de traitement résine : « Cure »	80
a) Effet de l'ajout de l'étape de cure	81
b) Influence du temps de l'étape de cure	83
c) Influence de la température pendant l'étape de « cure »	84
d) Influence de la pression, puissance source et débit de gaz HBr	84
e) Résumé	86
III.2.3 Etude des étapes d'ouverture Darc, aC et TEOS	87
a) Rôle du CH ₂ F ₂ lors de l'étape d'ouverture du Darc et du TEOS	87
b) Influence des temps de gravure aC et TEOS	88
III.3 Etude du procédé de gravure polysilicium	91
III.3.1 Etude de l'étape de gravure principale du polysilicium (BT+ME1)	92
a) Etat de l'art de la gravure polysilicium	92
b) Caractérisation de la couche de passivation	93
<i>Composition chimique du fond des motifs : Analyse de la zone ouverte polysilicium du masque</i>	97
<i>Composition chimique des flancs des grilles : quantifications obtenues selon l'angle de collection 53.75° (+/- 3.75°) à partir des pics non décalés</i>	99
c) Vitesses de gravure verticale et sélectivité	102
d) Influence des paramètres du plasma	103
e) Influence de la température	109
III.3.2 Etude de l'étape d'atterrissage (ME2) et de surgravure (OE)	111
a) Vitesse de gravure verticale du ME2	111
b) Influence du temps de gravure ME2	111
c) Evolution de la couche de passivation	113
III.3.3 Influence de la nature du masque dur	114
III.4 Conclusion	115
Chapitre IV : Etude des interactions plasma/parois au sein d'un réacteur de gravure	117
IV.1 Formation de dépôt sur les parois des réacteurs	117
IV.2 Stratégies de conditionnement	118
IV.3 Impact du conditionnement des parois du réacteur kiy045 (LAM) sur le procédé de gravure	119
IV.3.1 Impact sur la gravure HM	119
IV.3.2 Impact sur la gravure du polysilicium	122
IV.4 Analyse des interactions plasma/parois dans le réacteur ICP du LTM : DPS300 (Appl.Mat.)	125
IV.4.1 Technique d'analyse des parois du réacteur	125
IV.4.2 Protocole expérimental	127
IV.4.3 Résultats	127

a) Echantillons simulant les parois du réacteur	127
b) Echantillons simulant les flancs des grilles de polysilicium	129
IV.5 Confrontation des résultats et conclusion	132
Chapitre V : Contrôle de variabilité des dimensions de la grille 45nm et développement de solutions en gravure.	137
V.1 Le contrôle des procédés	137
V.1.1 Notion de contrôle des équipements (FDC)	137
V.1.2 Notion de contrôle statistique des procédés (SPC)	138
V.2 Variabilité du procédé grille 45nm	139
V.3 La rugosité	141
V.4 La variabilité intraplaque	142
V.4.1 Injection des gaz centre/bord	143
V.4.2 Température centre/bord	144
V.4.3 Conditionnement de la chambre de gravure	146
V.5 La variabilité plaque à plaque et lot à lot	147
V.5.1 Conditionnement de la chambre	147
V.5.2 Les boucles de régulation	147
V.5.3 Les boucles de régulation dans le procédé du nœud technologique 45nm	148
V.5.4 Nouvelle boucle de régulation entre les gravures	150
a) Méthodologie d'évaluation de la réponse du profil	150
b) Analyse de la réponse profil de grille	151
c) Reconstruction des profils	152
d) Compensation de la variabilité du CD_{HM}	153
V.6 Evolution des contributeurs de variabilité durant cette étude	158
Conclusion générale	160
Références	163

Introduction

Véritable phénomène de société de ce début de siècle les puces microélectroniques ont envahi notre quotidien. Conçues à l'origine pour effectuer des opérations de calcul, on les trouve maintenant partout, dans nos maisons, nos voitures, nos loisirs.... Critiquées ou encensées, qu'importe, elles sont utilisées par tous, à tel point que Mme Pascal, âgée de 88 ans, disait qu'elle savait que l'on en trouvait dans la Wii, console de jeu que beaucoup de ses petits et arrière-petits enfants avaient chez eux. Etonnant non ?

La complexité et l'hétérogénéité de tous ces produits, devenus de grande consommation, sont en fait le fruit de longues années de recherche visant à miniaturiser l'élément de base des puces électroniques : le transistor et ainsi intégrer plus de fonctionnalités sur une même puce. Cette évolution, à l'œuvre depuis plus de quarante ans, est couramment décrite par la loi empirique énoncée pour la première fois par Gordon Moore en 1965. Elle prévoit une augmentation de la densité de circuits intégrés sur une puce d'un facteur deux tous les dix huit mois.

A la fin des années 90, l'entrée dans l'ère nanométrique a marqué une rupture dans le rythme des améliorations de performance à atteindre. En effet chaque année depuis 1999, un consortium d'industriels se réunit et publie une feuille de route internationale (International Technology Roadmap for Semiconductor) traduisant l'objectif global de performance et de coût des systèmes électroniques. L'un des paramètres les plus critiques dans la fabrication des dispositifs et leur performance est la définition des grilles des transistors et en particulier le contrôle en dimension de ces grilles de transistors. Pour le nœud technologique 45nm, l'ITRS prévoit d'avoir une variation dimensionnelle totale de moins de 2.8nm sur une tranche de silicium de 300 mm.

L'objet de ce travail de thèse est l'étude poussée d'un procédé de gravure par plasma fluorocarbonée d'une grille de silicium de 45nm. Ceci, en vue de le rendre le plus reproductible possible et ainsi « traquer » chaque nanomètre pour atteindre les objectifs dimensionnels fixés par l'ITRS.

Le premier chapitre décrit de manière plus détaillée le contexte dans lequel a été réalisée cette thèse. L'histoire et l'actualité de la microélectronique y sont présentées afin de comprendre les aspects importants à traiter lors de la conception de circuits intégrés. Elles vont également permettre de comprendre les objectifs de la présente thèse.

Le second chapitre traite des dispositifs expérimentaux utilisés. La description des réacteurs de gravure, des techniques de caractérisation ainsi que quelques notions statistiques s'y succèdent.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude des mécanismes ayant lieu lors du procédé de gravure pour le nœud technologique 45nm. Nous nous intéresserons aux interactions entre le plasma et la matière et, sur leur conséquence en termes de dimension, d'uniformité et de profils sur les grilles.

Le quatrième chapitre traite des interactions entre le plasma et les parois du réacteur. Nous verrons quelles sont les conséquences d'un changement de conditionnement de la chambre sur le procédé de gravure.

Le dernier chapitre décrit les solutions mises en place sur le procédé de gravure afin d'améliorer la dispersion de la dimension critique de la grille, d'un lot à un autre, d'une plaque à une autre et d'une puce à une autre. Ce chapitre concrétise ainsi les études décrites dans les chapitres III, IV.

Chapitre I : Contexte général de l'étude

I.1 La microélectronique : complexité et hétérogénéité

I.1.1 Entre histoire et actualité

A peine quarante ans de développement, c'est ce qu'il a fallu à la microélectronique pour s'imposer comme le premier secteur industriel mondial, du jamais vu dans l'histoire industrielle^{1,2}. Plusieurs dates sont à l'origine de cette ascension fulgurante (cf figure I-1): 1947, avec la conception du premier transistor bipolaire sur monocristal de germanium par J. Bardeen, W. Brattain et W.B. Shockley des Bell Laboratories, qui sera commercialisé cinq ans plus tard dans un sonotone. 1959, date du premier circuit intégré réalisé par J. Kilby et 1971, date à laquelle Intel commercialise le premier microprocesseur³ comportant 2300 transistors sur une puce de 6cm².

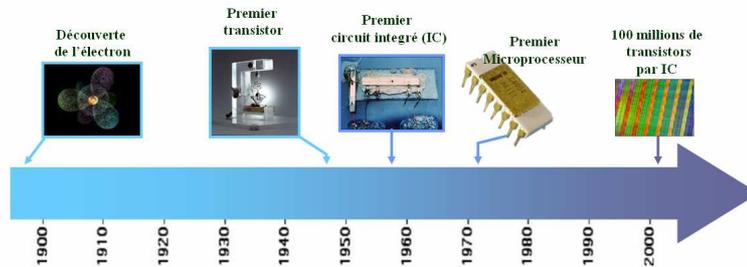


Figure I-1: Dates de références dans l'histoire de la microélectronique ;

Par la suite, l'histoire ne fera pas mentir la loi empirique de Gordon Moore, cofondateur d'Intel. Il avait remarqué que la complexité des circuits à coût unitaire minimal avait augmentée d'un facteur deux environ par an, entre 1959 et 1965, et prédisait qu'il n'y avait pas de raison de croire que ce facteur ne resterait pas approximativement le même pour au moins 10 ans. Il reformulera cette tendance en 1975, en proposant que le nombre de transistors sur un microprocesseur double tous les deux ans. Si on l'analyse entre 1971 et 2007 sur la figure I-2, le nombre de transistors a doublé toutes les 1.96 années.

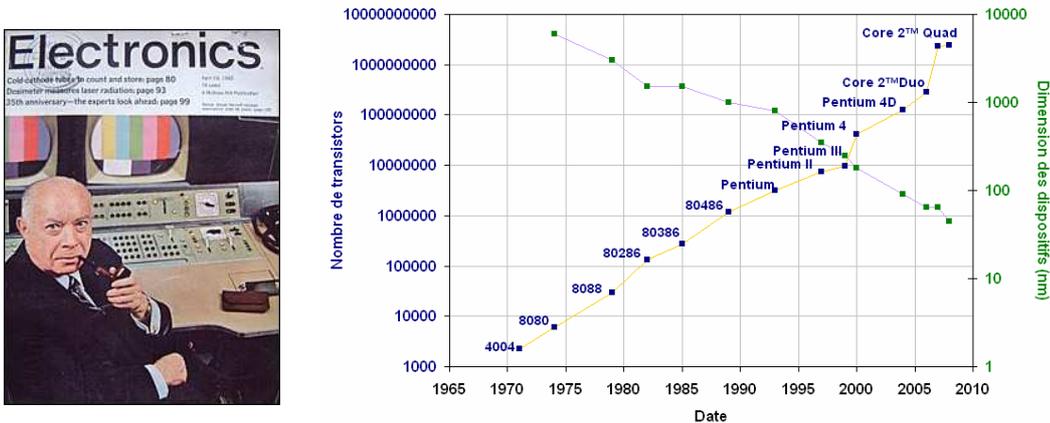


Figure I-2: Représentation de la loi de Moore avec l'exemple des microprocesseur d'Intel.

Cette évolution exponentielle du nombre de transistors sur un même circuit intégré, a été rendu possible grâce à la diminution de la taille des dispositifs microélectroniques. Depuis la fin des années 90, une feuille de route internationale, appelée ITRS⁴

(International Technology Roadmap for Semiconductor), est éditée par des experts afin de compléter la loi de Moore et donner un objectif global en termes de dimension, performance et coût des systèmes microélectroniques pour chaque nœud technologique. Le nœud technologique est défini comme la moitié du pas (ligne + espace pour les structures de type DRAM de la génération de composants concernée), ou pitch en anglais. Le tableau I-1 en est un extrait :

<i>Année de Production</i>	<i>2007</i>	<i>2008</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2011</i>	<i>2012</i>	<i>2013</i>
<i>DRAM ½ pas (nm)</i>	68	59	52	45	40	36	32
<i>Flash ½ pas (nm)</i>	54	45	40	36	32	28	25
<i>MPU longueur physique de la grille (nm)</i>	25	23	20	18	16	14	13

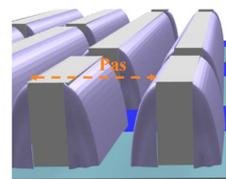


Tableau I-1: Extrait de l'ITRS 2008 présentant les objectifs dimensionnels de plusieurs architectures CMOS : mémoire DRAM (Dynamic Random Access Memory), MPU (Microprocessor Unit), Mémoire Flash. Schéma représentant le pas d'une structure type DRAM.

On atteindra ainsi en 2011 le nœud technologique 40nm pour lequel la longueur de grille des transistors composants les microprocesseurs (MPU), dispositif le plus agressif en terme de dimension pour des besoins de rapidité de fonctionnement, sera de 16nm.

Si l'industrie des semiconducteurs constitue un secteur clé de l'économie et contribue depuis plus de trois décennies à la croissance mondiale, elle est confrontée à un triple défi, à savoir l'explosion de ses coûts, le raccourcissement des cycles de vie des produits et enfin l'évolution de son marché vers la maturité.

Explosion des coûts

La multiplication des défis technologiques se traduit par une explosion des coûts de R&D, de conception, de logiciels et de production. Selon les informations recueillies dans un rapport sur « l'évolution du secteur de la micro/nanoélectronique », le développement de la technologie 90 nm a coûté 500 millions de \$. Aujourd'hui, le coût de la technologie 45 nm est évalué à 750 millions de \$ et celui de la technologie 32 nm à 1 milliard de \$. Concrètement, les coûts progressent de 30 % par saut technologique.

Raccourcissement des cycles de vie

Longtemps, le secteur de la microélectronique a été exclusivement tiré par la technologie : l'amélioration des performances des circuits intégrés combinée à la diminution de leur coût a ainsi permis de multiplier leurs applications dans les télécommunications, dans le secteur industriel et dans les produits grand public. Désormais, la technologie n'est plus le seul facteur de croissance. Dans certains domaines, le goût des consommateurs est devenu prépondérant pour des objets qui se distinguent moins par leurs technologies que par leur design ou les services qu'ils offrent. C'est le cas des ordinateurs et des téléphones portables, des baladeurs MP3, des appareils photos numériques ou encore des lecteurs de DVD. En conséquence, le cycle de vie des produits se raccourcit. Ainsi, les gammes de téléphones portables changent tous les six mois. Les fabricants de semiconducteurs sont donc soumis à des pressions très fortes en matière de délai. Pour un téléphone dont la vente est prévue en décembre, ils reçoivent le cahier des charges entre avril et mai et doivent livrer leurs produits dès septembre.

Marché arrivant à sa maturité

De nombreux spécialistes du secteur estiment que ce marché serait en train d'atteindre sa maturité, ce qui engendrerait des taux de croissance plus faibles (entre 6 et 8 % contre plus de 15 % entre les années 70 et 90), mais également une moindre cyclicité de cette activité. Deux raisons sont invoquées. Premièrement, il n'existerait pas actuellement de « killer application », à savoir un ou plusieurs produits phare à l'instar de l'ordinateur portable ou encore du téléphone mobile, qui relancerait durablement la consommation de semiconducteurs. En outre, même si les marchés émergents connaissent des potentiels de croissance énormes, ils ne compensent pas le ralentissement de la consommation dans les pays développés lié à la saturation des marchés.

La conséquence de ce triple défi est que le secteur de la microélectronique est en perpétuel mouvement, comme en témoigne les changements incessants dans le classement des principales entreprises de semiconducteurs.

Dans le passé, une société comme Motorola assurait en R&D la fabrication des équipements, la conception complète des architectures, les tests, la production et l'encapsulation. Depuis longtemps, pour répondre à la complexification du secteur, beaucoup de ces fonctions ont été externalisées : la conception et la fabrication des équipements, les logiciels de conception assistée par ordinateur ne sont pas, en majeure partie, assurés par les fabricants de composants. Depuis quelques années, la structure elle-même des sociétés de fabrication de semiconducteurs a fait l'objet d'évolutions divergentes. L'explosion des coûts de recherche et de production ainsi que la nécessité d'atteindre des volumes de production importants dans des délais très brefs ont conduit certaines entreprises à renoncer à réaliser leur propre fabrication tandis que d'autres se spécialisaient dans ce secteur d'activité. Actuellement, trois modèles industriels coexistent avec leurs avantages, mais également leurs limites.

- Les « fabless », c'est-à-dire les sociétés sans capacité de production : elles se concentrent sur les activités les plus rentables et les moins mobilisatrices en capitaux et lancent sur le marché de nouvelles applications en ne développant que la conception du système global dont les couches logicielles, les composants étant fournis par les fonderies ou les sociétés intégrées. A titre d'exemple d'abandon du modèle intégré, d'anciennes entreprises intégrées comme NXP ou Texas Instrument sont en train de réduire drastiquement leurs capacités de production.
- Les fonderies qui sont spécialisées dans la fabrication en volume de semiconducteurs, tirant profit du caractère capitalistique de cette industrie. Ces fonderies, extrêmement robotisées, sont principalement installées à Taïwan où ce concept a été inventé à la fin des années 80. Il s'agissait alors de se positionner dans des secteurs novateurs et d'éviter la concurrence des puissants producteurs intégrés. Aujourd'hui, deux entreprises, TSMC et UMC détiennent respectivement 50 % et 19% du marché mondial de la fabrication de circuits intégrés en sous-traitance.
- Les sociétés intégrées s'appuient sur le fait que le travail d'ingénierie sur les équipements est fondamental pour trouver les astuces techniques et les innovations qui permettent de supprimer les éventuels défauts de production et augmenter rapidement les rendements. Compte tenu des délais très brefs imposés aux entreprises de semiconducteurs pour réaliser leurs produits, une bonne synergie entre les équipes de développement des produits et celles responsables de la production permet de gagner du temps dans la mise en

production. Ces sociétés consacrent entre 10 et 20 % de leur chiffre d'affaires à la recherche et développement. Néanmoins, compte tenu du coût de développement d'une technologie aucune, à l'exception notable d'Intel n'est capable de fournir seule l'effort financier nécessaire. Elles ont donc été obligées de créer des alliances afin de partager les coûts de R&D. Telle était la finalité de l'alliance de Crolles 2 signée en 2002 pour une durée de cinq ans entre STMicroelectronics, NXP et Freescale. Un laboratoire-centre de recherche commun a été créé pour développer les générations CMOS 90 nm, 65 nm et 45 nm et les options dérivées à haute valeur ajoutée (analogique, radiofréquence, mémoires embarquées). Dans l'accord entre STMicroelectronics et IBM signé en 2007, il est convenu qu'IBM rejoigne STMicroelectronics à Crolles pour le développement des technologies dérivées dans le cadre d'un cluster que STMicroelectronics essaie de constituer et dont IBM sera le premier membre extérieur. En ce qui concerne la fabrication des produits issus de l'alliance, il est prévu que les technologies CMOS bulk 32 nm et 22 nm soient transférées à Crolles pour la fabrication en volume des circuits intégrés pour les clients de STMicroelectronics. Parallèlement, les technologies développées à ST-Crolles seront mises en production à Crolles puis transférées à IBM-East Fishkill. STMicroelectronics pourra utiliser les capacités de production de la plateforme commune, mais reste également libre de faire appel à d'autres fondeurs.

Mais cette histoire de la microélectronique avec cette formidable expansion industrielle, n'aurait pu être possible sans la fabrication en 1960 par D.Kahn et M. Attala d'un transistor à partir d'un Métal déposé sur un Oxyde et un Semiconducteur (MOS). Ce succès il le doit à sa faible consommation statique (dissipation de puissance), son fort pouvoir de concentration sur une même puce et ses bonnes performances en fréquence (rapidité). Les prochains paragraphes seront consacrés à la description des mécanismes de base du transistor MOS.

I.1.2 La technologie MOS

Le principe de base de la technologie MOS repose sur l'effet « de champ » (créé par l'application d'une tension électrique sur le Métal), qui va moduler de façon électrostatique une densité de charges mobiles traversant le semiconducteur. La figure I-3 illustre cet effet de champ sur un empilement de type MOS. On l'utilise souvent par son terme MOSFET, acronyme de « Metal Oxyde Semiconductor Field Effect Transistor ».

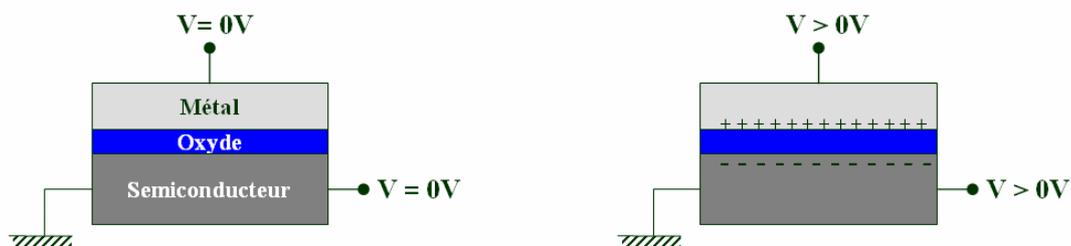


Figure I-3: Illustration de l'effet de champ.

Typiquement, en microélectronique la couche de métal est généralement remplacée par du silicium polycristallin. D'une manière imagée on peut voir le transistor comme un interrupteur. Le transistor MOSFET fait appel à un seul type de porteur de charge, on parle de transistor unipolaire. On parlera de transistor :

- n-MOS lorsque les charges mises en jeu sont des électrons
- p-MOS lorsque les charges mises en jeu sont des trous.

Le transport des charges s'effectue entre deux réservoirs, la *source* et le *drain*. La source fournit des porteurs et le drain les collecte sous forme de courant.

Il existe deux architectures de transistor :

- à canal surfacique (appelé également canal d'inversion) : il est induit électrostatiquement par l'effet de champ. Son type de conduction est opposé à celui du substrat, mais de même type que les régions source et drain, rendant ainsi le passage du courant possible. On parle ici de MOS à enrichissement.
- à canal enterré (appelé également canal d'accumulation) : le canal est constitué par une fine couche fixe (dite enterrée) du semiconducteur dopé, du même type de conduction que les régions source et drain. Si cette couche est suffisamment épaisse, le passage du courant est possible même sans effet de champ.

Pour illustrer le principe de fonctionnement nous prendrons l'exemple d'un transistor n-MOS à canal surfacique.

a) Structure et principe de fonctionnement d'un transistor MOS

Le transistor MOS est constitué de trois électrodes : la grille, la source, le drain. Sa longueur est notée L et sa largeur W . L'épaisseur du diélectrique est communément appelée T_{ox} . Habituellement, la source est reliée à la masse ainsi que le substrat. Le drain est porté à un potentiel supérieur à celui de la source et du substrat, créant ainsi un champ électrostatique entre la source et le drain. Les tensions appliquées sont référencées par rapport à la source et on notera V_g , V_d les tensions de grille et de drain correspondant aux différences de potentiels grille-source ($V_g - V_s$) et drain-source ($V_d - V_s$). Les différents transistors sont isolés électriquement par des tranchées d'isolation appelées STI (« Shallow Trench Isolation »). La figure I-4 présente les différents éléments d'un transistor.

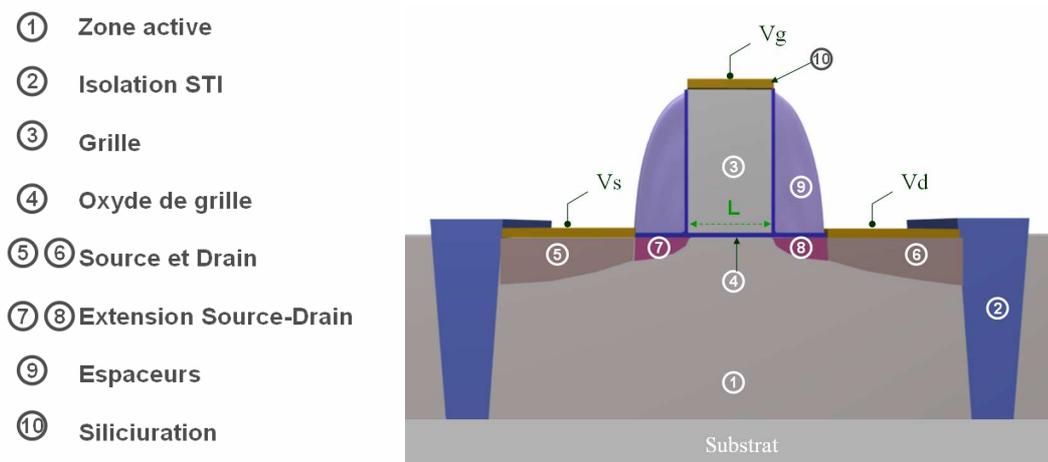


Figure I-4: Représentation 2D d'un transistor MOS et description de ses éléments principaux.

Dans le cas d'un MOSFET à enrichissement, au repos la capacité grille/substrat est flottante à vide : il n'y a quasiment pas de porteurs pour conduire un éventuel courant, les deux jonctions source-substrat et substrat-drain sont polarisées en inverse, comme nous le montre la figure I-5. Il faudra appliquer une tension positive à la grille,

suffisante pour créer une déplétion en trous, repoussés de la surface du substrat (pour le cas du transistor n-MOS) afin de créer une zone d'inversion de charge constituant le canal de conduction des électrons entre la source et le drain. Cette tension V_g est appelée tension de seuil V_{th} .

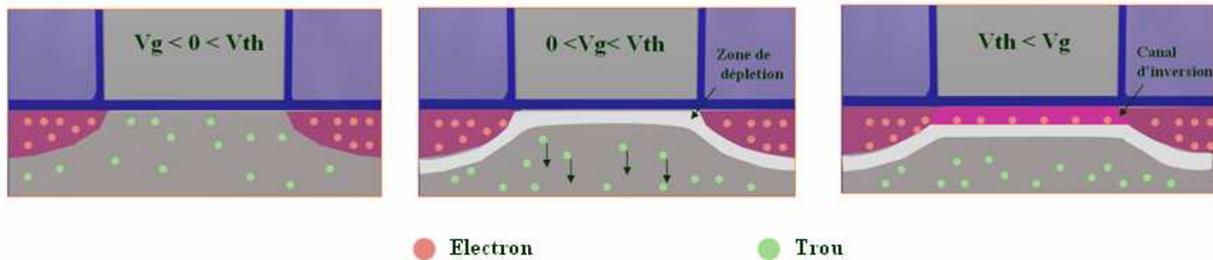


Figure I-5: Création d'une zone d'inversion de charge par application d'une tension V_g dans le cas d'un transistor n-MOS.

En dessous de ce seuil de tension, le courant ne peut passer et le transistor est dit en régime bloqué. Au dessus, le transistor est dit passant et laisse circuler le courant, c'est le régime dynamique.

Deux zones de fonctionnement sont alors possibles en régime dynamique. L'augmentation de la polarisation entre le drain et la source augmente le courant : on parle de zone de fonctionnement linéaire. À partir d'une tension de drain supérieure à la tension de grille moins la tension de seuil, le champ électrostatique entre le substrat et la grille s'inverse localement au voisinage du drain. Le canal d'électrons y disparaît, le courant sature. Toute augmentation de la tension de drain au-delà de la tension de saturation conduit à une disparition encore plus précoce du canal d'électrons, et à une augmentation faible voire nulle du courant. Ces deux zones sont représentées sur la figure I-6.

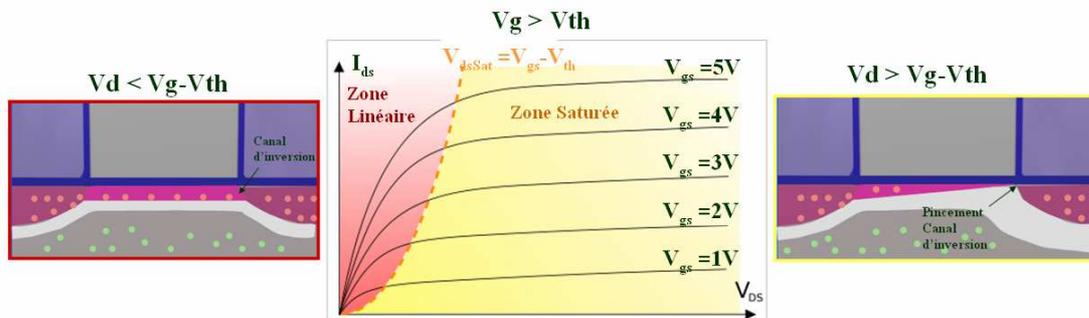


Figure I-6: Zones de fonctionnement du régime dynamique d'un transistor n-MOS.

Les applications en microélectronique requièrent un fonctionnement optimal des transistors. Le courant débité I_{on} (ou I_{ds}) doit être élevé et le courant de fuite I_{off} (I_{gs}) faible pour avoir une faible consommation statique.

Le courant I_{on} (ou courant de saturation) mesuré à la tension drain/source de saturation s'écrit :

$$\text{Courant } I_{on} : I_{on} = \frac{W}{L} \mu C_{ox} \frac{(V_g - V_{th})^2}{2} \quad \text{avec} \quad C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{T_{ox}}$$

Avec :

W : Largeur du canal

L : Longueur du canal
 μ : Mobilité des porteurs dans le canal
 C_{ox} : capacité du diélectrique de grille
 V_g : Tension appliqué à la grille
 V_{th} : Tension seuil
 T_{ox} : Epaisseur du diélectrique de grille
 ϵ_{ox} : Permittivité de l'isolant de grille

Les paramètres I_{on} et I_{off} apparaissent donc comme de très bons indicateurs des performances d'un dispositif. D'un coté, I_{off} caractérise les fuites du transistor et donc sa consommation statique, de l'autre I_{on} indique sa vitesse de fonctionnement. Ainsi, de génération en génération, la quête de la microélectronique consiste donc à fabriquer un transistor avec le rapport I_{on} / I_{off} le plus élevé possible. Le graphique I_{on} / I_{off} constitue ainsi une des principales figures de mérite utilisées pour évaluer et comparer les performances de plusieurs dispositifs, comme le montre la figure I-7.

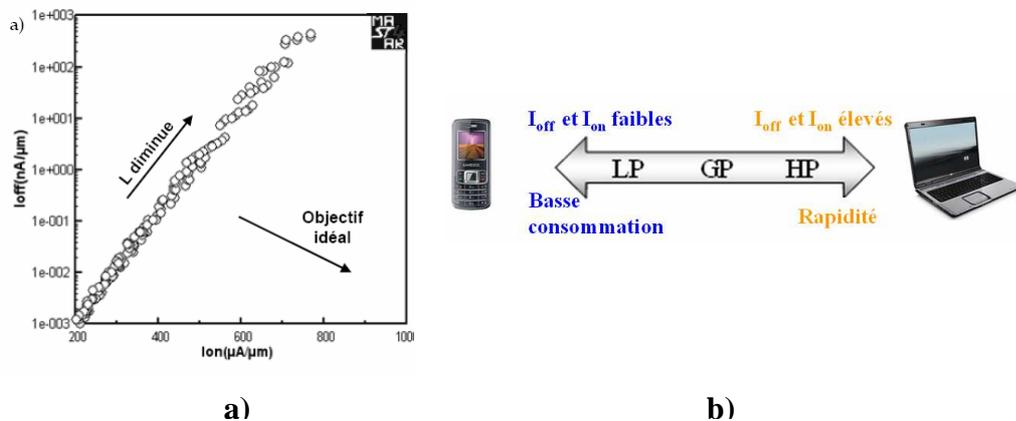


Figure I-7: a) Graphique I_{on}/I_{off} pour des nMOS à $V_d = 0.9V$ ^{5,6}
 b) Familles de transistors: HP (High Performance), LP (Low Power) et GP (General Purpose).

Néanmoins en fonction des applications, des compromis sont faits : priorité à la vitesse et la puissance statique est secondaire, ou alors l'inverse, une très faible consommation et l'exigence sur la vitesse est moindre. Il existe donc trois principales famille de transistors : le transistor HP (High Performance) très rapide mais avec des courants de fuite relativement élevés, le transistor LP (Low Power) privilégie une faible consommation tout en maintenant un courant de saturation assez élevé. Le transistor GP (General purpose) est un compromis entre faible consommation et rapidité. Le choix se fait en fonction des applications dans lesquelles seront implantées les circuits intégrés, par exemple, transistor HP pour les microprocesseurs et cellule mémoire, et LP pour la téléphonie mobile.

b) Du MOS au circuit intégré

La venue par la suite de la technologie CMOS (Complementary MOS) associant un transistor n-MOS avec un transistor p-MOS sur un même substrat a permis de réaliser des fonctions logiques. Un circuit élémentaire (ou porte) de traitement numérique d'une information binaire comporte très peu de transistors, en les interconnectant entre eux il forme une fonction logique particulière. La figure I-8 donne la représentation logique des transistors n et p-MOS.

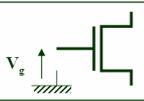
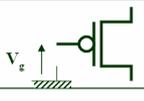
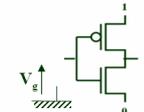
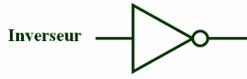
Dipôle d'entrée	Niveau logique sur la grille	
	0	1
Transistor	Modèle en interrupteur du dipôle de sortie	
n-MOS	Bloqué	Passant
		
p-mos	Passant	Bloqué
		
CMOS	1	0
	Inverseur 	

Figure I-8: Représentation logique de la technologie CMOS

Comme nous l'avons vu précédemment un transistor peut être perçu comme un interrupteur. Dans le cas de l'augmentation de la tension de grille positive V_g , le transistor n-MOS sera en position passante et le p-MOS en position bloquée. Pour une tension V_g négative, ce sera l'inverse. La fonction inverseur est la porte logique la plus simple à réaliser, elle résulte de l'association d'un transistor n-MOS et p-MOS.

Le nombre d'éléments électroniques du type transistor et d'interconnexions entre ces éléments dépend de la complexité de la fonction de calcul à réaliser. De nombreuses applications sont maintenant possibles. L'une des plus répandues est le microprocesseur, il faut compter plusieurs millions de transistors et au moins 10 niveaux de métal pour les connecter entre eux. C'est l'unité de traitement des informations de nos ordinateurs.

La figure I-9 présente la photographie d'un microprocesseur associé sur le même circuit à un microcontrôleur dédié au traitement d'entrée et de sortie des informations.

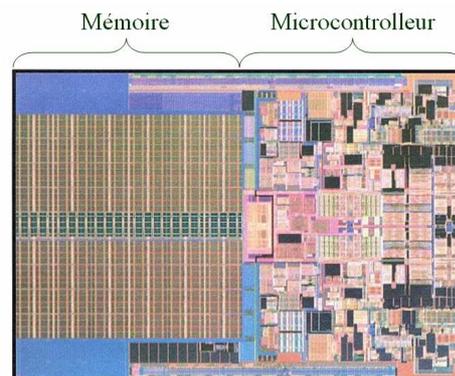


Figure I-9: Photographie d'un microprocesseur comprenant une partie mémoire et une partie microcontrôleur.

Le microprocesseur permet de gérer une quantité importante de données stockées dans les cellules mémoires RAM (pour mémoire à accès arbitraire « Random Access Memory »). Ces mémoires dites volatiles ont besoin d'être en permanence sous tension pour garder leur information. Il existe deux types de mémoire RAM, les dynamiques DRAM (Dynamic Random Access Memory) et les statiques SRAM (Static Random Access Memory). La DRAM, associant un transistor et un pico-condensateur, a besoin que son condensateur soit rafraîchi en permanence, mais elle

est très utilisée car elle est bien meilleur marché que la mémoire statique. En effet, la cellule mémoire élémentaire de la DRAM est très simple et ne nécessite que peu de surface de silicium. La cellule SRAM est, elle, très rapide et ne nécessite pas de rafraîchissement, par contre, elle est chère, volumineuse et grosse consommatrice d'électricité.

La cellule SRAM est constituée de 6 transistors, 2 transistors pour la lecture et l'écriture des informations (2 transistors n-MOS appelés « Pass Gate » ou PG), et 4 transistors pour la mémoire (2 transistors n-MOS, les « Pull Down » ou PD et 2 transistors p-MOS, les « Pull Up » ou PU) comme le montre la figure I-10.

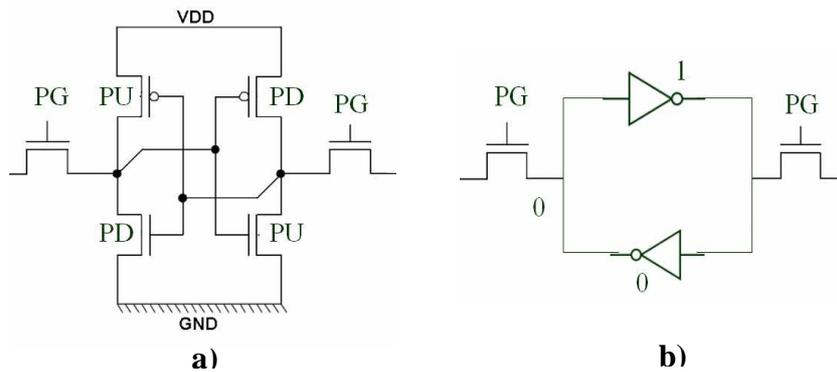


Figure I-10: a) Schéma logique d'une cellule mémoire SRAM et b) équivalence sous forme d'inverseur.

Comme nous l'avons décrit précédemment, un transistor n-MOS associé à un p-MOS peut être perçu comme une porte logique inverseur, les 4 transistors constituant la mémoire de la cellule SRAM sont donc équivalents à 2 inverseurs tête-bêche. Par exemple lors de l'inscription d'un 0, le premier inverseur renvoie un 1 au second inverseur, qui renvoie à son tour un 0 au premier et ainsi de suite, l'information est ainsi gardée en mémoire.

Nous verrons dans le chapitre III que la technologie SRAM sera au cœur des choix stratégiques des procédés de fabrication des transistors chez STMicroelectronics. Nous avons vu dans la figure I-10, la disposition logique d'une cellule SRAM, la figure I-11 présente celle-ci sous forme d'architecture (a), en vue de dessus au microscope électronique à balayage (b) (Scanning Electron Microscopy SEM) et en représentation 3D (c).

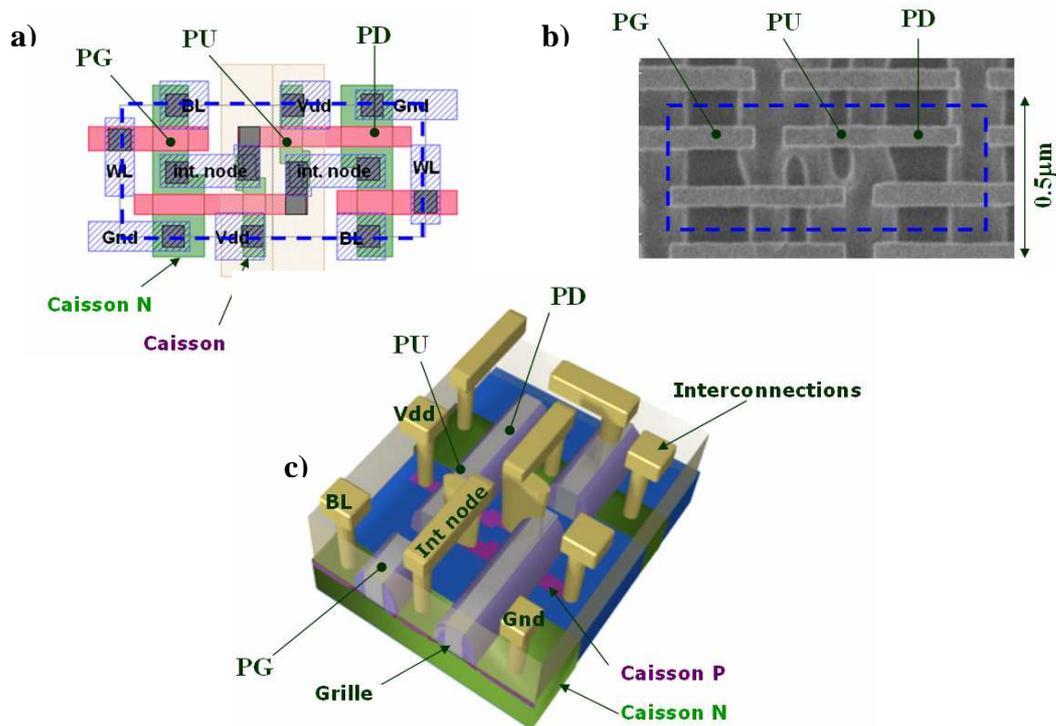


Figure I-11: a) architecture, b) photographie SEM en vue de dessus, et c) représentation 3D d'une cellule SRAM.

I.1.3 Les étapes de fabrication d'un circuit intégré

Les circuits intégrés sont aujourd'hui produits de manière industrielle. Plusieurs circuits sont ainsi réalisés en même temps sur un substrat, le plus souvent en silicium monocristallin. Pour des raisons de rentabilité, on a progressivement augmenté la taille de ces plaques (ou wafer en anglais) de 50mm à 300mm. La figure I-12 présente cette évolution au fil des années.

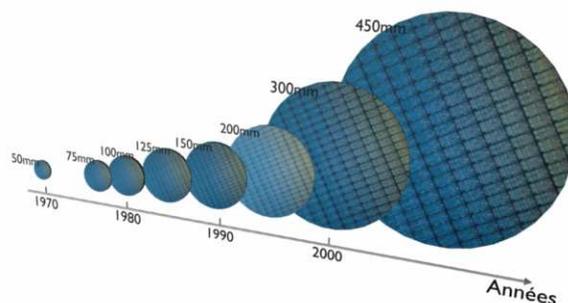


Figure I-12: Evolution de la taille des plaques de silicium.

De part la taille des dispositifs sur le circuit intégré, il est indispensable de travailler dans un environnement propre dit « salle blanche », c'est-à-dire dans des locaux sans poussière avec des conditions de température et d'hygrométrie contrôlées, afin de prévenir toute contamination qui pourrait endommager les fonctionnalités du circuit. La salle blanche de STMicroelectronics est de classe 10 c'est-à-dire qu'il y a au maximum 10 particules de 500 nanomètres de diamètre dans 28 litres d'air (contre 35 millions dans un environnement urbain).

Plus de 400 étapes technologiques sont aujourd'hui nécessaires à la conception d'un circuit intégré. On peut segmenter ces étapes en six grandes familles.

- L'épitaxie consistant à faire croître un cristal d'un matériau sur un autre matériau.
- Le dopage, consistant à introduire des éléments chimiques dans un matériau
- Le traitement thermique, consistant à élever la température d'un substrat sous atmosphère contrôlée afin de changer ses propriétés.
- Le dépôt consistant à déposer un matériau sur un autre matériau.
- La lithographie, permettant de définir les motifs dans une résine photosensible
- La gravure, consistant à enlever un matériau par plasma.
- Le polissage mécano-chimique, pendant lequel on vient aplanir une surface
- Les nettoyages, enlevant les éventuels résidus de la surface d'un matériau.

Ces différentes étapes se répartissent en deux zones caractéristiques. La fabrication de la partie active des circuits intégrés (les composants) ainsi que des premières interconnexions locales, appelée « Front End of Line » (FEOL). Et la fabrication des interconnexions entre les dispositifs actifs appelée le « Back End Of Line » (BEOL).

a) Le Front End of Line

Les différentes étapes constituant le Front End Of Line sont les suivantes :

- Formation des tranchées d'isolation (STI) : cette étape permet de séparer les zones actives (où les dispositifs actifs sont élaborés) par des tranchées, peu profondes, d'où le nom « Shallow Trench Isolation » et remplies d'oxyde SiO_2 afin d'isoler électriquement les différents composants (cf. figure I-13).

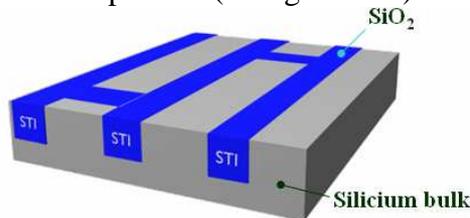


Figure I-13: Représentation du substrat après formation des tranchées d'isolation.

- Implantation des caissons N (Phosphore) et P (Bore). Les zones non implantées sont protégées par une résine photosensible. Le type de conduction est opposé à celui du transistor qui sera élaboré (cf. figure I-14).

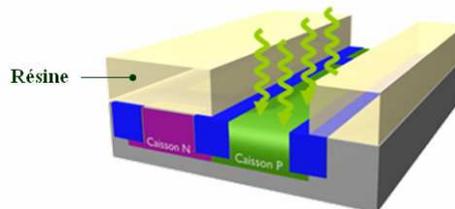


Figure I-14: Représentation du substrat lors de l'implantation des caissons P.

- Formation de l'oxyde de grille SiO_2 ou SiON par oxydation thermique (900°C et 1000°C) (incorporation d'azote pendant la croissance à partir des technologies 65nm). La qualité de l'oxyde est primordiale pour assurer une bonne isolation de la grille du reste du transistor. A chaque génération de transistor, l'oxyde de grille est aminci. Mais en dessous de 1nm, des effets quantiques surviennent, tel

que l'effet tunnel, et l'oxyde ne joue plus son rôle d'isolant. A partir du nœud 32nm, l'oxyde de grille est remplacé par des diélectriques à plus forte permittivité (ex : HfO_2), afin de limiter les fuites de courant par effet tunnel. Dépôt de l'empilement de grille du transistor, actuellement du silicium polycristallin mais en silicium + métal pour les futures générations 32 et 22nm. (cf. figure I-15).

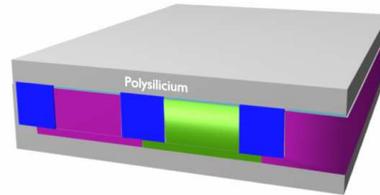


Figure I-15: Représentation du substrat après dépôt de l'oxyde grille et de l'empilement de la grille.

- Dépôt d'un matériau antiréfléctif « ARC » (Anti Reflective Coating) et d'une résine photosensible. Insolation de la résine au travers d'un masque lors de l'étape de photolithographie, venant définir les motifs (cf. figure I-16).

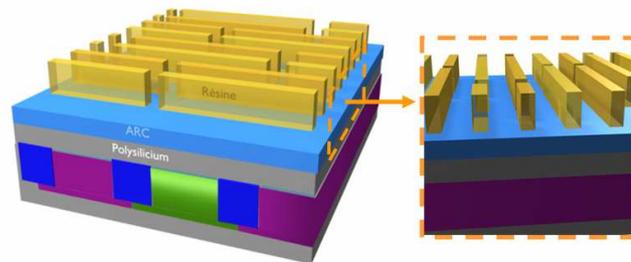


Figure 16: Représentation du substrat après l'étape de photolithographie

- Puis transfert des motifs de la résine par gravure plasma dans le polysilicium, constituant ainsi l'électrode de grille (cf. figure I-17). Ces étapes seront plus largement détaillées dans le paragraphe I.2.3.

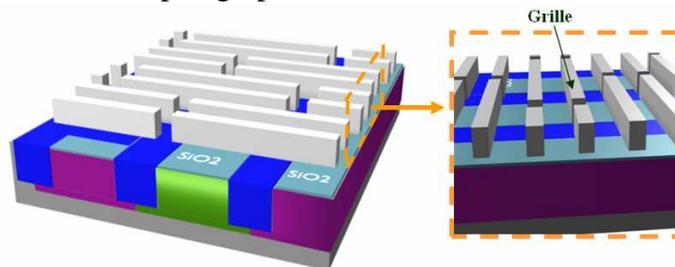


Figure I-17: Représentation du substrat après la définition des grilles dans le polysilicium.

- Formation des zones source et drain en deux fois. Les zones non implantées sont protégées par une résine. Une première implantation ionique de dopants est réalisée avec des faibles doses (10^{13} atomes/cm²) appelés les LDD (Lightly Doped Drain) conduisant à la formation d'une partie des zones source drain et de leurs extensions. Puis il y a formation des espaceurs par gravure plasma après dépôt nitrure (Si_3N_4). Puis vient ensuite la seconde implantation ionique à plus forte dose (10^{15} atomes/cm²). Les espaceurs vont limiter la diffusion des dopants sous la grille, afin que les extensions source drain ne soient pas trop profondes (cf. figure I-18).

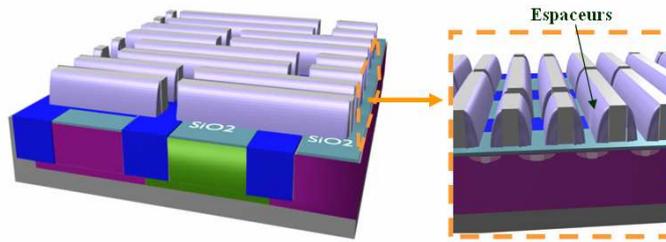


Figure I-18: Représentation du substrat après implantation des zones source-Drain.

- Après la siliciuration des zones grille, source et drain, pour réduire la résistance des contacts, il y a la formation des premières interconnexions entre les transistors. Ce premier niveau métallique est en tungstène, moins affecté par les forts courants mis en jeu à ce niveau d'interconnexions (cf. figure I-19).

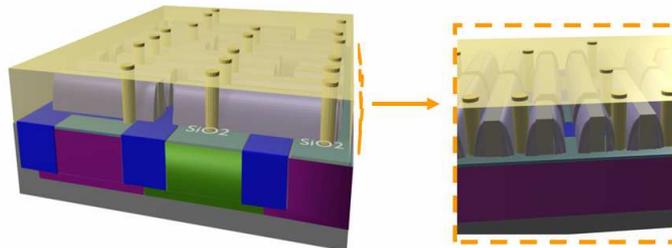


Figure I-19: Représentation du substrat après formation des contacts, premier niveau d'interconnexion métallique M1.

b) Le Back End of Line

Le BEOL correspond aux étapes qui vont permettre de réaliser les interconnexions métalliques entre les différents éléments actifs du circuit. La figure I-20 présente l'élaboration du circuit intégré après la formation du second niveau métallique M2. De plus il est également nécessaire d'isoler électriquement les éléments actifs qui n'ont pas été connectés entre eux au moyen de tranchées isolantes. Il faut aujourd'hui au moins dix niveaux d'interconnexions métalliques. Le couple métal/isolant est choisi afin de minimiser le temps de réponse des interconnexions qui est égal au produit de la résistance R du métal et de la capacité du diélectrique C . On cherche donc des métaux à faible résistivité et des isolants à faible permittivité dit « low K ». Depuis 2001, le métal utilisé est du cuivre (résistivité $1.67 \mu\Omega \cdot \text{cm}^{-1}$) et le diélectrique du SiOC (permittivité 3).

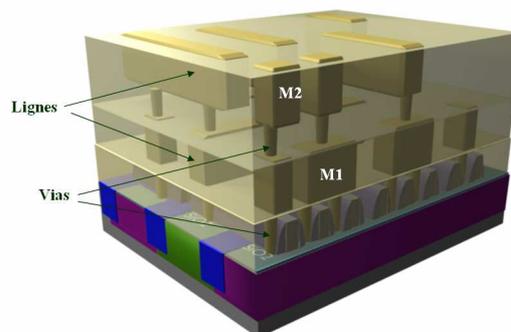


Figure I-20: Représentation du substrat après la formation du niveau d'interconnexion métallique M2.

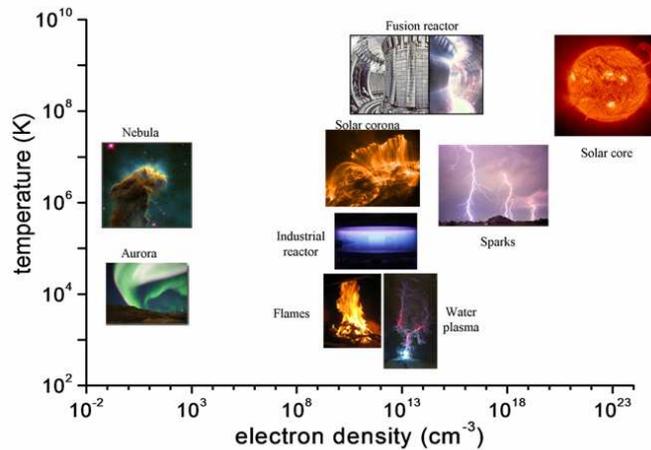


Figure I-22: Familles des plasmas caractérisées par la densité des électrons n_e et la température électronique T_e .

Les différents types de plasmas se différencient par leur degré d'ionisation et par leur température qui peut aller de 10^8 K pour la fusion thermonucléaire à 10^3 K pour les flammes d'un feu.. Deux types de plasmas sont utilisés comme outils technologiques:

- les plasmas chauds (ou plasma de fusion) où la proportion d'ions est grande face à la proportion d'espèces neutres. Les interactions entre particules chargées sont dominantes dans le plasma. La température y est très élevée ($T > 10^6$ K) (étoiles, fusions nucléaires)
- les plasmas froids ($T < 10^6$ K) où la proportion d'ions est faible face à la proportion d'espèces neutres, les interactions régissant le comportement des particules chargées se font principalement avec les espèces neutres.

Ce sont ces derniers qui sont largement utilisés dans la microélectronique. Les procédés qui nous intéressent dans le cadre de ces travaux de thèse se situent à environ 30000K. Ces plasmas, dits « froids », présentent un degré d'ionisation inférieur à 10^{-2} alors que les plasmas de fusion ont un degré d'ionisation proche de 1. Le degré d'ionisation d'un plasma est défini de la façon suivante :

$$\text{Degré d'ionisation : } \alpha = \frac{n_i}{n_i + N_g}$$

Avec n_i : la densité d'ions (en cm^{-3})

N_g : la densité d'espèces neutres (en cm^{-3})

Les plasmas froids sont entretenus par des champs électriques qui exercent une force $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$ sur les espèces chargées présentes dans le plasma. Il en résulte une accélération γ différente pour les ions et les électrons :

$$\text{Accélération ionique : } \vec{\gamma}_i = \frac{e\vec{E}}{m_i} \quad \text{et électronique : } \vec{\gamma}_e = \frac{-e\vec{E}}{m_e}$$

Avec e : charge élémentaire

E : Champ électrique

m_i, m_e : masse ionique et électronique

Les électrons du plasma sont donc beaucoup plus rapides que les ions, ce qui revient à dire que les ions et les électrons ne sont pas à l'équilibre thermodynamique entre eux. Il est cependant possible de définir une température pour chacune de ces espèces en faisant l'approximation que les distributions de vitesses sont Maxwelliennes (c'est-à-dire qu'il y a équilibre thermodynamique au sein de chaque espèce).

Pour les plasmas utilisés en gravure et dépôt, la température électronique est typiquement comprise entre 1 et 10 eV (ce qui correspond à 10^4 - 10^5 K) alors que la température ionique (du même ordre de grandeur que la température des neutres) est comprise entre 300 et 1000 K. On a donc toujours $T_e \gg T_i$.

Au niveau des parois de l'enceinte contenant le plasma (ceci est aussi valable pour un objet conducteur introduit dans un plasma), les électrons rapides ne sont pas confinés lors de l'allumage du plasma et sont perdus sur les parois avec un flux bien supérieur au flux d'ions. Pour conserver sa quasi-neutralité, le plasma se « protège » par la formation de gaines de charges d'espace positive d'une épaisseur de l'ordre de 50 à 500 μm . Le plasma est ainsi porté à un potentiel $V_p > 0$ qui permet d'accélérer les ions vers les parois et de confiner une partie des électrons de façon à obtenir l'équilibre des flux d'ions Φ_i et d'électrons Φ_e perdus sur les parois. Les plasmas ont la particularité de présenter des espèces très réactives (radicaux) qui sont le résultat de la dissociation de molécules gazeuses sous l'impact d'électrons rapides. Il est ainsi possible d'obtenir des réactions nécessitant un apport d'énergie important sans avoir à porter les matériaux à traiter à des températures élevées. Par ailleurs, toute surface exposée à un plasma est soumise à un bombardement ionique énergétique et directionnel (vecteur vitesse perpendiculaire au substrat). Les plasmas sont donc particulièrement adaptés pour les traitements et modifications de surfaces, ainsi que pour le dépôt ou la gravure directionnelle de matériaux, notamment en microélectronique.

Comme nous l'avons expliqué au début de ce paragraphe, les conditions pour générer un plasma existent à l'état naturel mais elles peuvent être reproduites artificiellement dans une enceinte. Les réacteurs de gravure sont une des applications des plasmas créées artificiellement.

I.2.2 La gravure par plasma

Il y a plusieurs façons de générer un plasma. Dans tous les cas, c'est une question d'apport d'énergie à un gaz contenu dans une enceinte. Suivant l'application visée (gravure de silicium, de métal ou de diélectrique, dimensions, épaisseur à graver...), différents types de réacteurs peuvent être utilisés. Ils sont présentés ici succinctement.

a) Les réacteurs de gravure

Les réacteurs de gravure peuvent se classer en deux catégories, les sources basse-densité et haute-densité.

Les sources basse-densité

Les sources dites « RIE » (Reactive ion etching) et « MERIE » (magnetically enhanced reactive ion etching) sont des sources basse densité. Historiquement, les sources RIE ont été les premiers types de réacteurs à avoir été utilisés. Leur configuration est simple : la décharge est produite entre deux électrodes parallèles, l'électrode inférieure étant constituée par la plaque à graver. Le plasma est maintenu par application d'une tension radiofréquence (RF) sur l'électrode ou est posé le

substrat. Ce type de réacteur permet d'obtenir un bombardement très énergétique du substrat. Les réacteurs MERIE sont particulièrement adaptés à la gravure des diélectriques car ils permettent d'obtenir une bonne sélectivité entre le masque de gravure et la résine. Il s'agit d'un réacteur basse-densité car l'énergie injectée est surtout absorbée par les ions (la densité électronique est de l'ordre de 10^9 - 10^{10} cm^{-3}). Il fonctionne uniquement à haute pression (20-500 mTorr) car les électrons sont accélérés par des champs électriques axiaux et il faut donc avoir un libre parcours moyen des électrons très inférieur à la distance interélectrodes pour allumer le plasma. La principale limitation de ces réacteurs est que les variations de la puissance RF injectée influent à la fois sur l'énergie des ions et sur le flux d'ions, qui ne peuvent donc être contrôlés indépendamment. Ceci est donc problématique pour obtenir un flux ionique important mais avec une énergie de bombardement moyenne. Ainsi de nouvelles générations de réacteur basse densité utilisent plusieurs fréquences d'excitation (> 13.56 MHz) afin de pouvoir contrôler à la fois le flux et l'énergie des ions (ex : LAM FLEX).

Les sources haute-densité

Dans ce type de source, le plasma est généré par couplage inductif d'une puissance RF à un gaz au travers d'une fenêtre diélectrique, de façon inductive, source ICP (Inductively Coupled Plasma) ou par micro-onde (couplage RCE pour Résonance Cyclotronique Électronique). Ainsi, à l'inverse des sources basse densité où la majorité de la puissance est absorbée par les ions, ce sont les électrons qui absorbent la puissance injectée et nous obtenons un taux d'ionisation beaucoup plus important (et une densité électronique jusqu'à 10^{12} cm^{-3}). La puissance injectée fixe la densité électronique et le flux d'ions alors que l'énergie des ions bombardant le substrat est contrôlée indépendamment par un couplage capacitif (autopolarisation du substrat). Ce type de réacteurs permet de travailler à fort flux ionique et basse énergie des ions. Ces sources peuvent fonctionner à très basse pression (moins de 20 mTorr) car les mécanismes de chauffage des électrons sont différents de ceux obtenus dans les sources capacitives. Il est cependant difficile d'obtenir un bombardement ionique très énergétique.

Les réacteurs de gravure utilisés dans ce travail sont des sources ICP. La circulation d'un courant i_{RF} dans une antenne induit un flux magnétique B variable dans l'enceinte, qui induit à son tour un champ électrique RF azimutal E dans le plasma, comme montré dans la figure I-23.

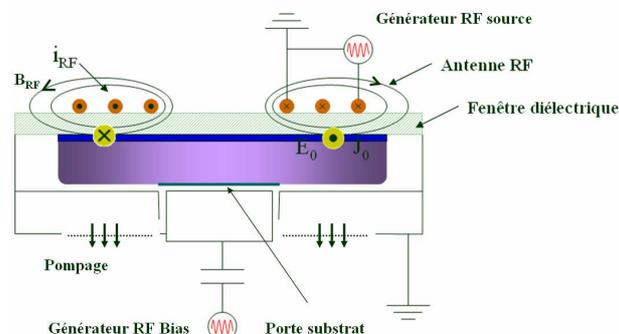


Figure I-23: Schéma d'un réacteur plasma ICP.

La puissance ainsi fournie au plasma est préférentiellement absorbée par les électrons en raison de leur très faible inertie par rapport aux ions. On peut en réalité définir une pulsation plasma pour les électrons ω_{pe} et une pour les ions ω_{pi} , traduisant leur

aptitude à répondre aux variations du champ électrique. Pour les conditions rencontrées dans les ICP ($n_e \sim 10^{10} - 10^{11} \text{ cm}^{-3}$), la fréquence électronique du plasma est très supérieure à la fréquence ionique, voir équations ci-dessous :

$$\text{Pulsation et fréquence plasma électronique : } \omega_{pe} = \sqrt{\frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e}} \quad \text{soit } f_{pe} = \frac{\omega_{pe}}{2\pi} \approx 1 \text{GHz}$$

$$\text{Pulsation et fréquence plasma Ionique : } \omega_{pi} = \sqrt{\frac{q^2 n_i}{\epsilon_0 M_i}} \quad \text{soit } f_{pi} = \frac{\omega_{pi}}{2\pi} \approx 3 \text{MHz}$$

Ainsi la fréquence d'excitation RF (13,56 MHz) est telle que les électrons peuvent répondre instantanément aux variations du champ électrique alors que les ions ne répondent qu'à la valeur moyenne de ce champ.

b) La gravure plasma entre gravure physique et chimique

Son principe est de transférer le plus fidèlement possible les motifs d'une résine dans des empilements de couches minces. Deux critères sont donc essentiels, le premier est que la gravure doit être le plus anisotrope possible, le second est que les motifs de la résine ne doivent pas être altérés lors de la gravure afin de respecter les dimensions critiques (CD) du masque (perte latérale, facettage...). La gravure humide, utilisée avant l'introduction des plasmas dans les années 1975, de part son caractère chimique grave de manière isotrope la matière. L'intérêt d'utiliser la gravure par plasma est que, dans certaines conditions, elle peut être faite de manière anisotrope et assurer des flancs verticaux dans les motifs de petites dimensions, comme illustré dans la figure I-24.

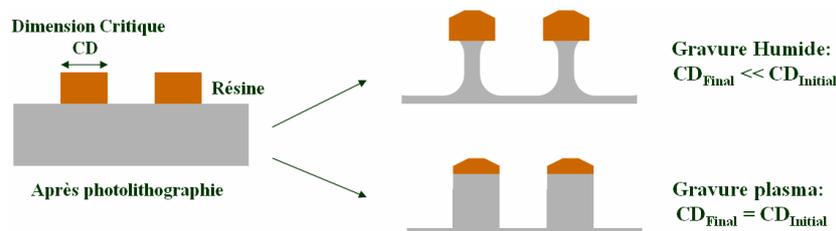


Figure I-24: Gravure humide et gravure par plasma

L'inconvénient de la gravure par plasma est qu'elle est coûteuse, plus complexe à appréhender et moins sélective.

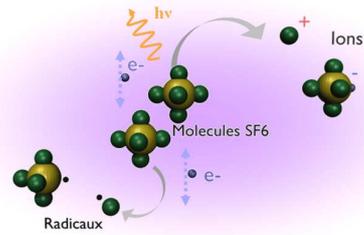
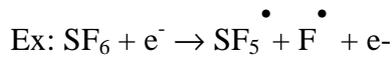
En effet, contrairement à la gravure humide qui n'agit que chimiquement sur la matière, la gravure par plasma est basée sur la synergie entre les ions et les neutres du plasma^{9, 10}.

La gravure chimique

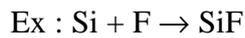
Elle correspond à l'action des espèces neutres. Elle ne dépend que de l'interaction entre le matériau à graver et les espèces neutres réactives générées par le plasma. Cette réaction de gravure spontanée n'est possible que si elle est thermodynamiquement réalisable (enthalpie de réaction est négative, $\Delta rH < 0$, réaction exothermique).

On peut décomposer la gravure chimique par plasma en quatre étapes. L'exemple concret de la gravure du silicium par un plasma de SF_6 est décrit ci-dessous.

1) Création dans le plasma d'espèces neutres chimiquement réactives



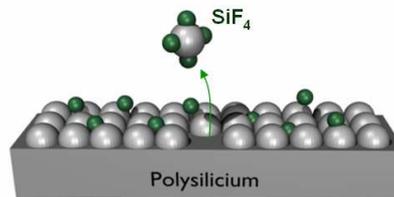
2) Adsorption des espèces réactives à la surface du matériau à graver



3) Formation des produits de réactions volatils



4) Désorption spontanée et pompage des produits de réaction



Il est important que les produits de gravure soient volatils et stables afin qu'ils puissent rapidement être désorbés de la surface du matériau et évacués du milieu par le système de pompage. Le gaz ou le mélange de gaz, est donc choisi en fonction du matériau à graver. Le tableau I-2 met en relation les matériaux utilisés dans la microélectronique avec leur gaz de gravure, ainsi que les produits de gravure résultants de ces interactions.

Matériaux	Gaz de gravure	Espèces réactives Produits de gravure
Polysilicium Si	SF ₆ HBr Cl ₂	F - SiF ₄ Br - SiBr ₄ Cl - SiCl ₄
Nitride Si ₃ N ₄	CF ₄ /O ₂	F - SiF ₄ C - CN
Oxyde SiO ₂	CF ₄ /CHF ₃ C ₄ F ₈ -C ₂ F ₆	F - SiF ₄ C - CO
Aluminium	Cl ₂ -CCl ₄ -BCl ₃	Cl - AlCl ₃
Résine	O ₂	O - CO ₂ /H ₂ O

Tableau I-2:Correspondance entre matériau à graver et gaz utilisé pour les graver.

Le silicium, réagit avec les halogènes pour former des tétrahalides de silicium. Ainsi il y aura formation de SiF_4 avec du fluor, de SiCl_4 avec le chlore, de SiBr_4 avec le brome. C'est leur différence de volatilité qui va définir leur différence de réactivité. Les différentes températures d'ébullition peuvent être un bon indicateur de la volatilité des molécules, ainsi le SiF_4 est plus volatil et donc plus réactif que le SiCl_4 et que le SiBr_4 comme nous l'indique leur température d'ébullition.

$$T_{\text{eb}}\text{SiF}_4(-86^\circ\text{C}) < T_{\text{eb}}\text{SiCl}_4(58^\circ\text{C}) < T_{\text{eb}}\text{SiBr}_4(153^\circ\text{C})$$

La gravure physique

La gravure physique correspond à la pulvérisation du matériau lorsqu'il est bombardé par des ions fortement énergétiques (de l'ordre de la centaine d'électronvolts). Les atomes en surface gagnent ainsi assez d'énergie sous cet impact ionique pour quitter la surface du matériau.

Cette gravure est appelée pulvérisation physique par le bombardement ionique¹¹.

Les ions, extraits du plasma et accélérés vers la surface, arrivent sur celles-ci avec une certaine énergie, E_i . La pulvérisation a lieu si l'énergie incidente de l'ion est suffisante pour éjecter un atome de la surface du matériau ($E_i > E_{\text{seuil}}$).

Ce processus est défini par le rendement Y (nombre d'atomes éjectés par ion incident) suivant théoriquement la loi suivante :

$$Y = A \left(\sqrt{E_i} - \sqrt{E_{\text{seuil}}} \right) \text{ pour } E_i > E_{\text{seuil}} \sim 20 \text{ à } 50 \text{ eV selon le matériau}$$

Le facteur de proportionnalité A et l'énergie seuil dépendent du matériau à graver, de l'état de surface, de la masse et l'angle d'incidence des ions. Mais les rendements restent tout de même très proches. La gravure par plasma de gaz rare, comme l'argon, est un exemple de gravure physique.

Les autres processus induits par les ions avec une énergie d'incidence plus faible que l'énergie seuil ne graveront pas directement le matériau mais participeront à la gravure par l'action combinée avec une attaque chimique.

A : Migration d'atomes adsorbés

$$E_i \sim 0.01 \text{ à } 0.2 \text{ eV}$$

B : Désorption d'espèces

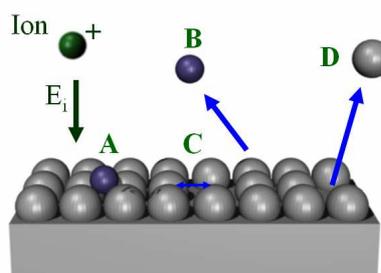
$$E_i \sim 0.1 \text{ à } 10 \text{ eV}$$

C : Déplacement d'atomes

$$E_i > 10 \text{ eV}$$

D : Pulvérisation

$$E_i > E_{\text{Seuil}} \sim 20 \text{ à } 50 \text{ eV}$$



La particularité de la gravure par plasma est qu'elle combine la gravure chimique et physique. Les vitesses de gravure ainsi obtenues seront 10 à 30 fois supérieures à celles obtenues par gravure chimique seule ou par pulvérisation physique seule. La synergie des ions (aspect physique du plasma) avec les neutres (aspect chimique du plasma) se traduit par plusieurs types de mécanismes de gravure

La gravure chimique assistée par les ions ou gravure chimique réactive

Dans ce mécanisme la cinétique des étapes élémentaires de la gravure chimique du matériau est accélérée par la présence des ions:

- Adsorption : le bombardement ionique facilite l'incorporation d'espèces réactives dans la couche de surface.
- Réaction : les défauts de structure et les liaisons pendantes créées en surface par le bombardement ionique augmente la probabilité de réaction entre les espèces réactives du plasma. De plus, l'apport énergétique facilite les réactions chimiques.
- Désorption : le bombardement ionique stimule la désorption des produits de gravure, pulvérise les espèces faiblement liées, et « nettoie » la surface d'espèces inhibitrices de gravure ou précurseurs de dépôt.

La figure I-25 présente l'effet de la synergie entre ions/neutre sur la vitesse de gravure du silicium. La gravure purement chimique en XeF₂ ou le bombardement ionique en Ar⁺ seul conduisent à des vitesses de gravure inférieures à 1nm/min alors que les deux effets combinés multiplient la vitesse de gravure par 10.

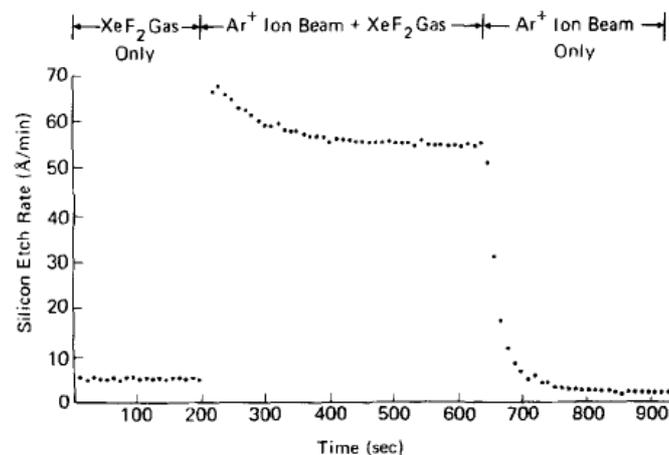


Figure I-25: Mise en évidence de la synergie ions/neutres mise en jeu dans la gravure plasma ¹²

La pulvérisation activée chimiquement ou gravure ionique réactive :

Les ions réactifs se neutralisent à l'approche de la surface du matériau à graver et acquièrent une forte énergie, et participent donc directement à la gravure chimique. Ce processus n'est possible que si le flux d'ions est comparable au flux de neutres, ce qui requiert un plasma basse pression (1 à 10mTorr) et haute densité (10^{11} à 10^{12} ions.cm⁻³).

c) Les paramètres clefs de la gravure par plasma

Un des problèmes majeurs rencontré par toutes les personnes travaillant dans les plasmas est qu'un grand nombre de paramètres peut influencer les procédés plasma. De plus les paramètres accessibles (pression, gaz, débits de gaz, puissance source, puissance de polarisation, température du substrat...) ne sont pas ceux qui pilotent directement les interactions plasma/surface. La mise au point des procédés est donc réalisée fréquemment de façon empirique. La figure I-26 représente les interactions entre les paramètres machine accessibles, les paramètres basiques du plasma (densité d'électron n_e , la fonction de distribution en énergie $f(E)$, la densité N , et le temps de résidence τ des espèces réactives) et les interactions plasma/surface.

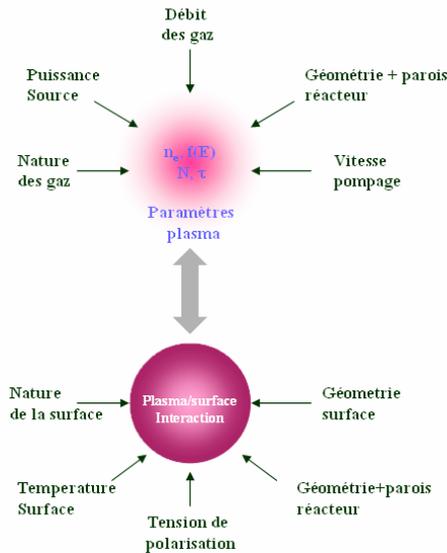


Figure I-26: Interactions entre les paramètres machine, les paramètres basique du plasma, et les interactions plasma surface.

Le chapitre III sera consacré à l'étude de l'impact de ces différents paramètres notamment la pression (vitesse de pompage), la puissance source, les débits de gaz, la température du substrat, la tension de polarisation, les parois du réacteur sur les critères de gravure lors des étapes du procédé grille 45nm.

I.2.3 Elaboration d'une grille

a) La lithographie

Cette étape permet de définir dans la résine les motifs qui seront ensuite transférés dans du polysilicium par la gravure plasma.

Elle comprend une étape d'insolation à travers un masque, puis une révélation chimique de la résine. A l'issue de cette étape, l'empilement à graver se trouve recouvert d'un masque résine avec les motifs désirés.

Il existe deux sortes de lithographie, la photolithographie et la lithographie par faisceau électronique (ou « e-beam»). La photolithographie est la méthode utilisée aujourd'hui en production industrielle, elle consiste à insoler une résine photosensible à l'aide d'une source lumineuse monochromatique, à travers un masque en quartz dont certaines zones sont protégées par une couche de chrome imperméable au rayonnement. Plusieurs étapes sont nécessaires à la photolithographie et sont décrites dans la figure I-27.

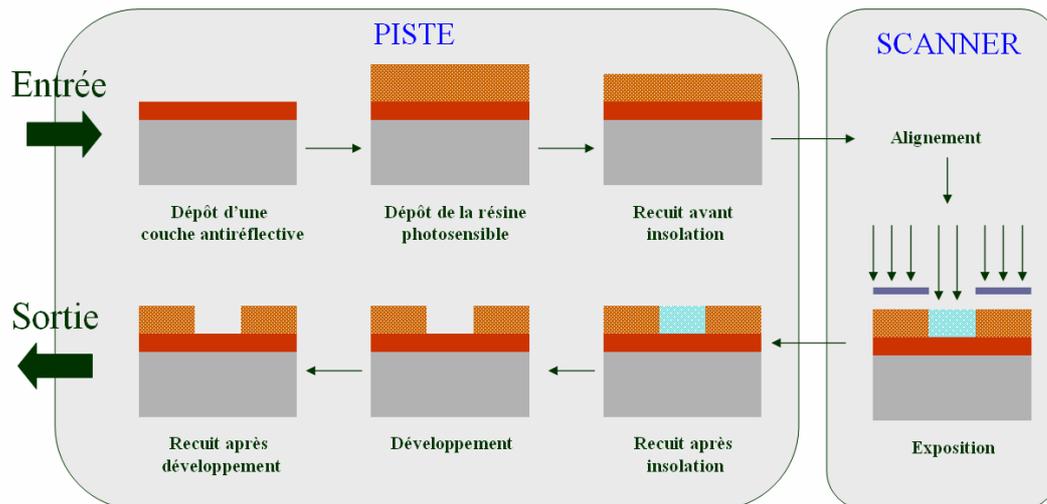


Figure I-27: Etape du procédé de photolithographie.

La présence d'une couche anti-réflexive (BARC pour Bottom AntiReflective Coating) est indispensable afin d'absorber les ondes réfléchies à l'interface de la résine et du substrat qui génèrent des ondes stationnaires dans la résine et qui peuvent engendrer une dégradation des motifs. Cette couche est habituellement de type organique. La résine photosensible est ensuite « couchée » et va subir un recuit afin d'améliorer l'adhésion entre la résine et le substrat en éliminant les résidus de solvant. A son entrée dans le scanner, le substrat est aligné avec le masque et exposé à une source UV (typiquement 248 ou 193nm selon les générations lithographiques). Selon que la polarité de la résine (positive ou négative), la partie exposée devient soluble ou insoluble quand elle est développée par voie humide. Des traitements de recuit après exposition et développement sont nécessaires afin d'améliorer la définition des motifs et l'adhésion des différentes couches.

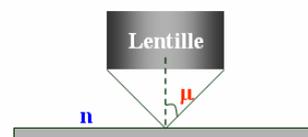
L'un des paramètres critiques de la lithographie est son pouvoir de résolution, c'est-à-dire le plus petit intervalle réalisable entre deux motifs. La résolution lithographique est définie selon le critère de Rayleigh.

$$\text{Résolution} : R = k_1 \cdot \frac{\lambda}{NA}$$

$$\text{Ouverture numérique} : NA = n \sin \mu$$

Avec :

- n : Indice du milieu entre la lentille et la plaque
- μ : La moitié de l'angle d'ouverture de la lentille
- λ : La longueur d'onde d'exposition
- k_1 : est le facteur expérimental, il dépend des conditions du procédé



Ainsi au fil des générations lithographiques, les longueurs d'onde utilisées pour l'insolation de la résine ont diminué afin d'améliorer la résolution.

b) La gravure des grilles et ses critères

Anisotropie

La gravure par plasma est par nature anisotrope. Cependant la composante de la gravure latérale des motifs due à l'aspect chimique de la gravure par plasma ou à l'action des ions arrivant en incidence rasante sur les flancs n'est pas négligeable et peut induire des distorsions sur les profils de gravure. Cette composante latérale de la gravure peut néanmoins être minimisée par la formation de couche de passivation. Cette passivation peut venir à la fois :

- de l'introduction intentionnelle d'espèces réactives dans le mélange gazeux afin de former une couche mince protectrice sur les flancs des structures gravées.
- du dépôt des espèces à fort coefficient de collage créées dans le plasma à partir des produits de gravure provenant du matériau à graver, du masque et des interactions avec les parois du réacteur.
- du dépôt des produits de gravure peu volatils provenant de la gravure du matériau.

A titre d'exemple, la formation d'un film de passivation lors de la gravure de silicium par une chimie $\text{HBr}/\text{Cl}_2/\text{O}_2$ a fait l'objet de nombreuses études^{13, 14, 15, 16}. La figure I-28 présente les mécanismes de formation de la couche de passivation dans le cas de gravure de grille polysilicium en $\text{HBr}/\text{Cl}_2/\text{O}_2$.

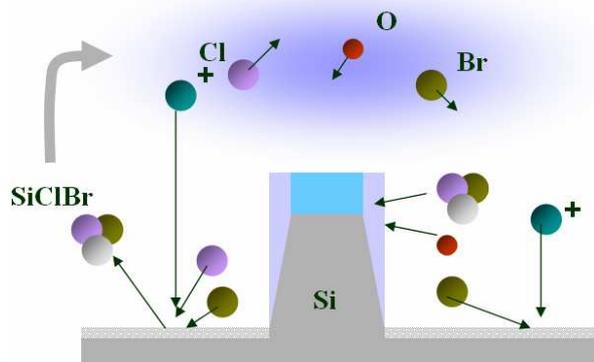


Figure I-28: Mécanismes de formation de la couche de passivation lors de la gravure de grille polysilicium par une chimie $\text{HBr}/\text{Cl}_2/\text{O}_2$.

Le Cl_2 , le HBr , et l' O_2 injectés dans le réacteur de gravure sont d'abord dissociés pour former des radicaux de chlore, de brome et d'oxygène. Les radicaux de chlore et de brome vont graver le silicium avec l'aide du bombardement ionique et forment des produits volatils de gravure SiCl_xBr_y qui sont relâchés dans le plasma. Une fraction de ces produits peut se déposer ensuite sur les parois des motifs où ils sont oxydés par l'oxygène, formant ainsi une couche de passivation non volatile de type $\text{SiO}_2\text{Cl}_x\text{Br}_y$. En jouant sur la concentration d'oxygène introduite dans la phase gazeuse, on peut ainsi jouer sur l'épaisseur et la composition chimique de la couche de passivation et ainsi obtenir des profils de gravure anisotropes.

Sélectivité

Le désavantage de la technique de gravure par plasma est qu'elle est moins sélective par rapport à une gravure purement chimique. La sélectivité d'un matériau est définie comme le rapport des vitesses de gravure entre le matériau à graver et le masque

utilisé pour définir le motif à transférer ou la couche d'arrêt. Une bonne sélectivité est définie comme très supérieure à 1.

Sélectivité : $S = \frac{V(\text{Matériau à graver})}{V(\text{Masque})}$ avec V la vitesse de gravure

L'ajout de gaz chimiquement actif peut modifier les procédés de gravure, notamment les vitesses de gravure et la sélectivité entre différents matériaux. Par exemple, le fait d'ajouter du dihydrogène H_2 dans un plasma CF_4 induit la formation de HF, et donc une déplétion en fluor atomique, qui va se traduire par la diminution de la vitesse de gravure du silicium (cf. figure I-29 a)). L'ajout de dioxygène O_2 va avoir l'effet inverse, car il va se former du CO, augmentant ainsi le fluor atomique disponible pour graver le silicium (cf. figure I-29 b)).¹⁷

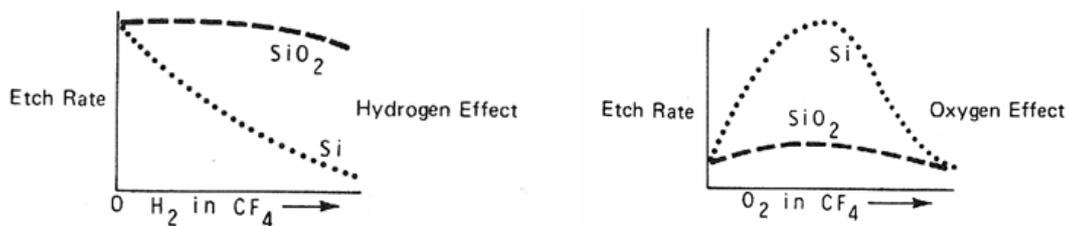


Figure I-29: Effet du a) H_2 et b) O_2 dans un plasma CF_4 sur la sélectivité Si/SiO₂

Contrôle dimensionnel

Traditionnellement la dimension nominale (dimension initialement envisagée, nommée CD) est fixée par l'étape de lithographie. L'objectif de la gravure est donc de transférer aussi fidèlement possible cette dimension. L'écart par rapport à la dimension nominale est appelé CD_{bias} ($CD_{\text{Gravure}} - CD_{\text{Litho}}$), comme le montre la figure I-30.

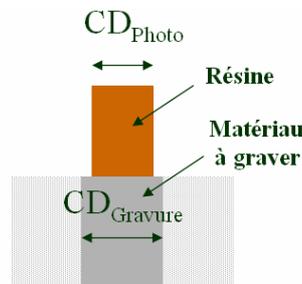


Figure I-30: Définition du CD_{Bias} .

Le contrôle dimensionnel étant au centre de cette thèse, il est plus largement décrit dans le paragraphe I.3.2.

L'uniformité

a) Uniformité microscopique

Deux types d'effets peuvent poser des problèmes d'uniformité selon la taille et la densité des structures :

L'« ARDE »¹⁸ (Aspect Ratio Dependent Etching) correspond à la dépendance de la vitesse de gravure en fonction du facteur d'aspect de la structure à graver. Ce phénomène est fortement corrélé à l'angle solide de collection des neutres. Il se traduit par une vitesse de gravure plus faible pour les structures ayant un facteur d'aspect plus élevé.

Il est important de noter qu'il existe des cas d'ARDE inverse. Dans ce cas les zones ouvertes se gravent plus lentement que les zones avec motifs du à un plus fort taux de passivation (cas de la gravure oxyde)

L'effet de « microloading »¹⁹ désigne la dépendance locale de la vitesse de gravure en fonction de la densité des structures à graver. Ainsi, les structures denses sont gravées moins rapidement que les structures isolées, même si elles présentent les mêmes dimensions.

Ces deux effets sont représentés dans la figure I-31.

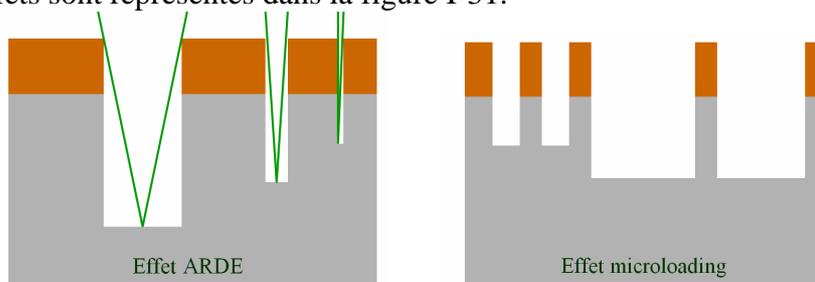


Figure I-31: Illustration du phénomène d'ARDE et de microloading

b) L'effet du taux d'ouverture ou « macroloading »

L'effet de « macroloading », caractérise la dépendance de la vitesse de gravure moyenne avec le taux d'ouverture (surface du matériau à graver non masquée par la lithographie par rapport à la surface totale de la plaque) sur l'ensemble de la plaque. Les vitesses tendent à diminuer avec l'augmentation du taux d'ouverture. Cet effet peut être minimisé en travaillant à flux de gaz élevé dans le réacteur afin que la vitesse de gravure ne soit pas limitée par l'apport de radicaux ou l'évacuation des produits de gravure. Cependant, le procédé de gravure doit généralement être optimisé en fonction du taux d'ouverture imposé par la lithographie.

La rugosité

Avec la course à la miniaturisation des systèmes microélectroniques, la rugosité de bord de ligne (LER : Line Edge Roughness) ainsi que la rugosité de largeur de ligne (LWR : Line Width Roughness) des grilles de transistors vont devenir des paramètres critiques à contrôler car ils peuvent engendrer des fluctuations sur les performances du transistor²⁰. Le LWR est définie comme 3 fois l'écart type sigma de la dimension du motif (CD), le LER comme l'écart type 3sigma de la déviation du flanc de grille par rapport à une ligne de base (x) (cf. figure I-32), elles sont écrites :

$$LWR = 3\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (CD_i - \overline{CD})^2}{n}} \quad \text{et} \quad LER = 3\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \overline{x})^2}{n}}$$

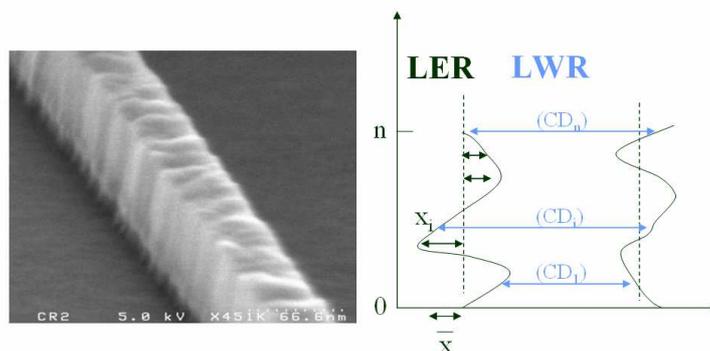


Figure I-32: Schéma du rugosité de ligne LER et LWR.

De multiples études ont été entreprises sur le sujet. Dépendante des caractéristiques intrinsèques de la résine utilisée, elle est transférée lors de la gravure²¹, mais peut être minimisée par des traitements plasma lors de la gravure de la grille, notamment par un traitement plasma HBr²².

Reproductibilité du procédé

Les espèces du plasma (provenant de la gravure du substrat ou des gaz injectés) diffusent et peuvent interagir avec les parois du réacteur avant d'être pompé hors de la chambre de gravure. Nous verrons dans la section III.3 qu'une des conséquences de cette interaction est la formation quasi-systématique d'un dépôt sur les parois du réacteur pendant les procédés de gravure par plasma. Par conséquent, l'état de surface des parois du réacteur évolue dans le temps, modifiant la physico-chimie du plasma notamment par l'intermédiaire des coefficients de recombinaison des espèces. Dans ces conditions, la reproductibilité des procédés de gravure plasma d'un substrat au suivant ne peut être garantie. Nous verrons dans la section III.3 que des stratégies de conditionnement ont été mises en place pour assurer la reproductibilité des procédés de gravure.

I.3 Les challenges de la gravure grille pour le nœud technologique 45nm et au delà

I.3.1 Réduction en dimension "more Moore law"²³

Comme l'a récemment indiqué le PDG d'Intel, Paul Otellini, lors de la présentation d'un prototype de circuit intégrant près de 3 milliards de transistors en technologie 22 nm, « la loi de Moore se porte bien ! »²⁴. Avec la réduction de la taille des transistors en logique CMOS, la feuille de route de l'ITRS prévoit une limite à cette réduction dans les années 2020-2030 avec une longueur de grille atteignant 5nm²⁵. Mais avant cela, 6 générations de transistors auront vu le jour.

Par le passé, la miniaturisation des transistors s'est toujours accompagnée d'avancées technologiques. Jusqu'à la fin des années 2000, la réduction des dimensions des grilles était réalisée entièrement par lithographie, les nouvelles générations de scanner proposent une diminution de la longueur d'onde λ de la source UV. Avec le passage d'une source 248nm à 193nm (permettant de réduire la résolution des motifs de 150nm à 90nm) la possibilité de jouer sur la longueur d'onde d'exposition de la résine s'approchait de sa limite. En complément, des moyens annexes (cf figure I-33) sont donc mis en place afin de produire les exigences dimensionnelles des nouveaux nœuds technologiques, tel que l'introduction de la CMP STI ou l'introduction de masque dur dans l'empilement de gravure ...

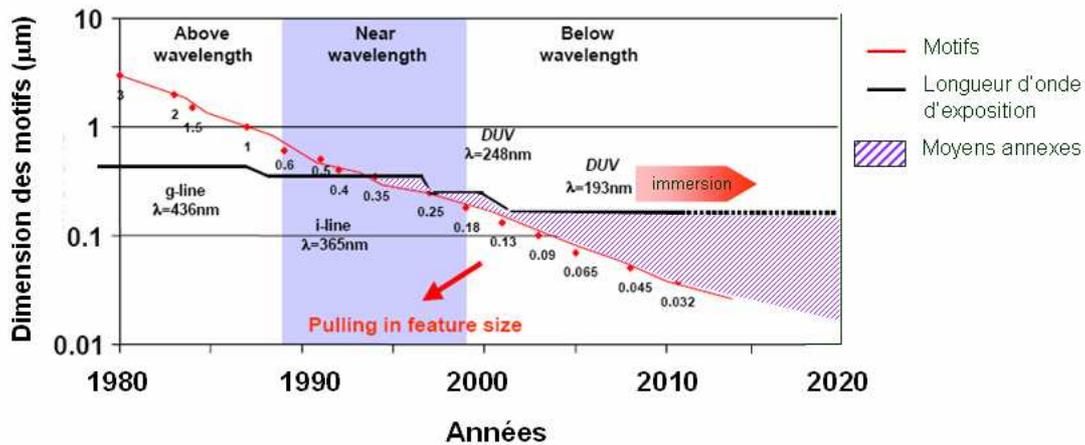


Figure I-33: Evolution de la technologie d'exposition lithographique en fonction des exigences dimensionnelles des motifs.

Un de ces moyens annexes, le « resist trimming »^{26,27} ou en français étape de réduction de cote résine, a été mis en place lors de la gravure grille pour produire les nœuds technologiques inférieurs à 90nm. Elle consiste à éroder latéralement et verticalement les motifs de résine afin de réduire les dimensions des motifs (cf. figure I-34). Cette étape supplémentaire lors de la gravure grille se fait en chimie à base d'oxygène.

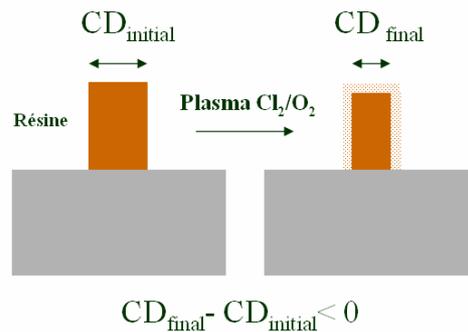


Figure I-34: Représentation schématique de la réduction de cote résine par un plasma de Cl_2/O_2 .

Le « resist trimming » présente un double intérêt, il a contribué d'une part à augmenter la fenêtre de procédé en photolithographie et d'autre part son ajout a permis un meilleur contrôle dimensionnel des motifs.

La production des nouveaux nœuds technologiques 45nm et en deçà n'échappe pas à ce besoin de trouver de nouvelles stratégies car même si le « resist trimming » permet d'atteindre des motifs de dimensions très faibles, le problème de l'intégration (intervalle entre les motifs) reste entier.

Ainsi des changements majeurs ont vu le jour sur les équipements, notamment en 2004 lorsqu'ASML (leader mondial en photolithographie) propose son premier scanner à immersion²⁸. Il permet en ajoutant un liquide entre la dernière lentille de projection et la résine, d'atteindre des ouvertures numériques (NA) supérieures à 1 et donc d'améliorer la résolution. La figure I-35 illustre cette amélioration.

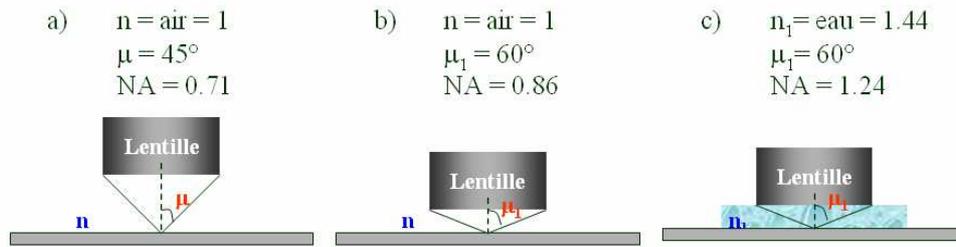


Figure I-35: Représentation de la technique immersion.

Le procédé de fabrication est lui aussi adapté afin d'atteindre les exigences fixées par l'ITRS. La double exposition avec deux photolithographies et deux gravures pour définir les motifs SRAM, est une ces nouvelles techniques^{29,30}. Cette stratégie a été choisie par STMicroelectronics dès la technologie 45nm. Elle consiste à graver en deux fois les grilles des transistors CMOS composant la SRAM. Après une première lithographie venant définir les lignes dans une résine photosensible selon une direction y, une première gravure, appelée gravure HM (« Hard mask ») va transférer ces motifs dans un matériau dit masque dur, comme nous le montre la figure I-36.

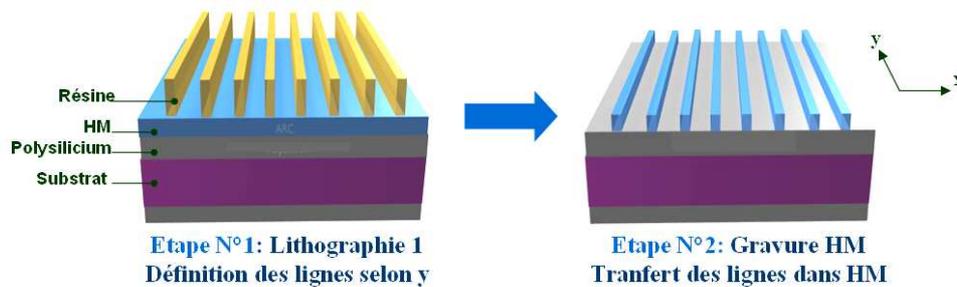


Figure I-36: Schéma représentant la gravure du masque dur.

Puis une seconde lithographie est faite afin de définir des trous dans une seconde résine. Ces trous vont permettre de couper les lignes HM par gravure plasma, dans la direction x. Enfin le motif final des SRAM, ainsi défini dans le masque dur, va être transféré dans le polysilicium. Ces deux gravures se font en une seule et même étape appelée gravure grille, comme illustré dans la figure I-37.

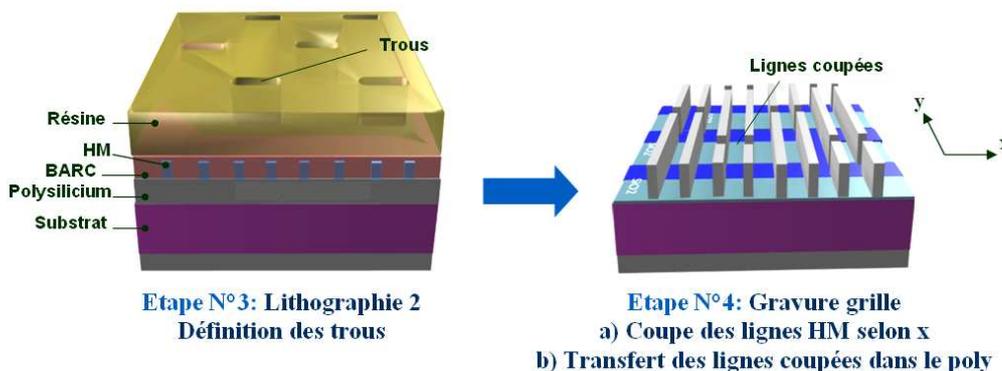


Figure I-37: Schéma représentant la gravure de la grille.

Cette double exposition a pour conséquence de façonner les bouts de grille des SRAM carrés et non ronds comme c'est le cas avec une stratégie simple exposition (utilisée

jusqu'alors). L'avantage majeur de cette technique est que l'intervalle entre les extrémités des grilles est parfaitement maîtrisé. De plus n'étant plus lié à la dimension critique des grilles, le contrôle de l'alignement du bout de ligne avec les zones actives n'est plus un facteur limitant pour le développement du procédé de gravure grille. La figure I-38 représente deux photographies SEM de cellule SRAM vue de dessus, avec à gauche une stratégie par simple exposition et à droite par double exposition.

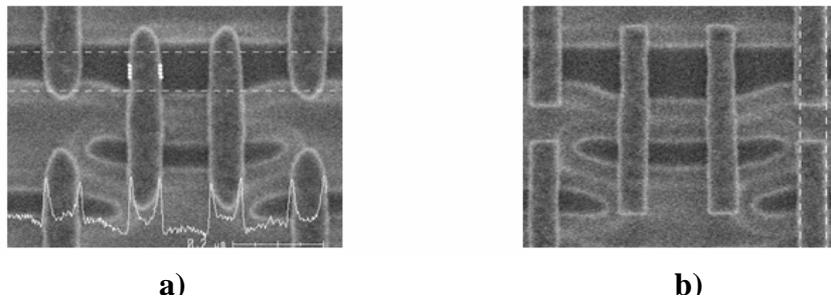


Figure I-38: Photographie par SEM d'une SRAM gravée en a) « simple exposition » et b) « Double exposition »

D'autres grands changements, notamment l'intégration de nouveaux matériaux seront nécessaires pour la production des nœuds technologies à partir du 32nm, ceci afin de limiter les effets parasites liés à la miniaturisation. L'effet de canal court, l'effet de drain, le courant de fuite à travers l'oxyde de grille et la déplétion de grille sont les principaux effets qui vont détériorer le fonctionnement du transistor (cf. annexe).

De part leur constante diélectrique plus élevée, les matériaux à forte permittivité, comme le HfO_2 (High k) permettent d'obtenir une capacité de grille C_{ox} équivalente à celle d'un oxyde de silicium SiO_2 pour une épaisseur plus importante, limitant ainsi les effets de canaux courts et les courants de fuite à travers le diélectrique³¹. L'autre grand intérêt est porté sur les grilles métalliques, car elles présentent des caractéristiques intrinsèques de plus en plus recherchées pour les transistors MOS. De par sa nature la grille métallique permet de s'affranchir des effets de déplétion de grille et de pénétration du bore. Dans l'optique de l'intégration du high-k, la grille métallique apporte également des avantages : les premières études sur le ZrO_2 et le HfO_2 ont démontré une certaine capacité du polysilicium à réagir avec ces diélectriques, engendrant une dégradation des caractéristiques électriques, contrairement aux intégrations réalisées avec un métal tel que le TiN. Au-delà de ces avantages, les métaux présentent une résistivité moins élevée que celle du silicium dopé, réduisant ainsi la constante de temps des lignes de grilles (propriété recherchée dans le domaine des radio-fréquences).

Ces derniers changements ne seront pas abordés lors de cette thèse qui est centrée sur la technologie 45nm utilisant un empilement polysilicium classique, mais on pourra se référer aux thèses d'E. Sungauer³² et T. Morel³³ pour plus d'informations.

I.3.2 Contrôle dimensionnel

De plus en plus d'industries applicatives mettent l'accent sur la qualité des puces à produire, mais à l'échelle nanométrique la moindre variation de procédé peut engendrer de fortes fluctuations de performance des systèmes mais aussi et c'est plus grave une défaillance de la puce.

Le contrôle de la dispersion des paramètres électriques est essentiellement corrélé au contrôle de la variation de la longueur du transistor L , sa largeur W , la capacité

d'oxyde C_{ox} , la longueur des zones actives, la taille des espaceurs, la hauteur de marche du STI (Step-Height en anglais) et enfin la température de recuit T_{recuit} . Chacun de ces paramètres est lié à une ou plusieurs mesures physiques effectuées lors du procédé de fabrication des transistors :

- La variation de la longueur du transistor L est directement liée à la dispersion de la dimension critique de la grille après gravure (CD_{grille}).

- La variation de la largeur du transistor W est, elle, directement liée à la dispersion de la dimension critique de sa zone active après gravure (CD_{active}).

- En ce qui concerne la variation de la capacité d'oxyde (C_{ox}), celle-ci s'explique par la dispersion de l'épaisseur physique de la couche d'oxyde de grille (T_{ox}) ainsi que par la dispersion de la concentration d'azote (N_2Dose) incorporée lors de la croissance de cet oxyde.

- Les doses de dopants et énergies d'implantation utilisées pour la mise en œuvre des caissons, jonctions/extensions S/D et poches sont généralement très bien contrôlées. Par contre l'activation de ces dopants dans le substrat dépend essentiellement des températures de recuits effectuées. Le contrôle de la variation de température de recuit pour la source et le drain (T_{recuit_SD}) devient un levier intéressant pour le contrôle de la dispersion des paramètres électriques.

- Le Step-Height (SH) est un autre paramètre technologique, susceptible d'expliquer en partie la dispersion de la tension de seuil V_{th} . En effet, la variation de ce paramètre donnera plus ou moins d'importance à l'effet de coin des Zones Actives en bord d'isolement STI (Shallow Trench Isolation). Le contrôle de sa variation passe par le contrôle de la profondeur des tranchées STI, de l'épaisseur d'oxyde STI après remplissage, polissage mécano chimique CMP et gravure.

- Enfin, la variation de la dimension critique des espaceurs après gravure ($CD_{espaceur}$), générant des différences de position des implantations source et drain, peut également contribuer à la dispersion du courant de saturation I_{on} . Sa maîtrise passe par le contrôle de la dimension critique de la grille après gravure, de l'épaisseur de nitrure déposé mais également par le contrôle de la technique de gravure utilisée.

L'ensemble des paramètres physiques est représenté dans la figure I-39.

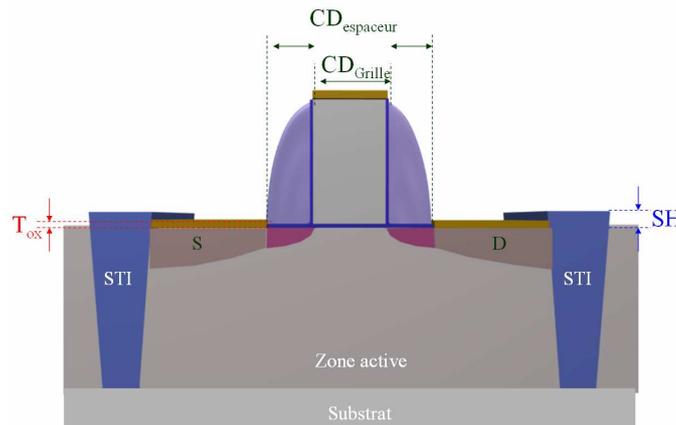


Figure I-39: Paramètres susceptibles d'engendrer des variabilités électriques

L'analyse présentée dans la figure I-40 est une analyse PLS (Partial Least Square) du paramètre I_{on} d'un transistor p-MOS LP pour la technologie 45nm. La régression PLS a été proposée par Svante Wold & al., et permet d'effectuer une analyse en composantes principales avec des données manquantes, sans avoir à les estimer. Grâce au logiciel « SIMCA P », l'analyse peut être présentée sous forme de

diagramme de Pareto. L'axe des ordonnées représente l'influence des paramètres sur les réponses (l'échelle est arbitraire). Chacun de ces paramètres est classé par ordre d'influence sur les réponses : une valeur importante signifie une forte contribution de la variabilité du paramètre sur les variations des réponses. Un paramètre est considéré comme significativement influent si la valeur de sa contribution est supérieure à 1.

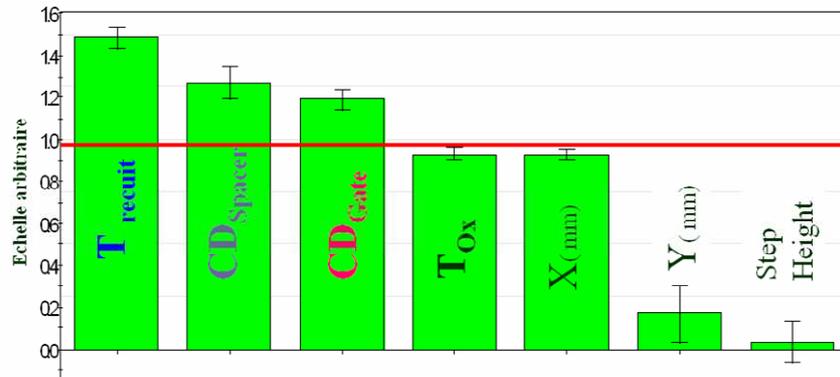


Figure I-40: Influence de la température de recuit des implantations (T_{recuit}), de la dimension des espaceurs (CD_{Espaceur}), de la grille (CD_{Grille}), de la hauteur de marche du STI (SH), de l'épaisseur d'oxyde (T_{Ox}), et de la position du transistor sur la plaque (X ;Y) sur le paramètre électrique I_{on} d'un transistor p-MOS.

Les contributeurs principaux de la variabilité du paramètre I_{on} d'un transistor p-MOS (ou n-Mos) pour la technologie 45nm sont la température de recuit, la dimension des espaceurs et la dimension de la grille. D'où la nécessité de contrôler ces paramètres de façon très précise.

Ainsi l'ITRS fixe pour chaque nœud technologique les performances électriques et les coûts des systèmes électroniques ainsi que les dimensions requises et le contrôle de celles-ci (3 sigma). Le tableau I-3 est un extrait de l'ITRS 2008 présentant les dimensions requises pour la grille ainsi que le contrôle dimensionnel préconisé.

<i>Année de Production</i>	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
<i>DRAM 1/2 pas (nm)</i>	68	59	52	45	40	36	32
<i>Contrôle CD de grille (3 sigma) (nm)</i>	3.9	3.3	3.0	2.8	2.5	2.3	1.9

Tableau I-3: Spécification de l'ITRS 2008.

Pour le 45nm, le lancement en production est prévu pour 2010 avec une variation totale sur la dimension de la grille inférieure à 2.8nm.

Dans un environnement industriel ce contrôle dimensionnel inclut la variation intra puce, intra plaque, plaque à plaque et lot à lot^{34,35}.

- Variation Lot à lot : $3\sigma_{\text{Lot}}$

Elle correspond à 3 fois l'écart type (3σ) (pour définition cf. chapitre II) du CD_{Grille} , mesuré sur une même structure, d'un lot à un autre.



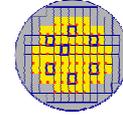
- Variation plaque à plaque : $3\sigma_{\text{Plaque}}$



Elle correspond à 3 fois l'écart type du CD_{Grille} , mesuré sur une même structure aux coordonnées (X ;Y), d'une plaque à une autre sur un même lot.

- Variation intraplaque : $3\sigma_{Intraplaque}$

Elle correspond à 3 fois l'écart type du CD_{Grille} , mesuré sur une même structure aux coordonnées (x,y), d'une puce à une autre sur une même plaque.



- Variation intrapuce : $3\sigma_{IntraPuce}$

Elle correspond à 3 fois l'écart type du CD_{Grille} mesuré sur une même structure, selon les coordonnées qu'elle occupe sur une même puce. Elle est principalement liée à la lithographie.



La détermination de ces différentes variations ne se font pas directement sur des structures DRAM ou SRAM, mais sur des structures d'intégration similaire donc des structures denses. La variation totale sur le CD_{Grille} est donc calculée de la façon suivante :

$$3\sigma_{CD}^{Total} = 3 \cdot \sqrt{(\sigma_{Lot})^2 + (\sigma_{Plaque})^2 + (\sigma_{InterPuce})^2 + (\sigma_{IntraPuce})^2}$$

I.3.3 Objectifs de la thèse

Dans ce contexte, les objectifs de cette thèse sont donc d'avoir une compréhension des mécanismes fondamentaux du procédé de gravure par une analyse approfondie entreprise en parallèle à STMicroelectronics et au Laboratoire des Technologies de la Microélectronique (LTM). Ceci, afin de proposer des solutions innovantes pour diminuer les variations du CD_{Grille} (3σ total) et atteindre les préconisations de l'ITRS visant un contrôle dimensionnel inférieur à 2.8nm pour le nœud technologique 45nm.

Au cours de cette thèse, nous nous sommes appuyés sur différents outils de caractérisation pour expliquer les mécanismes de gravure et contrôler les dimensions de la grille lors de la gravure. Ces techniques de caractérisation, ainsi que les réacteurs plasma utilisés pour définir les grilles sont décrites dans le chapitre II.

Dans le chapitre III, nous nous concentrerons sur l'étude du procédé de gravure réalisé en double exposition (« double patterning »). Dans un premier temps, une description complète du procédé de gravure grille sera faite. Puis le chapitre sera consacré à la compréhension fine des principaux mécanismes mis en jeu lors de la gravure du masque dur mais surtout lors de la gravure du polysilicium.

Le chapitre IV sera consacré aux études des interactions plasma/parois se produisant dans le cas du procédé de grille du nœud technologique 45nm. Des études menées en parallèle dans le réacteur industriel de STMicroelectronics et celui du LTM seront à la base de ces analyses.

Enfin le chapitre V sera, lui, consacré à l'étude des sources de variabilités faites sur le procédé grille 45nm. Grâce à la compréhension du procédé de gravure grille faite au préalable, des actions correctives ont pu être apportées afin d'améliorer l'uniformité 3 sigma total, elles seront décrites lors de ce chapitre. Le développement d'une boucle de régulation utilisant plusieurs paramètres de la gravure polysilicium en est l'exemple le plus probant, et conclura ce rapport de thèse.

Chapitre II : Dispositifs expérimentaux

II.1 Les plateformes de gravure

Au cours de cette thèse, deux réacteurs de gravure, appartenant à STMicroelectronics et au laboratoire du LTM, ont été utilisés :

- la plateforme 300mm Kiy45 LAM Research de STMicroelectronics, dédiée à l'optimisation et la caractérisation du procédé de gravure grille du nœud technologique 45nm

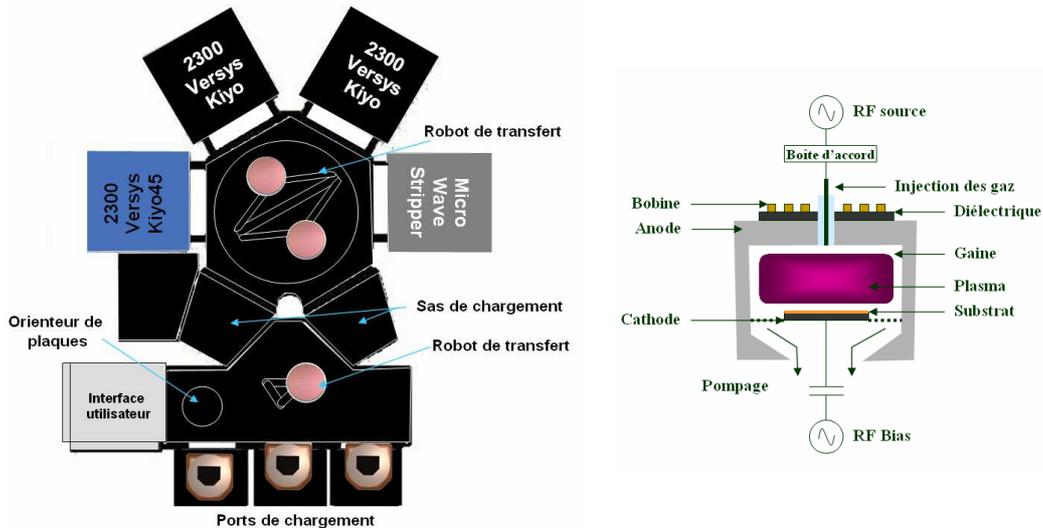
- la plateforme Centura 300mm Applied Materials du LTM, adaptée pour accueillir un outil de diagnostics XPS in situ, a servi à la compréhension des mécanismes impliqués lors de ce procédé de gravure.

II.1.1 La plateforme de gravure 300mm LAM Kiy45

La plateforme LAM Kiy45 est une plateforme de gravure industrielle 300mm qui est constituée de:

- 3 ports de chargement permettant le chargement et le déchargement des plaques 300mm de silicium dans un mini environnement salle blanche.
- un bras robotisé permettant le transport des plaques des ports de chargement jusqu'à la chambre de gravure.
- un orienteur de plaque équipé d'un laser permettant le repérage de l'encoche des plaques de silicium, et donc l'introduction avec la même orientation dans la chambre de gravure.
- 2 sas de chargement : les plaques y sont introduites avant d'entrer dans la chambre de transfert. C'est dans ces sas de chargement que les plaques passent de la pression atmosphérique à un vide primaire de l'ordre de 50mTorr.
- une chambre de transfert dans laquelle séjourne brièvement la plaque avant qu'elle ne soit introduite dans la chambre de gravure.
- 4 chambres de gravure : trois chambres à couplage inductif dont la Kiy45 et une chambre micro-onde.

La figure II-1 nous donne les représentations schématiques de la plateforme de gravure LAM et du réacteur de gravure Kiy45.



FigureII-1: Représentation schématique a) de la plateforme de gravure 300mm LAM et b) du réacteur de gravure Kiyos45.

La Kiyos45 est un réacteur de gravure à couplage inductif ICP. Ce réacteur a été dédié à la gravure du silicium dans les étapes Front End (Grille, STI). Les parois de la chambre, exposées au plasma, sont recouvertes d'une couche d'oxyde d'yttrium Y_2O_3 . Le plasma y est créé grâce à une antenne circulaire positionnée sur une fenêtre plate en quartz et alimentée par un générateur RF à 13.56MHz pouvant délivrer une puissance source de 0 à 1500W. Le courant RF circulant dans l'antenne induit un champ magnétique à l'intérieur de la chambre dans laquelle sont injectés les gaz de gravure. Les oscillations de ce champ magnétique induisent un champ électrique oscillant accélérant les électrons (voir chapitre I). Le couple plasma/antenne se comporte donc comme un transformateur (Source TCP, T pour transformer), le primaire étant représenté par l'antenne et le secondaire par la boucle du courant RF induite dans le plasma. Les électrons sont accélérés par le champ électrique dans une direction parallèle aux parois du réacteur et doivent parcourir une distance importante avant d'être perdus sur une paroi, ce qui permet d'entretenir le plasma à basse pression (jusqu'à 1 mTorr) et haute densité (typiquement de 10^{11} à 10^{12} ions.cm⁻³)^{36,37,38}.

La puissance source injectée dans l'antenne va permettre de contrôler la densité des ions. Le substrat est posé sur une électrode (cathode) couplée capacitivement à un deuxième générateur RF également à 13.56MHz. Grâce à des systèmes d'asservissement³⁹, il est possible d'appliquer une valeur constante de tension source (donc l'énergie des ions arrivant perpendiculairement sur le substrat) en faisant varier la puissance injectée pour des valeurs de puissance de polarisation différentes, comme le montre la figure II-2.

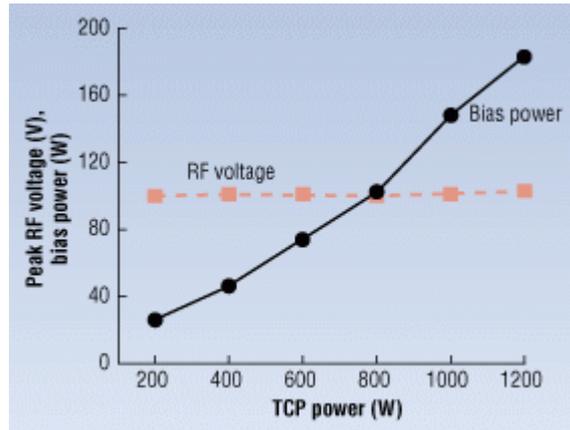


Figure II-2: Maintien de la tension de source « RF Voltage » à 100V grâce à une boucle d'asservissement lors de la variation de la puissance de polarisation « Bias Power ».

La plaque est maintenue sur la cathode grâce à un porte substrat à maintien électrostatique (ou ESC, « ElectroStatic Chuck »). La particularité de ce porte substrat est qu'il possède une double zone de contrôle en température (centre/bord) dont la gamme peut varier de 40°C à 80°C. L'uniformité de gravure peut ainsi être améliorée en changeant les consignes de température de manière indépendante en centre et bord de plaque. Le contrôle en température est également assuré par la circulation d'un liquide à température contrôlée dans le porte substrat. Le transfert thermique entre le porte substrat et l'échantillon est assuré par un flux d'hélium dont la pression est ajustable.

L'autre particularité permettant également d'améliorer l'uniformité de gravure est la double injection des gaz. Au total quatre configurations sont possibles, elles sont présentées dans la figure II-3.

Mode	Bord	Centre
Center	0%	100%
Less center	25%	75%
Equal	50%	50%
Edge	75%	25%

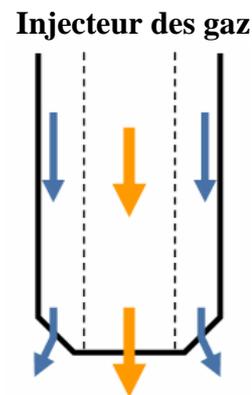


Figure II-3: Configurations et schéma des possibilités d'injections des gaz.

Le réacteur Kiyō45 possède 16 lignes de gaz, dont les flux sont contrôlés, lors de l'injection, par des débitmètres massiques. Les débits des gaz sont exprimés en sccm (Standard Cubic Centimeter per Minute), soit des $\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ dans les conditions normales de température et de pression (à 273K et à 1bar). Les gaz disponibles sont le SiCl_4 , C_4F_8 , NF_3 , CH_3F , CO , HBr (1000 sccm), CH_2F_2 , HBr (100 sccm), Cl_2 , O_2 (20sccm), O_2 (200 sccm), He , SF_6 , N_2 , CHF_3 , CF_4 .

Le vide dans le réacteur est assuré par l'association d'une pompe primaire et d'une pompe turbo-moléculaire ($2700 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$). Ces pompes, associées à un système de vanne motorisée permettent de réguler la pression jusqu'à 400 mTorr.

II.1.2 La plateforme de gravure 300mm d'Applied Materials Centura 300

La Centura 300 est une plateforme de gravure industrielle 300mm qui est constituée de:

- un port de chargement permettant le chargement et le déchargement des plaques 300mm de silicium dans un mini environnement salle blanche.
- un bras robotisé permettant le transport des plaques des ports de chargement jusqu'à la chambre de gravure.
- un orienteur de plaque équipé d'un laser permettant le repérage de l'encoche des plaques de silicium, et donc l'introduction dans la chambre de gravure avec la même orientation.
- 2 sas de chargements : les plaques y sont introduites avant d'entrer dans la chambre de transfert.
- une chambre de transfert constituée d'un bras robotisé permettant le transfert des plaques.
- 2 chambres de gravure, de génération DPS II. Une des chambres a été supprimée afin de connecter la plateforme à un spectromètre de photoélectron X (X-Ray Photoelectron Scanning) 300mm par l'intermédiaire d'une chambre de transfert.

La figure II-4 nous donne la représentation schématique de la plateforme de gravure Centura300.

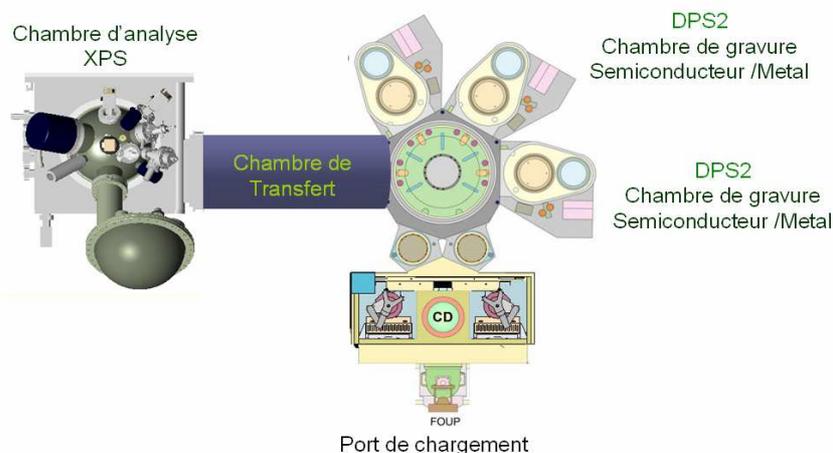


Figure II-4: Représentation schématique de la plateforme de gravure 300mm Centura300 d'Applied Materials.

La conception de la DPS ressemble en beaucoup de points à celle de la Kiyo45. On notera tout de même quelques différences. Les parois du réacteur sont en alumine. La puissance source est fournie au plasma grâce à deux antennes concentriques (on peut contrôler la répartition de la puissance entre les deux antennes). Deux arrivées d'hélium en face arrière sont prévues sur le porte substrat et l'injection des gaz se fait par le centre de la fenêtre diélectrique en Al_2O_3 . Les gaz disponibles sur ce réacteur sont : Cl_2 , BCl_3 , SF_6 , CHF_3 , C_4F_8 , O_2 , $He-O_2$, CF_4 , Ar , HBr , $SiCl_4$, avec des débits variables. On notera qu'il n'y a pas de CH_2F_2 et d'Hélium mais du CHF_3 et de l'argon dans les lignes de gaz. Il sera donc nécessaire lors des analyses faites au laboratoire

d'adapter le procédé de gravure afin d'obtenir des profils et dimensions de grille similaires à ceux obtenus dans la plateforme à ST-Crolles. Ces différences devront également être prises en considération dans l'interprétation des résultats.

II.2 Techniques de caractérisation in situ

II.2.1 Détection de fin d'attaque ou EPD (End Point Detection)

Compte tenu des critères très sévères de sélectivité des procédés de gravure, les réacteurs présentés dans le paragraphe précédent sont équipés d'un système de détection de fin d'attaque puissant. La détection de fin d'attaque permet de couper le plasma et donc d'arrêter la gravure soit à l'interface de deux matériaux, soit avant d'atteindre cette interface. Il existe deux types de détection de fin d'attaque, la détection par spectrométrie d'émission optique du plasma et la détection par réflectométrie, elles sont représentées dans la figure II-5.

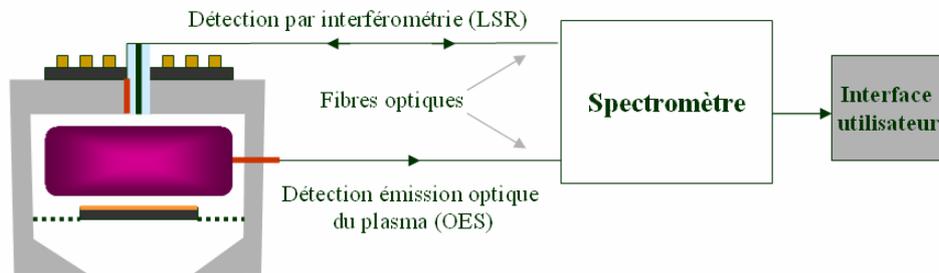


Figure II-5: Représentation schématique du dispositif de détection de fin d'attaque.

a) Détection par spectroscopie d'émission optique (OES « Optical Emission Spectroscopy)

Lors des interactions électrons/neutres dans un plasma, des molécules peuvent être excitées (électrons passant sur des couches électroniques supérieures) et émettre, lors du retour à leur état électronique initial, un rayonnement lumineux de longueur d'onde λ . Ces longueurs d'onde émises par le plasma dépendent des réactifs utilisés et des produits de gravure du matériau. L'intensité de ces longueurs d'onde est proportionnelle à la concentration de l'espèce considérée.

Ainsi on pourra arrêter une gravure aux interfaces c'est-à-dire lorsque la concentration des produits de gravure chute brutalement ou que celle des réactifs présents dans le plasma augmentent brutalement. La figure II-6 présente le suivi de la raie 484nm, correspondant à l'élément CO, lors de la gravure en plasma fluorocarboné du masque dur en SiO₂ déposé sur polysilicium. La fin d'attaque est clairement visible il y a une chute brutale de la raie CO.

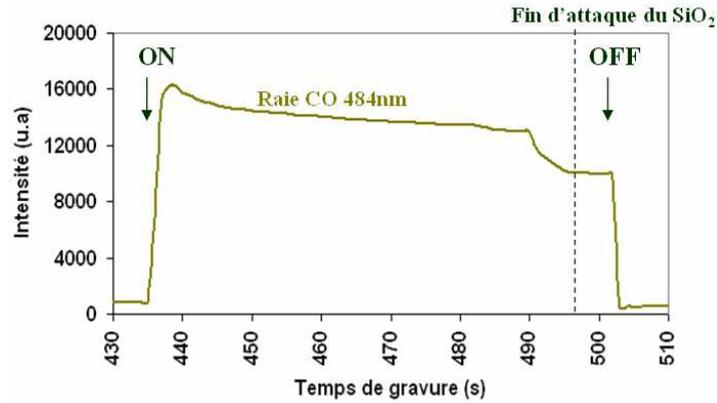


Figure II-6: Raie CO (484nm) issue de l'émission du plasma lors de la gravure du SiO₂ en chimie CF₄/CH₂F₂.

Concernant le dispositif (cf. figure II-5), la lumière émise par le plasma est collectée, via une fibre optique, puis passe par un réseau interne au spectromètre pour être diffractée. Après avoir été réfléchi par un système de miroirs, la lumière diffractée est détectée par une barrette CCD. Les pixels de la barrette CCD couvrent ainsi simultanément toute la gamme spectrale de 200 à 850nm avec une dispersion de 0.3nm par pixel et une résolution optique de 2nm.

b) Détection par réflectométrie (LSR « Light Signal Reflectometry »)

Cette détection consiste à envoyer une source lumineuse monochromatique sur la plaque à graver. La lumière va être réfléchi par les différentes couches présentes sur la plaque et des franges d'interférence vont se créer. Ces franges dépendent donc de la profondeur gravée. On pourra donc, par analyse des franges, connaître en temps réel l'épaisseur du matériau gravé et donc stopper la gravure quand cela sera nécessaire. Considérons l'empilement de deux matériaux A et B (cf. figure II-7), avec A le matériau à graver ayant un indice optique n et une épaisseur d , et B le matériau sous-jacent sur lequel la gravure doit être arrêtée. Si l'on envoie une lumière monochromatique en incidence normale sur cet empilement, la lumière va être réfléchi par la surface de A et l'interface entre A et B.

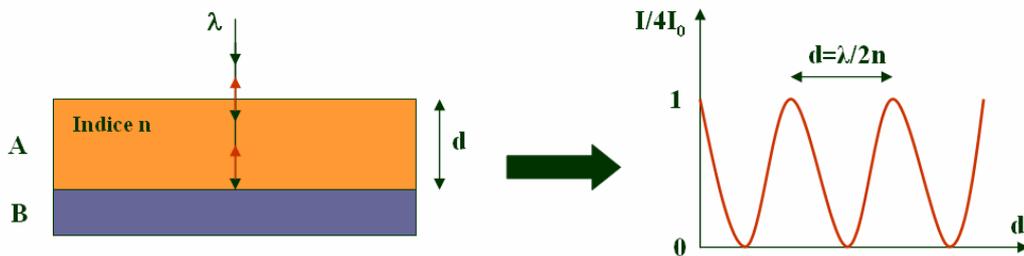


Figure II-7: Réflexion d'une onde lumineuse en incidence normale sur un empilement de 2 matériaux A et B.

La différence de phase entre les deux ondes réfléchies vaut :

Différence de phase : $\Delta\Phi = 2\pi d / \lambda$

Avec :

δ : différence de chemin optique entre les deux faisceaux réfléchis égale à $2nd$ car le faisceau réfléchi à l'interface parcourt deux fois la distance d (aller-retour) à travers le matériau A d'indice optique n).

λ : longueur d'onde de la source lumineuse

L'intensité lumineuse détectée et combinant les deux faisceaux réfléchis peut s'exprimer par :

$$\text{Intensité lumineuse : } I = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\Delta\Phi}{2}\right) = 4I_0 \cos^2\left(\frac{2\pi nd}{\lambda}\right)$$

Cette intensité lumineuse peut être tracée en fonction de l'épaisseur d du matériau A qui varie dans le temps au cours de la gravure comme représenté dans la figure II-7. La période de cette fonction est $d=\lambda/2n$, ce qui veut dire qu'à chaque arche de cette fonction, on a gravé une épaisseur du matériau A égale à $\lambda/2n$. Ainsi on pourra savoir à tout moment l'épaisseur de matériau gravé en comptant le nombre d'arches.

La figure II-8 présente le suivi de la gravure partielle du polysilicium de la grille épais de 80nm en C045. Dans le cas du procédé de gravure grille 45nm, une première fin d'attaque (ME1) est déclenchée lorsqu'environ 60nm de polysilicium sont gravés. Puis la seconde va se terminer lorsque les 20 derniers nanomètres seront gravés.

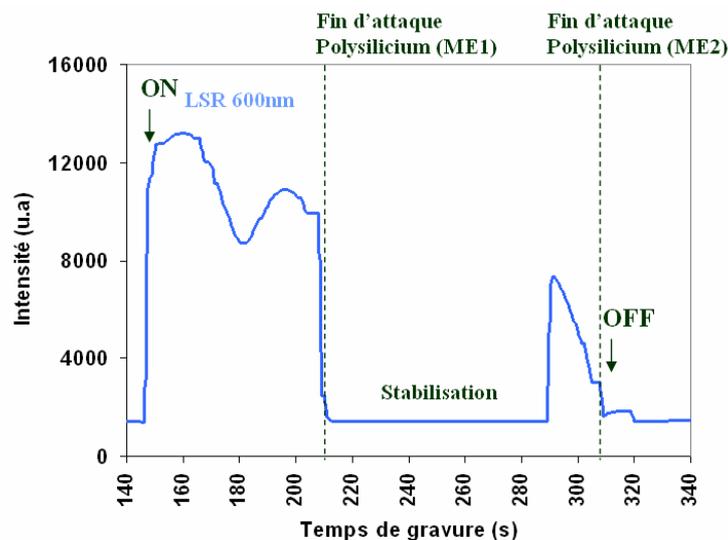


Figure II-8: Interférométrie à 600nm lors de la gravure de 80nm du polysilicium.

Ces détections de fin d'attaque peuvent se faire manuellement, mais il est également possible de générer des algorithmes permettant de stopper les gravures automatiquement et ainsi avoir une bonne reproductibilité de fin d'attaque entre les plaques gravées.

II.2.2 La spectroscopie de photoélectron X ou XPS⁴⁰

a) Principe

La spectroscopie de photoélectron X ou XPS (X-Ray Photoelectron Spectroscopy), est une méthode puissante d'analyse semi-quantitative de surface (environ 10nm de profondeur). Le matériau à analyser va être irradié de rayons X. Après absorption des

photons par l'atome, des électrons de cœur vont pouvoir être éjectés : c'est l'effet photoélectrique. Le principe de l'analyse XPS consiste à mesurer l'énergie cinétique des photoélectrons émis et pouvant s'échapper du matériau.

Grâce à la relation d'Einstein reliant l'énergie cinétique E_c du photoélectron collecté au détecteur avec l'énergie incidente connue du photon X, $h\nu$, on pourra connaître le travail de sortie de l'électron W , c'est-à-dire l'énergie de liaison à l'atome, et donc la nature chimique du matériau.

$$\text{Relation d'Einstein : } E_c = h\nu - W$$

avec h : constante de Planck ($6.626 \cdot 10^{-34}$ J.s ou $4.135 \cdot 10^{-15}$ eV.s)

ν : Fréquence du photon X incident

b) Analyse des spectres

L'analyse par XPS permet une analyse qualitative mais aussi semi-quantitative du matériau considéré. L'analyse qualitative peut se faire à faible résolution énergétique ($> 1\text{eV}$), et va permettre de connaître rapidement la composition générale de la surface du matériau. La figure II-9 présente l'exemple du spectre général d'un échantillon de polysilicium ayant été exposé à un plasma.

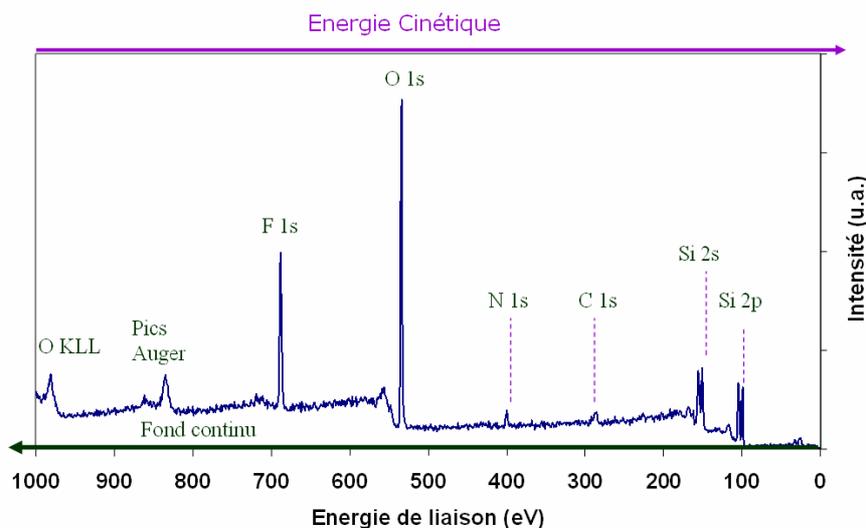


Figure II-9: Spectre général XPS à faible résolution d'un échantillon de polysilicium contaminé.

On représente de manière générale un spectre XPS avec l'énergie de liaison en abscisse (c'est-à-dire, $1486.6 \text{ eV} - E_c$ pour une source Al). Les photoélectrons émis peuvent subir des collisions inélastiques avec des couches électroniques externes durant le transport dans le matériau, contribuant ainsi au fond continu.

Les analyses semi quantitatives se font à haute résolution énergétique ($< 0.6\text{eV}$). La figure II-10 présente le spectre XPS du silicium Si2p provenant de la même analyse que le spectre à faible résolution.

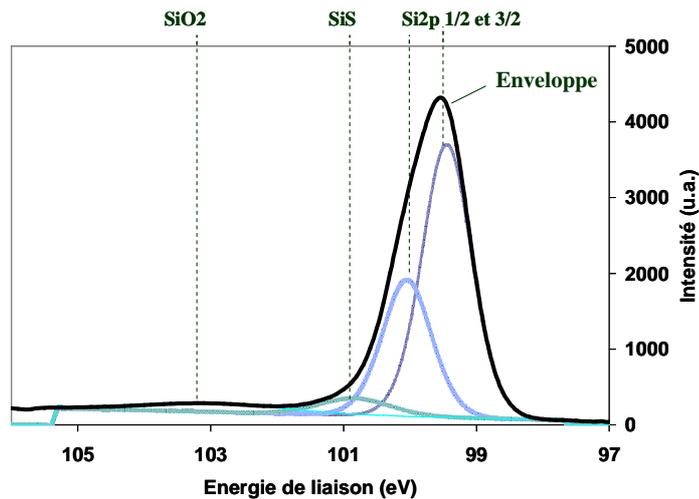


Figure II-10: Spectre XPS haute résolution du silicium Si2p.

Après soustraction du fond continu par la méthode semi-empirique de Shirley, chaque pic XPS peut être déconvolué en ses différentes composantes.

K. M. Siegbahn⁴¹, qui a reçu le prix Nobel de physique en 1981 pour sa contribution à la spectroscopie électronique haute résolution, a montré que le déplacement énergétique des niveaux de coeur était lié à l'effet de l'état initial de l'atome (déplacement chimique), à l'effet de l'état final (relaxation) et à l'effet de charge en surface du matériau. Ainsi, la variation de l'énergie de liaison d'un électron peut s'écrire :

$$\text{Variation de l'énergie de liaison: } \Delta E_b = -\Delta\varepsilon + \Delta E_R + eV_s$$

Avec E_b : Energie de liaison

$\Delta\varepsilon$: Déplacement chimique (Etat initial)

ΔE_R : Relaxation (Etat final)

e : Charge de l'électron

V_s : potentiel à la surface

Si l'on considère un matériau conducteur dont l'effet de charge en surface est quasi nul, la relaxation étant faible devant le déplacement chimique, la variation de l'énergie de liaison dépendra en grande partie de $\Delta\varepsilon$ et donc l'environnement de l'atome. La figure II-12 présente le spectre XPS C1s provenant de l'analyse d'un échantillon de silicium ayant été gravé par une chimie fluorocarbonée.

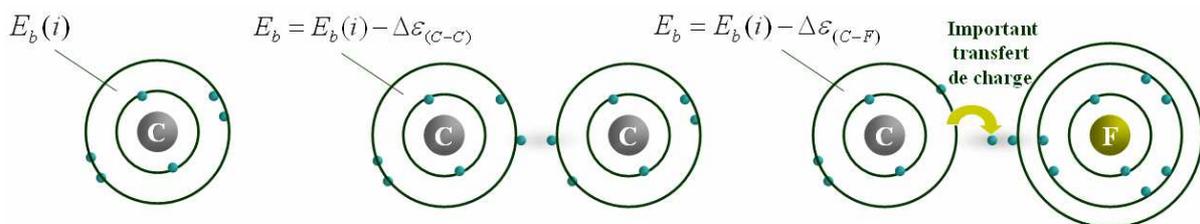


Figure II-11: Représentation de la variation de l'énergie de liaison E_b .

Selon l'électronégativité de l'élément lié à l'atome de carbone, le transfert de charge des électrons de valence sera plus ou moins important. Par exemple pour un carbone

lié à un atome de fluor, de part la forte électronégativité du fluor, l'électron mis en commun pour former la liaison va être fortement attiré par le fluor. Ainsi la charge perçue par les autres électrons de coeur du carbone va augmenter et l'énergie de liaison de ces électrons à l'atome également. Donc plus l'atome lié au carbone est électronégatif et plus les électrons provenant de l'atome de carbone ont une énergie de liaison forte.

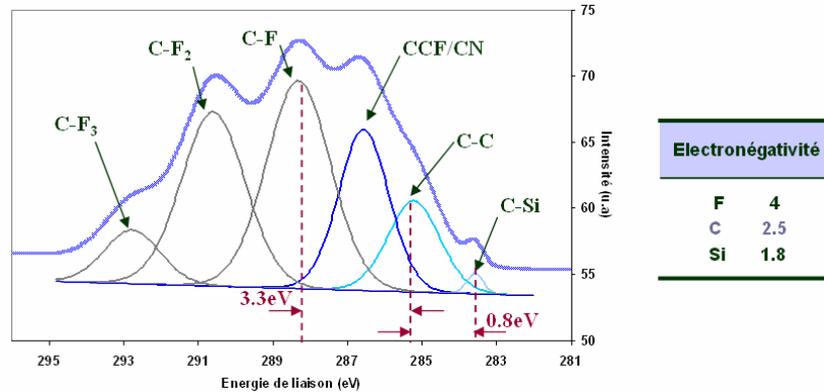


Figure II-12: Déplacement chimique dû à l'électronégativité.

Ainsi chaque déconvolution pourra être attribuée à un environnement caractéristique de l'élément considéré, et la concentration pourra être déduite de l'intensité du spectre par l'équation suivante :

$$I_A = n_A \cdot S$$

I_A étant l'intensité de la déconvolution de l'élément A, n_A étant sa concentration et S le facteur de Scofield s'écrivant :

$$S = (\phi \xi AT) (\sigma \lambda y)$$

Avec ϕ : flux de photons X

ξ : facteur d'efficacité angulaire de l'analyseur

A : aire concernée de l'échantillon

T : efficacité de détection

σ : section efficace de photoionisation

λ : libre parcours moyen

y : rendement de photoionisation

Il est possible toutefois de voir un décalage global en énergie des spectres, notamment à cause de la création d'un potentiel positif en surface, appelé V_s , suite à l'arrachage d'électrons, ralentissant ainsi les photoélectrons (cas des échantillons flottants discutés dans le chapitre III). Dans la pratique on va donc choisir un pic référence afin de recalibrer tout le spectre.

c) Dispositif expérimental

Le spectromètre XPS 300 mm est un Theta 300 modifié de la société Thermo-Fisher. Il accepte des plaques de 200 ou 300 mm qui peuvent être chargées soit par le transfert sous vide depuis la machine de gravure (plaques 300 mm uniquement), soit par un système de chargement indépendant (plaques 200 ou 300 mm) de la société Adixen. Le grand avantage de cet analyseur est qu'il est directement connecté à la Plateforme 300mm par une chambre de transfert sous vide, comme nous le montre la

figure II-4. Ainsi les échantillons pourront être analysés directement après la gravure sans remise à l'air. Ce spectromètre dispose d'une source mono-chromatique de type $AlK\alpha$, d'un canon à électrons (FEG02), ainsi que d'un canon ionique. Cet équipement possède la particularité de pouvoir collecter les électrons sur une large gamme d'angles (de 20° à 80° par rapport à la normale à la surface) tout en conservant l'information angulaire de chaque électron collecté, voir figure II-13. Les photoélectrons sont ensuite dirigés sur un détecteur à deux dimensions x et y qui permet de discriminer les photoélectrons selon leur énergie en x (128 canaux) et leur angle de collection en y (96 canaux). Il est donc possible d'effectuer des acquisitions en plusieurs angles d'analyse. Par exemple, pour une analyse en 12 angles, les 60° de collection sont divisés en 12 secteurs qui collecteront chacun les photoélectrons sur un secteur angulaire de 5° .

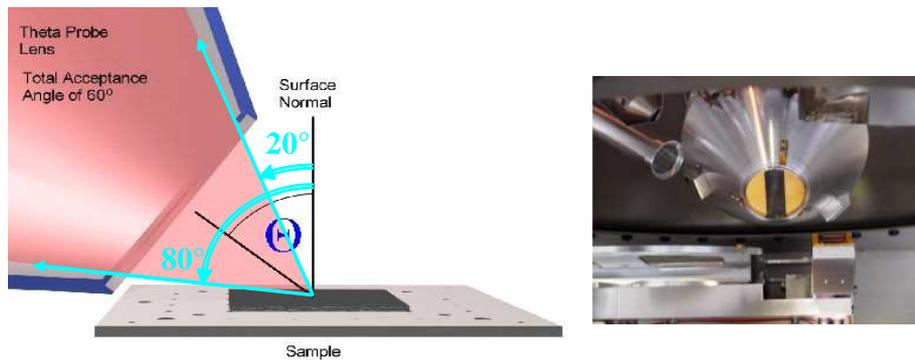


Figure II-13: Représentation et photographie de l'analyseur angulaire du Théta 300.

Les électrons émis étant atténués lors de leur passage dans le matériau selon la loi de Beer-Lambert, il sera donc possible de corrélérer l'analyse angulaire avec la profondeur sondée.

$$\text{Loi de Beer-Lambert : } I = I_0 e^{\left(\frac{-z}{\lambda \cos \theta}\right)}$$

Avec I : intensité détectée

I_0 : l'intensité totale

z : profondeur de l'élément détecté

θ : angle de collection

λ : libre parcours moyen inélastique des photoélectrons.

Ainsi, plus l'angle de collection augmente (par rapport à la normale à la surface) et plus l'analyse XPS se fait en surface. Inversement plus l'angle est petit et plus la couche analysée sera profonde, comme nous le montre l'exemple donné dans la figure II-14. Il s'agit de l'analyse angulaire d'un oxyde mince (type oxyde de grille) sur du silicium. Si l'on diminue l'angle de collection, on voit apparaître le pic Si2p à $99,3\text{eV}$ caractéristique des liaisons Si-Si du silicium sous jacent.

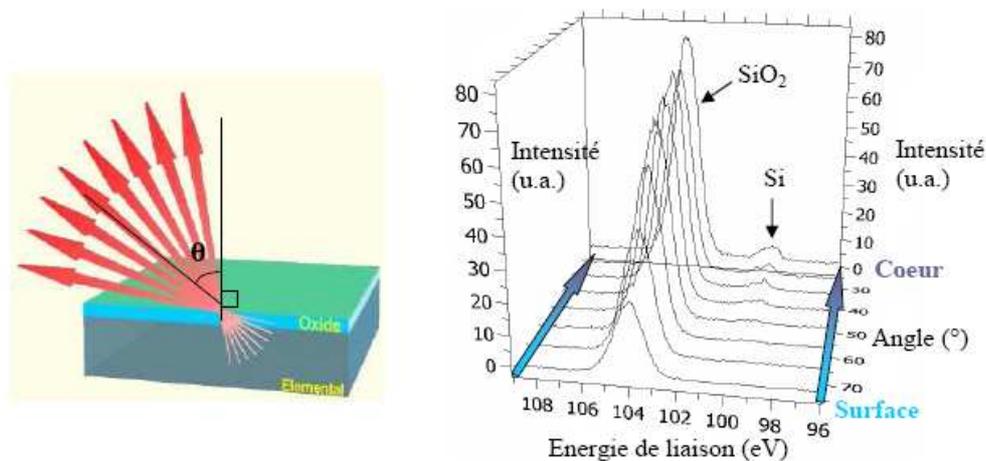


Figure II-14: Analyses XPS angulaires d'un échantillon de SiO₂ sur silicium.

Cet équipement possède également un canon à électron. L'intérêt du canon à électron est de pouvoir compenser les charges positives qui peuvent se former en surface du matériau.

d) Analyse topographique chimique

La technique XPS standard nous permet d'analyser la composition chimique de surfaces planes et uniformes. Mais l'un des objectifs de cette thèse était de pouvoir caractériser les modifications apparues sur les motifs afin de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu lors de la gravure. La technique d'analyse topographique chimique a donc été mise au point dans ce but.

Le faisceau de la source monochromatique est focalisé sur des réseaux de lignes de grandes dimensions (3mm x 3mm). Ces lignes sont ensuite placées perpendiculairement à l'axe de l'analyseur (cf. figure II-15)

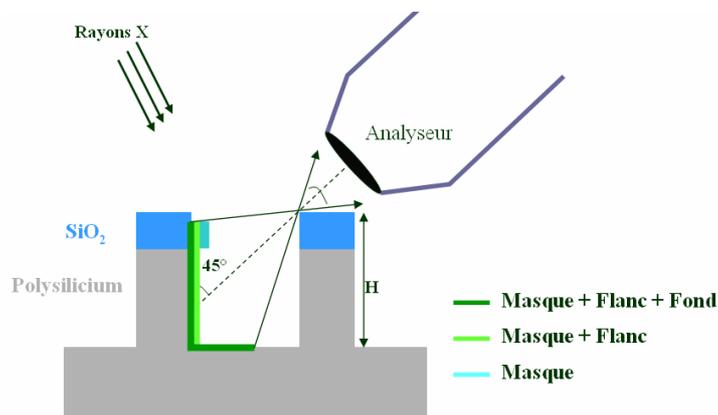


Figure II-15: analyse topographique chimique.

Ainsi selon l'angle de l'analyse XPS (de 20 à 60°), on pourra recueillir les photoélectrons provenant des zones masque + flancs+ fond ou du masque + flancs ou du masque uniquement.

Afin de séparer les contributions provenant du masque (isolant) et celle provenant du polysilicium (conducteur), on utilisera les propriétés de chargement en surface des zones isolantes sous l'action d'un canon à électrons. En effet, les photoélectrons

provenant de ces surfaces isolantes vont voir leur énergie cinétique augmenter décalant les pics vers des énergies de liaisons plus faibles.

La figure II-16 présente cet effet. On y a représenté le spectre du fluor F1s obtenu lors de l'analyse des flancs d'une grille polysilicium gravée en chimie $\text{SF}_6/\text{CH}_2\text{F}_2$ surmontée du masque dur en SiO_2 , sans et avec le flux d'électrons. La composante fluor présente sur le masque est fortement décalée (environ 10eV) tandis que la composante fluor déposée sur les flancs des grilles polysilicium n'est pas affectée.

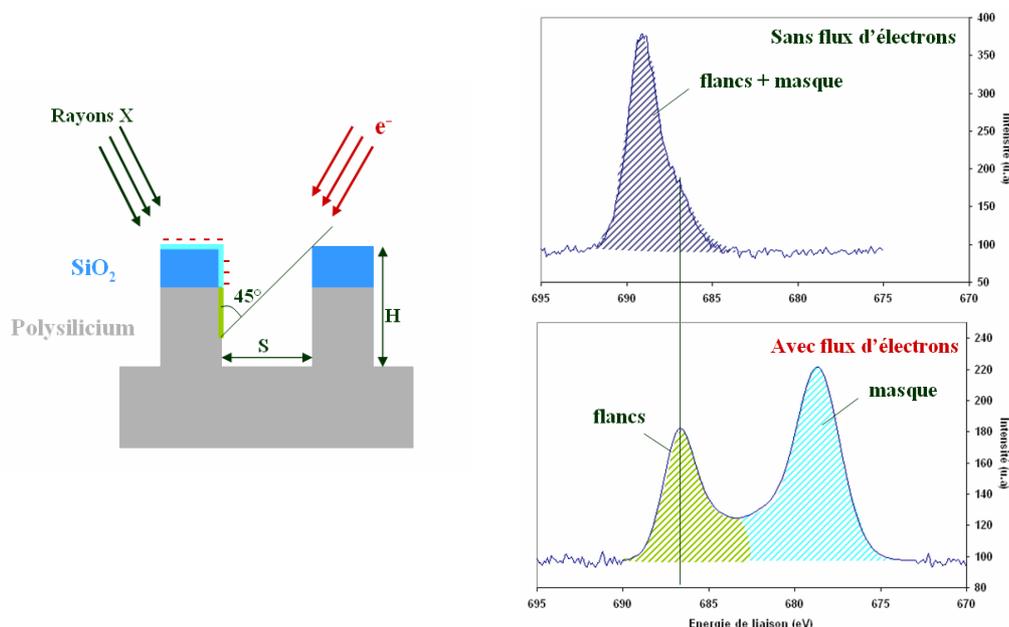


Figure II-16: Séparation de spectres XPS entre un matériau isolant et conducteur grâce à l'utilisation d'un canon à électrons.

Un masque spécifique a été dessiné pour ce genre d'analyse XPS. Il s'agit d'un réticule traité pour une lithographie 193 nm. Le descriptif de ce masque avec les principales zones utilisées pour la caractérisation, est donné plus loin dans le paragraphe II.4.1.

Dans le cadre de cette thèse, l'analyse des couches de passivation formées sur les flancs en polysilicium avec un masque dur SiO_2 (cf. figure III.3.1) s'est faite en combinant l'analyse chimique topographique avec l'utilisation du canon à électrons afin de séparer les contributions provenant du masque.

II.3 Techniques de caractérisation ex situ

II.3.1 Le microscope électronique à balayage

La première technique couramment utilisée est le microscope électronique à balayage ou SEM en anglais, pour Scanning Electron Microscopy⁴².

Son principe de fonctionnement est le suivant : un faisceau d'électrons balaie la surface de l'échantillon, des interactions élastiques et inélastiques se produisent. Les électrons rétrodiffusés et secondaires émis par l'échantillon sont recueillis sélectivement par des détecteurs qui transmettent un signal à un écran cathodique dont le balayage est synchronisé avec le balayage de l'objet. Chaque point (x, y) de la surface balayée par un SEM donne un niveau de gris (pixellisation) qui correspond aux nombres d'électrons secondaires détectés. Le point sera noir, si peu d'électrons

sont recueillis et blanc, si un nombre important d'électrons est recueilli. Le nombre d'électrons détectés dépend de :

- changement de topologie (effet d'angle ou de marche qui permet d'avoir plus ou moins de surface couverte par le faisceau)
- type de matériau (isolant, conducteur, semi-conducteur qui permet d'avoir plus ou moins d'arrangement électronique)

Cette technique est aujourd'hui la plus utilisée dans le monde de la microélectronique. On distingue deux types d'outils SEM :

- le SEMCD permettant la mesure en ligne en vue de dessus des dimensions des motifs (CD) et de la rugosité de bord de ligne (LER, LWR). La précision relative de la mesure par SEMCD est de $\pm 0.4\text{nm}$ (statistique réalisée sur une recette de métrologie mesurant 5 fois de suite 17 sites sur une même plaque et cela à 3 reprise) et sa résolution spatiale est de 1nm
- le SEM HR (pour Haute Résolution) permettant les caractérisations des profils et la mesure des épaisseurs de couche. La précision relative de la mesure par SEM HR est de $\pm 0.4\text{nm}$ (environ 1% de la mesure) et sa résolution spatiale est de 1nm.

Nous avons utilisé lors de cette thèse des SEM CD Hitachi 93000 et SEM HR Hitachi 5000. Les différentes mesures réalisées sont résumées dans le tableau II-1.

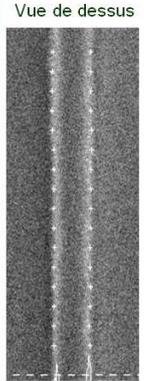
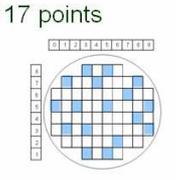
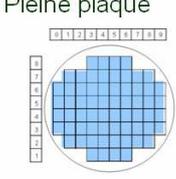
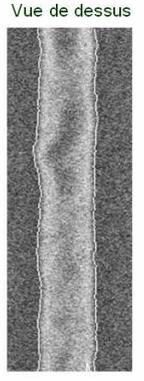
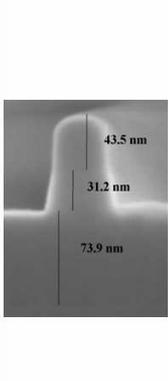
SEM CD			SEM HR
CD	Uniformité (3σ)	LER et LWR	Profils Epaisseur
Vue de dessus 	17 points  Pleine plaque 	Vue de dessus 	

Tableau II-1: Récapitulatif des différentes mesures faites par imagerie SEM.

Mais avec la réduction en dimensions des motifs, il est de plus en plus difficile d'utiliser cette technique pour la caractérisation des dimensions, dont la précision est de l'ordre du nanomètre. Les industriels sont donc à la recherche de méthodes de contrôle et de caractérisation, si possible sans contact, extrêmement rapides, non destructives et plus sensibles que la méthode SEM.

La scattérométrie est une nouvelle technique de mesure qui apporte une partie de la solution. En effet, elle présente une grande vitesse de mesure et une grande vitesse d'extraction des paramètres caractéristiques à partir de la mesure, et ceci avec une grande stabilité et reproductibilité inférieure au nanomètre pour la mesure d'objets dont la dimension est inférieure à 100 nm.

II.3.2 La scattérométrie

L'analyse de la lumière diffractée est appelée scattérométrie ou OCD (pour Optical CD)⁴³. Cette technique permet de réaliser des caractérisations dimensionnelles de façon rapide, répétable et surtout non destructive.

Elle est basée sur l'analyse de la figure de diffraction-diffusion d'une onde lumineuse suite à son interaction avec un motif dense, appelé réseau, c'est-à-dire plusieurs lignes les unes à côté des autres (la densité minimale qu'il est possible de mesurer par un scattéromètre est de 1/10). Plus précisément, la méthode par scattérométrie consiste à envoyer un flux lumineux sur une surface avec un état de polarisation linéaire parfaitement défini et à observer le changement de polarisation suite à l'interaction de l'onde lumineuse avec cette surface (cf. figure II-17).

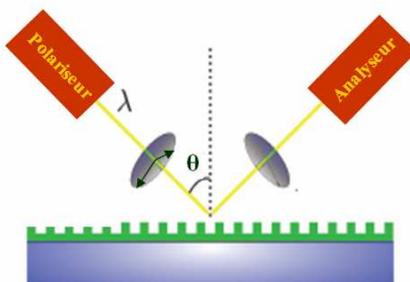


Figure II-17: Principe de la scattérométrie.

Il existe trois types de scattérométrie: la réflectométrie utilisant des figures de diffraction obtenus à partir de plusieurs longueurs d'onde λ de la source lumineuse pour une incidence normale ($R(\lambda)$, $\theta=0^\circ$), la photo-goniométrie où l'angle d'incidence de source lumineuse varie pour une longueur d'onde λ fixe ($R(\theta)$, λ fixe) et l'ellipsométrie où la longueur d'onde λ de la source lumineuse varie pour un angle d'incidence différent de 0° ($R(\lambda)$, $\theta \neq 0^\circ$).

La scattérométrie présente à STMicroelectronics utilise le principe de l'ellipsométrie. On récupère les figures de diffraction diffusion en faisant varier la longueur d'onde de 250 nm à 750 nm avec un angle fixe par rapport à la normale d'environ 70° . Elles sont ensuite comparées à des figures de diffraction théoriques entrées préalablement dans des systèmes de bibliothèques, définissant la densité du réseau, les matériaux et les dimensions critiques. Après identification de la meilleure figure de diffraction théorique, on obtient alors un compte rendu des profils et des mesures de dimensions critiques estimées. Le principe de l'ellipsométrie spectroscopique est représenté par la figure II-18.

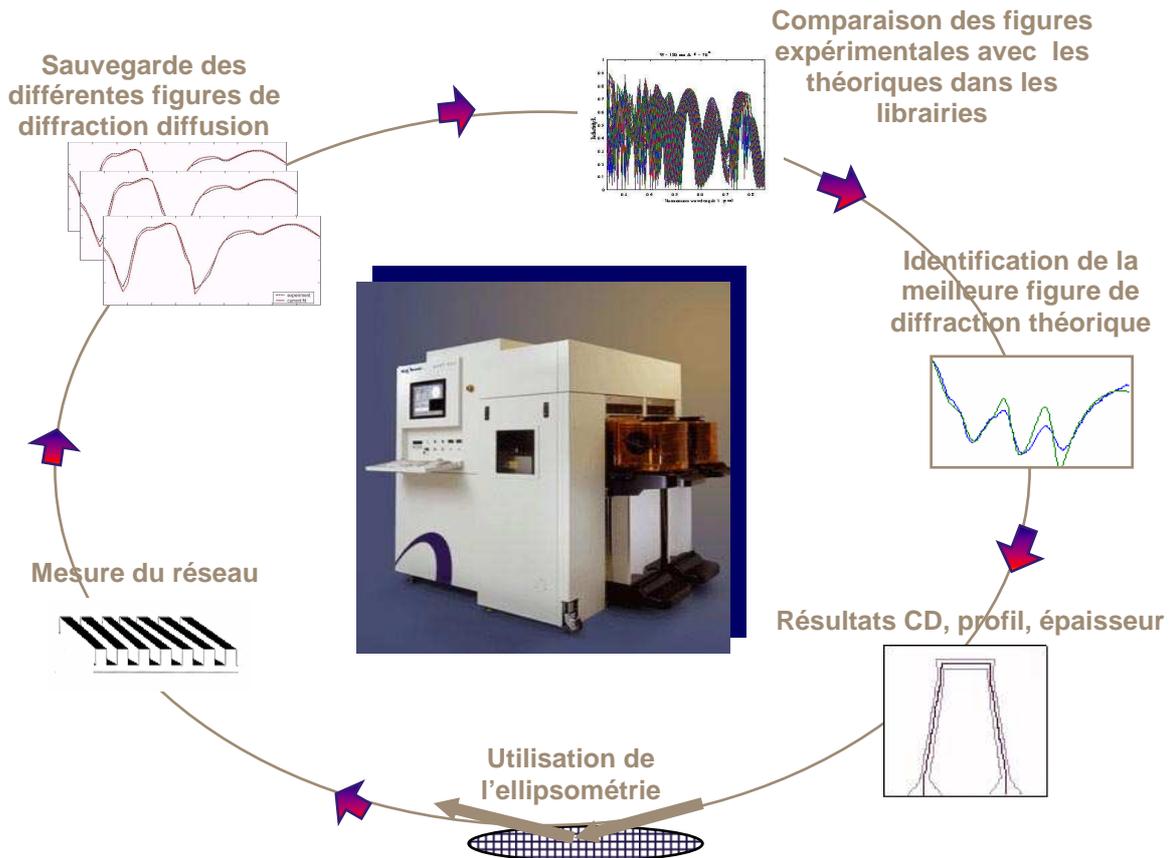


Figure II-18: Principe de l'ellipsométrie spectroscopique

L'effet de réseau permet d'améliorer le signal et donc permet une extraction du profil qui n'était pas possible avec le SEM CD. Nous pouvons donc ici avoir accès au CD haut, CD milieu, CD bas et l'angle formé par le motif et la surface du substrat comme présenté dans la figure II-19.

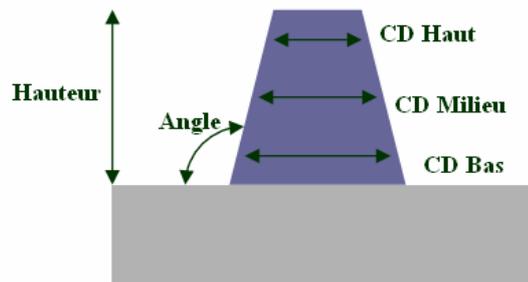


Figure II-19: Grandeurs mesurées en scatterométrie.

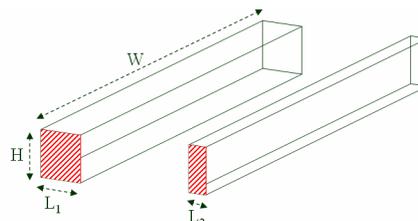
Cette méthode présente beaucoup d'avantages, dont sa rapidité d'exécution, sa précision sur les mesures et sa répétabilité (stabilité) d'une mesure à une autre. La précision relative de la mesure par scatterométrie est de $\pm 0.2\text{nm}$ (statistique réalisée sur une recette de métrologie mesurant 5 fois de suite 10 sites sur une même plaque et cela à 3 reprises) et sa résolution spatiale est de 1nm. Pourtant la scatterométrie ne permet pas de mesurer des motifs dont la hauteur est faible, ce qui sera un problème dans le cas de la mesure du masque dur du procédé grille 45nm. Pour plus d'informations sur la technique d'ellipsométrie, le lecteur pourra se référer à ^{44,45}.

II.3.3 Les mesures électriques

Dans cette thèse, nous ferons référence à certains tests électriques permettant de caractériser le procédé de fabrication des éléments actifs dit « front end » pour le nœud technologique 45nm :

- La mesure du CD électrique correspondant à un rapport de résistances mesurées sur deux lignes de polysilicium de longueur L différentes, une petite de 40nm (L_2) et une grande de longueur $2\mu\text{m}$ (L_1) pour une largeur identique W de $25\mu\text{m}$. On cherche à connaître la longueur électrique L_1 qui n'est pas connue avec précision.

$$\text{Ainsi on aura : } \frac{R_1}{R_2} = \frac{\rho W / S_1}{\rho W / S_2} = \frac{L_1}{L_2}$$



Avec R la mesure de la résistance
 ρ la résistivité du polysilicium
 S la section de la ligne de polysilicium

- La mesure des courants I_{off} et I_{on} . Le courant I_{off} correspond à la mesure du courant à $V_g = 0$ pour $V_d \neq 0$. Le courant I_{on} correspond au courant I_d mesuré en zone de saturation. Il se mesure à $V_g = V_d = V_{\text{dd}} = V_{\text{Nom}}$ sur un transistor de longueur L 40nm (cf. figure I-6), 1. Les courants sont exprimés en $\mu\text{A} \cdot \mu\text{m}^{-1}$, en effet ils sont divisés par la largeur W du transistor.
- La mesure du rendement Y des plaques. Le rendement d'une plaque se définit en nombre de puces fonctionnant sur la plaque. Ces tests peuvent être effectués sur différents types de fonctions logiques (SRAM, Inverseur...). Dans le cadre de cette thèse nous parlerons de test de rendement sur les cellules mémoires SRAM. Une puce sera donc fonctionnelle si pour des tensions de grille différentes (V_{Min} , V_{Max} , V_{Nom}) les programmes de tests d'écriture, de lecture, et d'enregistrement (I_{cellules}) des cellules mémoires SRAM fonctionnent et si le courant de fuite I_{Standby} reste dans les limites fixées lorsqu'il n'y a pas de commande de grille.

II.4 Structure et méthode de caractérisation

Toutes les études présentées dans cette thèse ont été réalisées sur des plaques 300mm, dont la majorité avec motifs. Mais, selon les études faites, différents masques lithographiques ont été employés.

II.4.1 Les masques lithographiques

Masque C45LYNX

Ce réticule a été étudié pour le développement de la technologie 45nm. C'est un masque pour résine 193nm, scanner immersion. Ce masque présente plusieurs zones de test électrique : test rendement (SRAM), CD électrique (Prodev), I_{on} et I_{off} (Scribes) et de caractérisation morphologique. Il a été utilisé pour toutes les études entreprises à STMicroelectronics. Ce masque a également été utilisé pour les études de

conditionnement faites au LTM (cf. chapitre III paragraphe III.4). La figure II-20 montre le descriptif de ce masque, avec les principales zones utilisées pour la caractérisation du procédé dans le cadre de cette thèse.

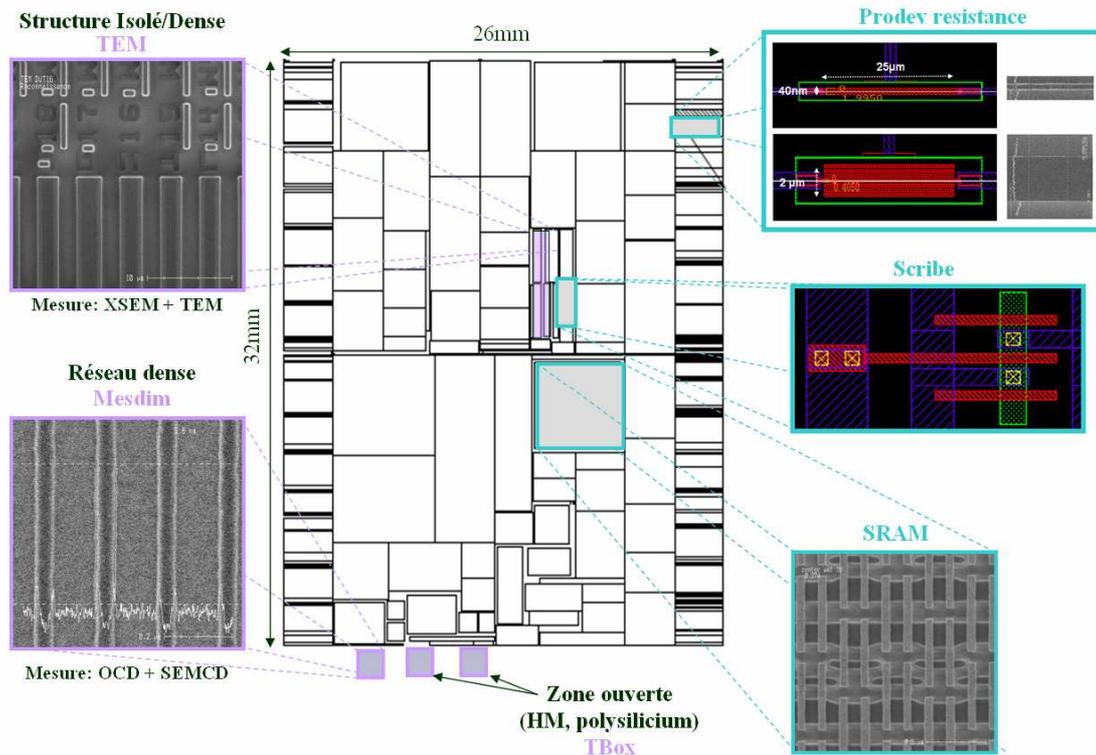


Figure II-20: Descriptif du masque C45LYNX.

Les structures TEM sont des structures présentant des motifs isolés et denses dont la dimension critique et l'espacement varient. Ces structures ont été utilisées pour le contrôle des profils de grille et les épaisseurs de l'empilement, en coupe SEM haute résolution et en TEM.

Les structures Mesdim, sont des réseaux de lignes denses mises en place pour des mesures par scattérométrie. Ces structures sont utilisées pour la mesure des CD par OCD et SEM en vue de dessus. Ce sont ces structures qui permettent le contrôle en ligne des dimensions CD de la grille.

Les structures TBox sont des zones ouvertes qui ont été utilisées pour la mesure ellipsométriques des épaisseurs de masque dur et de polysilicium avant et après gravure.

Les structures SRAM, sont utilisées pour contrôler les dimensions des SRAM et l'alignement des structures avec les zones actives.

Masque XPS 193nm

Ce réticule a été conçu afin d'effectuer des études par XPS sur des plaques préparées sur le site de STMicroelectronics à Crolles. Il s'agit d'un réticule traité pour une lithographie 193 nm. La figure II-21 montre le descriptif de ce masque, avec les principales zones utilisées pour la caractérisation.

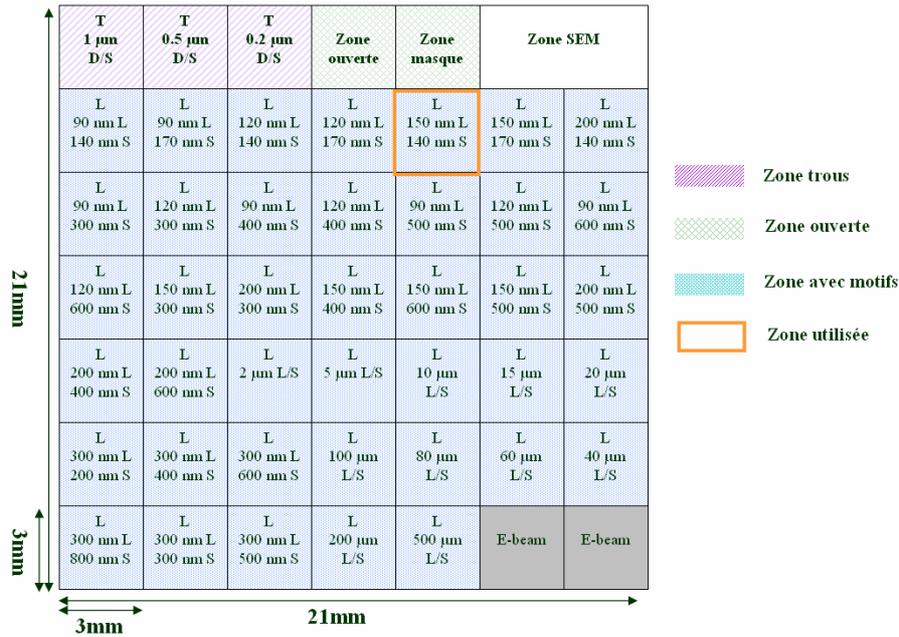


Figure II-21: Descriptif du masque XPS 193nm.

Ce masque présente des zones de motifs plus ou moins denses, une zone substrat (Zone ouverte) et une zone masque résine (Zone masque) afin de pouvoir réaliser des études XPS angulaire et de pouvoir caractériser les différentes surfaces des motifs (Chap III, paragraphe III.3). L'avantage de ce masque est qu'il présente une multitude de structures de largeur et espace différents.

II.4.2 Quelques outils statistiques en microélectronique :

a) Notion d'écart type et de variance

Mathématiquement, l'écart type mesure la dispersion d'une série de valeurs autour de leur moyenne. En statistique ainsi qu'en métrologie, l'écart type (standard deviation en anglais) permet d'évaluer, à partir d'un échantillonnage soumis au hasard, la dispersion de la population tout entière.

Plus généralement, l'écart type est plus souvent utilisé, à travers son carré, appelé variance. Sa formule mathématique est la suivante.

$$\text{Variance : } \sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (X_i - \bar{X})^2}{n}$$

Avec l'écart type

X_i Mesure i de la variable considérée

\bar{X} Valeur moyenne de la variable considérée

Plus l'écart type est élevé et plus grande est la dispersion des observations d'une variable. Ainsi pour toute dispersion suivant une distribution normale (hypothèse que nous ferons tout au long de l'étude de dispersion CD) on peut définir des intervalles de confiance, +/-1 écarts type autour de la valeur moyenne représentant 68% de la

dispersion totale, et +/- 3 écarts type autour de la valeur moyenne représentant 99,7% de la dispersion totale (cf. figure II-22).

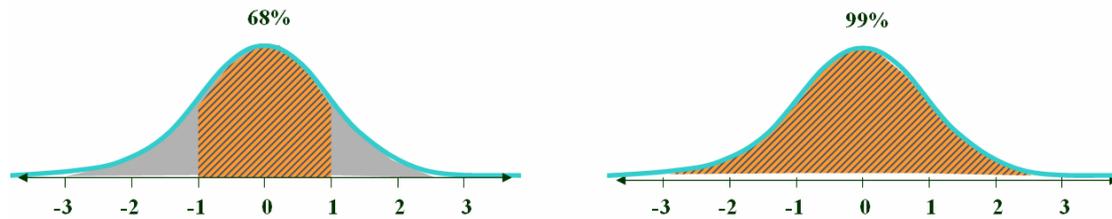


Figure II-22: Représentation de +/- 1 et +/-3 écarts type sur la dispersion globale observée.

b) Les analyses de variance

L'analyse de la variance (terme souvent abrégé par le terme anglais ANOVA : ANalysis Of VAriance) s'applique lorsque que l'on mesure une ou plusieurs variables explicatives discrètes (appelées alors facteurs de variabilités, leurs différentes modalités étant appelées "niveaux") qui influencent sur la distribution d'une variable continue. On parle d'analyse à 1 facteur, lorsque l'analyse porte sur un modèle décrit par un facteur de variabilité, d'analyse à 2 facteurs ou d'analyse multifactorielle.

La méthode d'analyse de la variance permet de décomposer la variance totale suivant les différents effets possibles⁴⁶. Dans le cadre de cette thèse la variabilité CD sera décomposée selon les effets lot à lot (traduisant les différences entre les lots), plaque à plaque, site de mesure à site de mesure, équipement à équipement, produit à produit. La variation non corrélée aux facteurs de l'étude constitue les résidus.

Si nous considérons σ_{Total}^2 la variance totale calculée sur les mesures (avec σ : écart type des mesures), on définit alors:

$$\sigma^2_{Total} = \sigma^2_{Lot} + \sigma^2_{Plaque} + \sigma^2_{Site} + \sigma^2_{Equipement} + \sigma^2_{Produit} + résidu$$

c) Les plans d'expériences^{47,48}

Comme nous l'avons dit précédemment le nombre de paramètres intervenant dans les plasmas de gravure est important et de ce fait l'analyse des mécanismes et les interactions intervenant lors de ces plasmas deviennent complexes.

Les plans d'expériences (DOE pour « Design of Experiment ») vont permettre d'optimiser l'organisation des essais expérimentaux pour obtenir le maximum d'informations avec le minimum d'expériences. La compréhension des plans d'expérience s'appuie sur deux notions essentielles, celle d'espace expérimental et celle de modélisation mathématique des grandeurs étudiées.

Notion d'espace expérimental

Supposons qu'un expérimentateur lance une étude. Il s'intéresse à une grandeur qu'il mesure à chaque essai. Cette grandeur s'appelle la réponse, c'est la grandeur d'intérêt. La valeur de cette grandeur dépend de plusieurs variables ou facteurs.

La valeur donnée à un facteur est appelée un niveau. Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes, la borne inférieure (ou niveau bas) et la borne supérieure (ou niveau haut). L'ensemble de des valeurs entre le niveau bas et niveau haut est appelé domaine de variations du facteur. On peut noter le niveau bas -1 et le niveau haut +1.

S'il existe plusieurs facteurs, la réunion des domaines de chaque facteur définit le domaine d'étude. Ce domaine d'étude est la partie de l'espace expérimental retenue

par l'expérimentateur pour faire ses essais. Une étude, c'est-à-dire un ensemble d'expériences bien définies, est représenté par une série de points disposés dans le domaine d'étude (cf. figure II-23).

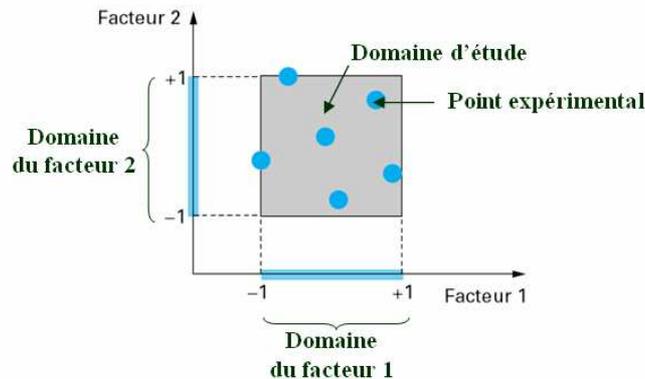


Figure II-23: définition du domaine d'étude pour 2 facteurs.

A chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. A l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localisent sur une surface appelée surface de réponse (cf. figure II-24).

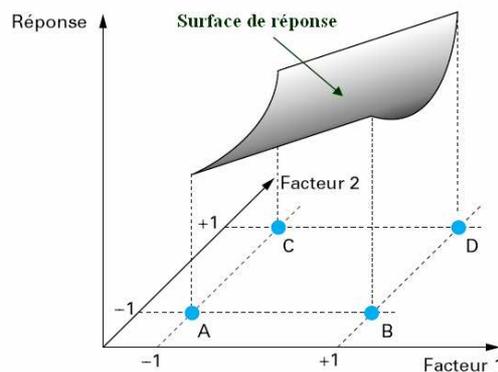


Figure II-24: Définition de la surface de réponse.

Notion de modélisation mathématique

Le plan d'expérience utilise le fait que dans un intervalle borné, toute fonction liant une réponse à ses facteurs peut être décrite par un polynôme de degré plus ou moins élevé du type :

$$y = a_0 + \sum_i a_i x_i + \sum_{ij} a_{ij} x_i x_j + \sum_i a_{ii} x_i^2 + \dots + e$$

↑

Constante

↑

Terme de degré 1

↑

Terme de degré 2

Interactions

Effets carrés

↑

Résidu

Où y est la grandeur à laquelle l'expérimentateur s'intéresse. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation et est obtenue avec une précision donnée. x_i représente le niveau attribué au facteur i, c'est la valeur de la coordonnée du facteur i retenue par l'expérimentateur pour réaliser son essai. a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii} sont les coefficients du modèle mathématique adopté pour décrire les résultats de l'expérience. Ces coefficients sont

les inconnues qu'il faut déterminer. Et e correspond au résidu regroupant le manque d'ajustement du polynôme aux valeurs expérimentales et l'erreur expérimentale.

A la fin du plan d'expérience, on a donc n équations polynomiales (s'il y a n essais) à p inconnues (s'il y a p coefficients dans le modèle choisi). Ce système s'écrit d'une manière simple sous forme matricielle :

$$y = Xa + e$$

Avec y Vecteur réponse

X Matrice de calcul, dépendant des points expérimentaux choisis pour exécuter le plan du modèle postulé

a Vecteur des coefficients

e Vecteur des résidus

Afin de résoudre ce système possédant moins d'équations que d'inconnues. On va utiliser la méthode de régression des moindres carrés. On obtient ainsi les estimations les plus probables des coefficients a .

Logiciel de plan d'expériences

La construction des plans d'expériences est souvent facile et il suffit de choisir parmi les matrices déjà publiées. Mais, il importe que le plan soit adapté à l'étude et non l'inverse. Les logiciels de plan d'expérience comme « Statgraphics » utilisé lors de cette thèse, possèdent des bibliothèques de plans classiques mais ils permettent également de construire des plans particuliers. Tous les plans utilisés lors de cette thèse sont des plans de criblage.

Plans de criblage

Ces plans sont conçus pour déterminer les facteurs les plus importants affectant une réponse. La plupart de ces plans utilisent des facteurs à deux niveaux uniquement. Ces facteurs peuvent être quantitatifs ou qualitatifs. Parmi les plans proposés : plans factoriels à 2 niveaux, plans factoriels à niveaux mixtes, plans factoriels fractionnaires, fractions irrégulières et plans de Plackett-Burman^{49,50}.

Les plans factoriels

Il existe un grand nombre de plans d'expérience selon le nombre de facteurs à étudier. Parmi ces plans, certains sont plus fréquemment utilisés notamment le plan factoriel complet et le plan fractionnaire.

Les factoriels complets sont des plans pour lesquels le nombre de niveau de chaque facteur est restreint à deux. Toutes les combinaisons de niveaux sont effectuées au cours de l'expérimentation, soit 2^q essais pour q facteur étudiés.

Les factoriels fractionnaires sont des plans qui permettent d'étudier tous les facteurs, mais dont le nombre d'essais est réduit par rapport aux plans factoriels complets. Par exemple pour un plan factoriel demi nous aurons 2^{q-1} , soit 2 fois moins d'essais que pour un plan factoriel complet. À la fin d'un plan factoriel fractionnaire, on a un système de n équations à p inconnues avec $p \gg n$. On ne sait pas résoudre un tel système. Ne pouvant pas augmenter le nombre d'équations, il faut diminuer le nombre d'inconnues. On y arrive en utilisant un artifice : en regroupant les inconnues et on résout le système pour ces groupes d'inconnues. Ces groupes d'inconnues sont appelés des contrastes et les inconnues sont dites aliasées dans les contrastes.

Etapes principales pour la construction d'un plan d'expérience

Afin d'illustrer nos propos, nous prendrons l'exemple de l'étude faite lors du chapitre III sur l'étape de traitement de la résine.

Etape 1 : Définir le plan

Le traitement de la résine étant une étape faisant intervenir le caractère chimique des plasmas, nous avons cibler trois paramètres pour ce plan d'expériences : la pression, la puissance source et le débit de HBr. Le domaine d'étude suivant :

- Pression [a-1 ; a+1] Facteur A
- Puissance source [b-200 ; b+200] Facteur B
- Débit HBr : [c-20 ; c+20] Facteur C

Avec a, b et c étant les valeurs utilisées dans les conditions standards. Une des réponses à analyser est la dimension des motifs après gravure $CD_{Bias\ HM}$.

Etape 2 : Choix du plan d'expérience

Notre choix se porte sur un plan factoriel fractionnaire demi (2^{3-1} essais), plan de criblage de résolution III, c'est-à-dire permettant de connaître l'influence des différents facteurs mais également certaines interactions d'ordre 2 (matrice de corrélation diagonale, cf. tableau II-2). Les interactions carrées ainsi que les interactions d'ordre 3 ne pourront pas être connus de façon précise.

	A	B	C	AB	AC	E	
A	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.000	→ Valeur 0: Evaluation sans biais interaction HBr/Pression
B	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.000	
C	0.0000	0.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.000	
AB	0.0000	0.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.000	→ Valeur >0: Evaluation avec biais interaction HBr/Pression/TCP
AC	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.000	
BC	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.000	

Tableau II-2: Matrice de corrélation des paramètres étudiés.

En plus des 4 essais nous ajoutons 3 points au centre du domaine d'expérience afin de tester la répétabilité des résultats.

Au total nous avons donc un plan d'expérience composé de 7 essais et disposé de façon aléatoire (cf. tableau II-3).

	A	B	C
Plaque N°	Pression (mTorr)	TCP (Watt)	HBr (sccm)
1	a+1	b+200	c+20
2	a-1	b+200	c-20
3	a	b	c
4	a	b	c
5	a-1	b-200	c+20
6	a	b	c
7	a+1	b-200	c-20

Tableau II-3: Tableau représentant les différents essais du plan d'expérience effectué sur la pression, la puissance source TCP et le débit de HBr lors de l'étape de traitement de la résine.

Grâce à ce plan d'expérience nous allons relier la réponse CD_{HMbias} aux différents facteurs étudiés, par un polynôme de type

$$\begin{aligned}
CD_{HM\text{Bias}} = & a_0 + e \\
& + \sum a_1A + \sum a_2B + \sum a_3C \\
& + \sum a_{12}AB + \sum a_{13}AC + \sum a_{23}BC \\
& + \sum a_{11}A^2 + \sum a_{22}B^2 + \sum a_{33}C^2 \\
& + \sum a_{123}ABC + \sum a_{112}AAB + \sum a_{221}BBB \\
& + \sum a_{111}A^3 + \sum a_{222}B^3 + \sum a_{333}C^3
\end{aligned}$$

Constante

Terme de degré 1

Interactions

Carré effets

Terme de degré 2

Interactions

Cube effets

Terme de degré 3

Etape 3 : Effectuer les expériences

Après avoir effectué les différents essais selon le plan défini, nous avons mesuré le $CD_{HM\text{ bias}}$ au SEM pour chacun d'entre eux puis nous avons rentré les résultats dans le tableau d'expérience du logiciel statgraphics (cf. tableau II-4)

	A	B	C	Réponse
Plaque N°	Pression (mTorr)	TCP (Watt)	HBr (sccm)	$CD_{HM\text{Bias}}$ (nm)
1	a+1	b+200	c+20	-10.9
2	a-1	b+200	c-20	-12.0
3	a	b	c	-10.4
4	a	b	c	-10.5
5	a-1	b-200	c+20	-10.0
6	a	b	c	-10.5
7	a+1	b-200	c-20	-10.5

Tableau II-4: Résultats $CD_{HM\text{Bias}}$ obtenus selon les différents essais du plan d'expérience.

Analyse du plan d'expérience

La réponse est analysée par le logiciel et un modèle statistique est construit. Plusieurs paramètres sous le logiciel statgraphics nous permettent d'analyser et d'estimer ce modèle, les plus utilisés sont les suivants :

- Le coefficient de détermination R^2 permettant de savoir à combien de pourcentage les facteurs étudiés expliquent les variations de la réponse. Un bon modèle présente un R^2 autour de 80 à 90%. Dans notre exemple le coefficient de détermination est de 94%, c'est-à-dire que 94% des variations observées sur le $CD_{HM\text{Bias}}$ sont expliquées par le modèle construit.
- Le graphique de Pareto : il permet de hiérarchiser les effets. Si le degré de liberté est assez élevé, il est standardisé, c'est-à-dire qu'une ligne matérialise le seuil de significativité. Tout effet dépassant cette ligne est significatif. Le signe « + » indique que l'augmentation du facteur entraîne une augmentation de la réponse étudiée, et le signe « - » l'inverse. Dans notre exemple, après simplification du modèle, par élimination des interactions d'ordre 2 (non significative dans ce cas), nous avons obtenu le diagramme de Pareto présenté dans la figure II-25. Elle montre que seule la puissance source est un facteur significatif expliquant les variations sur le CD_{HM} . Une augmentation de la puissance source va entraîner une augmentation des dimensions des motifs.

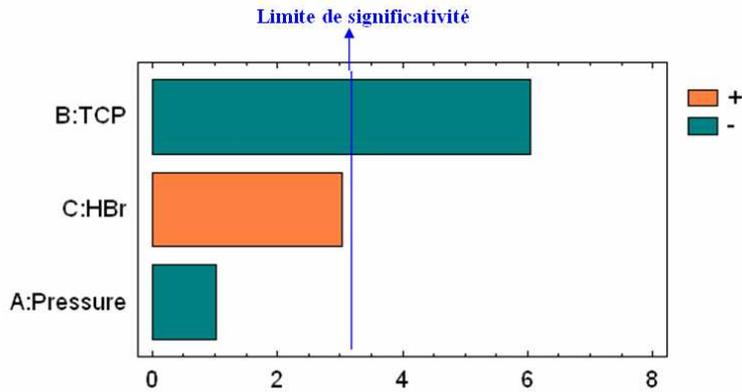


Figure II-25: Diagramme de Pareto standardisé donnant la significativité de l'influence de la puissance source, du flux HBr, et de la pression sur le CD_{HMBias} .

- Estimation des effets : le logiciel va également nous permettre d'estimer les effets de chaque paramètre et leurs interactions. Pour notre exemple, l'augmentation de 400W de la puissance source va entraîner une diminution de 0.8 nm sur le CD_{BiasHM} . (cf. figure II-26)

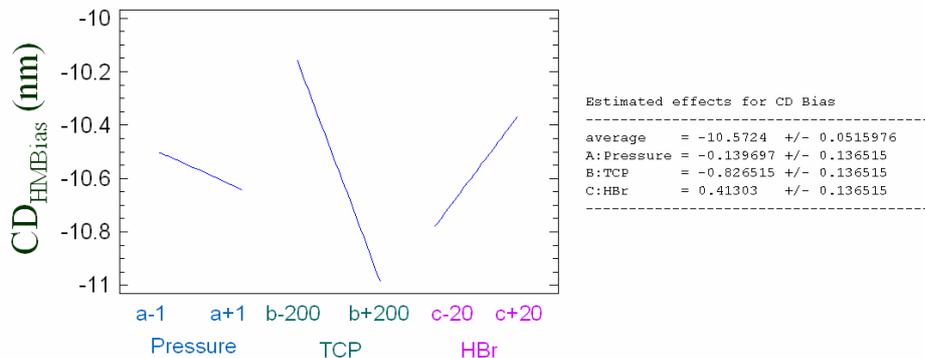


Figure II-26: Graphique et estimation de l'impact des paramètres pression, TCP et HBr sur le CD_{HMBias} .

- Equation polynomiale reliant les réponses aux facteurs : cette équation est exprimée en unité et non pas en valeur normée, elle ne peut donc pas servir à l'évaluation de l'impact des facteurs mais s'utilise pour prévoir les valeurs de réponses sur tout le domaine d'étude. Dans notre exemple, l'équation polynomiale dépend seulement des facteurs car nous avons simplifié le modèle en enlevant les interactions qui n'étaient pas significatives.

$$CD_{HMBias} = -8.776 - 0.0698 * Pr\,ession - 0.002 * TCP + 0.010 * HBr$$

- Prédiction de valeurs : grâce au modèle généré on peut prévoir les valeurs de CD_{HMBias} pour tout le domaine d'étude. La figure II-28 présente l'estimation des CD_{HMBias} pour une pression constante à 5mTorr.

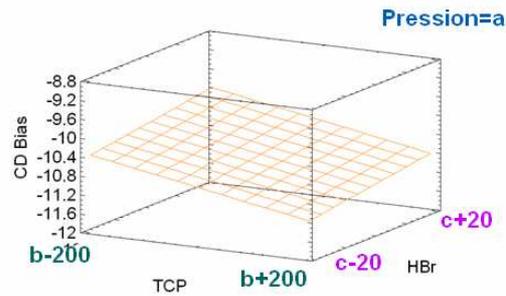


Figure II-27: Prédiction du CD_{HMBias} sur le domaine d'étude à pression constante a.

- Optimisation du procédé : on peut également utiliser le modèle dans le sens inverse c'est-à-dire lui demander quelles doivent être les valeurs des facteurs pour obtenir un CD_{HMBias} précis. Par exemple si le CD_{HMBias} souhaité doit être de -10.2nm exactement, le logiciel calcule et donne la valeur optimale de chacun des facteurs étudiés.

En conclusion, sur un système donné les plans d'expériences permettent une diminution considérable du nombre d'essais et une interprétation rapide et sans équivoque. Ils fournissent des résultats faciles à présenter à des non spécialistes avec :

- Possibilité d'étudier un très grand nombre de facteurs
- Une détection des interactions éventuelles
- Une modélisation aisée des résultats
- Une détermination des résultats avec une bonne estimation.

II.5 Conclusion

Nous venons de définir les plateformes de gravure, les outils de diagnostics ainsi que les méthodes et structures de caractérisation mis en œuvre pour le développement et la caractérisation du procédé de gravure des grilles du nœud technologique 45nm. Dans les chapitres qui suivront, nous allons exposer comment nous avons utilisé ces outils et nous présenterons les études et analyses entreprises lors de cette thèse.

Chapitre III : Caractérisation du procédé de gravure grille 45nm

III.1 Stratégie de STMicroelectronics pour le 45nm

Comme nous l'avons vu dans le chapitre I, de nouvelles stratégies voient le jour afin de définir les systèmes microélectroniques de demain. La double exposition (« double patterning ») en est une. Elle est utilisée dès le 45nm par STMicroelectronics pour la définition des cellules mémoires SRAM. Elle va consister à graver en deux fois les grilles des transistors CMOS composant la SRAM comme nous l'avons décrit dans la section I.3.1.

Les études sur les mécanismes de gravure par plasma entreprises lors de cette thèse se sont concentrées sur les étapes composant la gravure HM (étape N°2 de la figure II-36) et celle composant la gravure de la grille polysilicium (étape N°4 : b) de la figure I-37). Afin de ne pas alourdir la dénomination des étapes nous parlerons uniquement dans le reste de la thèse, de la gravure HM et de la gravure polysilicium.

III.1.1 L'empilement grille utilisé

Le fait de définir les grilles des transistors en double exposition, va avoir pour conséquence de rendre plus complexe l'empilement de matériaux utilisé. Pour la technologie 45nm, une stratégie en masque dur a été adoptée afin de minimiser le budget résine. La figure III-1 présente l'empilement de grille utilisé pour le nœud technologique 45nm par STMicroelectronics.

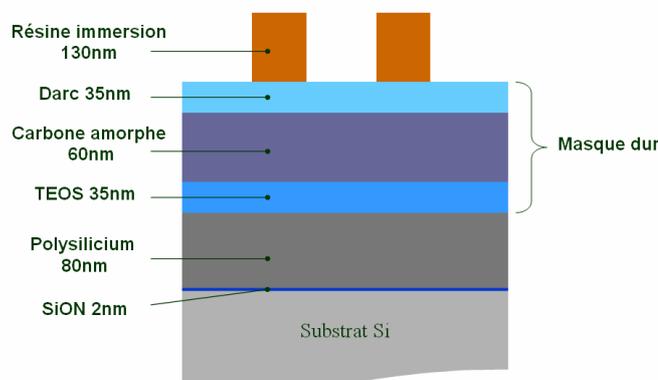


Figure III-1: Empilement utilisée pour la gravure grille 45nm.

L'empilement de grille est réalisé de la manière suivante. Après une préparation de surface du substrat de silicium, le matériau diélectrique SiON, servant d'oxyde de grille, est déposé par CVD (« Chemical Vapor Deposition »). Une couche de 80nm de polysilicium cristallin est par la suite déposée et constituera le matériau de base pour les grilles des transistors.

Le masque dur utilisé comporte en réalité trois couches. La première est un oxyde de silicium, appelé TEOS (Tetra-Ethyl-Ortho-Silicate ou tetra-ethoxy-silane), de 35nm. Il est déposé par LPCVD (« Low Pressure Chemical Vapor Deposition). Il sert de masque dur pour transférer les motifs des grilles dans le polysilicium.

Une couche de carbone amorphe (aC) de 60nm est ensuite déposée. Elle est utilisée, ici, principalement pour des raisons lithographiques. En effet elle permet une

absorption optimale des rayonnements lors de l'exposition de la résine sous la source UV 193nm.

Un oxyde de silane de 35nm est placé entre la résine et le carbone amorphe. Il va servir de couche diélectrique anti-réfléchissante, Darc (« Dielectric Anti-Reflected Capping »). Cette couche est indispensable en photolithographie car elle va permettre d'absorber les ondes réfléchies à l'interface et ainsi éviter des ondes stationnaires dans la résine pouvant générer une dégradation des motifs (cf. chapitre I). Cette couche servira également à ouvrir le masque dur TEOS et le carbone amorphe.

La combinaison d'un Darc avec un carbone amorphe a été choisie pour ses propriétés mécaniques et optiques⁵¹. En effet, outre une meilleure résistance à la gravure, cet empilement présente une fenêtre de procédé en lithographie plus stable que pour un empilement classique avec un BARC, notamment en termes de « courbe de swing » (CD en fonction épaisseur de résine) et de contrôle de réflectivité.

III.1.2 Le procédé gravure grille

Ce paragraphe décrit de manière simple les différentes étapes de gravure de la grille 45nm, avec tout d'abord le descriptif de la gravure HM puis celui de la gravure polysilicium. Pour des raisons de confidentialité, nous ne révélerons pas le détail exact des recettes de gravure.

a) La gravure HM

On appellera de façon générique, gravure HM, toutes les étapes de gravure décrites ci après. Ces étapes sont toutes effectuées à la température centre/bord de 40/40°C.

Traitement résine (« Cure »): HBr / Pression / Puissance source / Tension bias : 0Vb / Injection des gaz : Centre / Temps : 30s

La recette de gravure débute par un traitement préventif de la résine par un plasma HBr sans composante physique. Ceci va permettre de modifier les propriétés physico-chimique de la résine, afin qu'elle résiste mieux lors de la gravure du masque dur. En général cette étape fait perdre environ 3nm sur le CD des motifs. Le traitement de la résine par un plasma HBr a fait l'objet de nombreuses études^{52,53}.

Réduction de côte de la résine (« trim »): Cl₂ / O₂ / Pression / Puissance source / Tension bias : 0Vb / Injection des gaz : Centre / Temps : 50s

Comme nous l'avons mentionné dans le chapitre I, cette étape de réduction de cote résine a permis de contourner les limites en résolution de la lithographie. Cette étape consiste à éroder latéralement par gravure plasma les motifs de la résine, afin d'obtenir les dimensions de grilles souhaitées. Combinée au traitement résine, cette étape nous permet d'obtenir le CD désiré après gravure du masque dur : 54nm.

Le procédé d'érosion latérale de la résine utilisé ici est à base de chlore (Cl₂) et d'oxygène (O₂). En effet l'O₂ très réactif avec les polymères, est mélangé à du Cl₂ afin de ralentir les vitesses de gravure et de mieux contrôler le procédé d'érosion de la résine. Cette étape est purement chimique et très sélective par rapport au Darc. Ce procédé a fait l'objet de nombreuses études^{54,55}.

Cette étape est très importante car l'ajustement du temps de procédé a permis de mettre en place une boucle de régulation en dimension entre la photolithographie et la gravure HM qui sera décrite dans le chapitre IV.

Ouverture Darc: CF_4 / CH_2F_2 / He / Pression / Puissance source / Tension Bias / Injection des gaz : Bord / Temps : détection de fin d'attaque par émission optique (OES)
Dans cette étape, les deux aspects, chimique et physique du plasma sont utilisés. La détection de fin d'attaque se fait par OES sur la raie CO à 484nm, soit un temps d'environ 27s. Une surgravure de 20% en temps de l'étape d'ouverture Darc (« OE » pour Over Etch) est nécessaire en fin d'étape afin de bien nettoyer les surfaces, c'est l'OE Darc. Lors de cette étape on vient transférer le CD ajusté pendant l'étape de cure dans le Darc.

Ouverture aC: HBr / O_2 / Pression / Puissance source / Tension bias / Injection des gaz : Centre / Temps : détection de fin d'attaque par émission optique (OES)
La couche Darc déjà ouverte est utilisée comme masque pour l'ouverture du carbone amorphe. Cette gravure est sélective par rapport au Darc mais aussi par rapport au TEOS. La détection de fin d'attaque se fait par OES sur la raie CO à 520nm, soit un temps d'environ 14s. Une surgravure de 20% en temps de l'étape d'ouverture d'aC vient terminer la gravure, c'est l'OE aC.

Ouverture TEOS: CF_4 / CH_2F_2 / He / Pression / Puissance source / Tension bias / Injection des gaz : Bord / Temps : détection de fin d'attaque par émission optique (OES)
Cette étape de gravure est similaire à celle de l'ouverture Darc. Les 35nm de Darc vont être gravés pour ouvrir les 35nm de TEOS. La détection de fin d'attaque se fait par OES sur la raie CO à 484nm, soit un temps d'environ 29s. Une surgravure de 20% en temps de l'étape d'ouverture TEOS vient terminer cette étape, c'est l'OE TEOS.

Nettoyage (« Strip »): O_2 / Pression / Puissance source / Tension bias : 0Vb / Injection des gaz : Equal / Temps : 40s
La gravure du masque dur se termine par un nettoyage de la surface en dioxygène afin d'enlever la couche de carbone amorphe et les résidus de type polymères.

Après la gravure HM, les plaques subissent un nettoyage par voie humide afin d'éliminer le carbone amorphe restant ainsi que les polymères qui ont été déposés pendant la gravure

La figure III-2 présente l'enchaînement des différentes étapes de la gravure HM avec les coupes des profils de gravure associés, effectué par microscopie électronique à balayage.

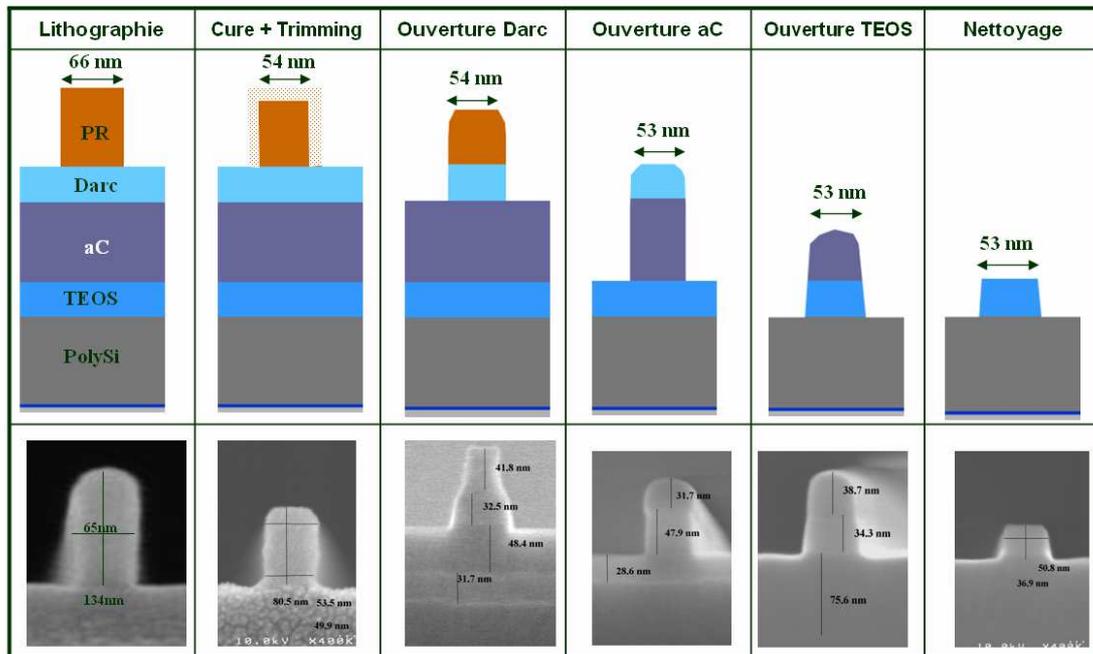


Figure III-2: Schémas des différentes étapes composant la gravure HM et images SEM des profils associés.

b) La gravure polysilicium

Les étapes caractéristiques de cette gravure sont les suivantes :

Break Through (BT): CH_2F_2 / SF_6 / N_2 / He / Pression / Puissance source / Tension bias / Température Centre/Bord 60/40°C / Injection des gaz : Centre / Temps: 10s

Cette étape va servir à retirer l'oxyde natif qui s'est formé en surface du polysilicium. Le BT s'effectue en utilisant du N_2 , CH_2F_2 et du SF_6 . Le CH_2F_2 est un gaz polymérisant (forme des polymères carbonés), il sert à contrôler l'anisotropie de la gravure. Le SF_6 est utilisé pour graver le polysilicium (le fluor réagit avec le Si pour former SiF_4). L'hélium va homogénéiser le plasma. Environ 20nm de polysilicium sont gravés lors de cette étape de BT.

Main Etch (ME) :

Après avoir retiré l'oxyde natif, la gravure du polysilicium s'effectue généralement en deux étapes:

ME1: CH_2F_2 (rampe de 9sccm) / SF_6 / N_2 / He / Pression / Puissance source / Tension bias / Température Centre/Bord 60/40°C / Injection des gaz : Centre / Temps : détection de fin d'attaque par réflectométrie (LSR).

Le ME1 utilise les mêmes chimies que le BT. Avec le BT, cette étape de ME1 constitue la gravure principale de la grille polysilicium puisqu'environ 80% de la hauteur de la grille sera gravé lors de ces étapes.

La fin d'attaque du ME1 se fait par détection interférométrique LSR lorsqu'il reste environ 20nm de polysilicium à graver, soit environ 22s.

ME2 (ME2 et ME2 OE): HBr / O_2 / Pression / Puissance source / Tension bias / Température Centre/Bord 60/60°C / Injection des gaz : Bord / Temps: détection de fin d'attaque par émission optique (OES) (ME2) et 5s (ME2 OE)

Le ME2 est généralement appelé étape d'atterrissage ou « Soft Landing » en anglais. On grave ici la plus grande partie du polysilicium restant après le ME1 (soit environ

20%), beaucoup plus lentement que lors du ME1, et avec une meilleure sélectivité par rapport à l'oxyde de grille, afin de ne pas l'endommager. Pour cela, cette étape comporte du HBr et de l'O₂ qui permettent une gravure anisotrope, par la formation d'une couche de passivation Si_xO_yBr_z, et très rapide. La détection de fin d'attaque se fait par OES sur la raie 425nm, soit un temps d'environ 29s

Over Etch (OE): HBr / O₂ / He / Pression / Puissance source / Tension bias / Température Centre/Bord 60/60°C / Injection des gaz : Equal / Temps : 30s
 Cette étape est caractérisée par une sélectivité par rapport à l'oxyde de grille quasi infinie. On élimine les résidus de polysilicium pouvant encore se trouver sur l'oxyde de grille (surtout dans les zones denses) par les mêmes chimies qu'en ME2 mais beaucoup plus diluées dans de l'hélium.

Après la gravure des grilles en silicium, les plaques subissent un « nettoyage » afin d'éliminer les résidus (oxydes, polymères...) qui ont été déposés pendant la gravure et ce qu'il reste du masque dur TEOS.

La figure III-3 présente l'enchaînement des différentes étapes de la gravure polysilicium avec les coupes des profils des grilles associées, effectuées par microscopie électronique à balayage.

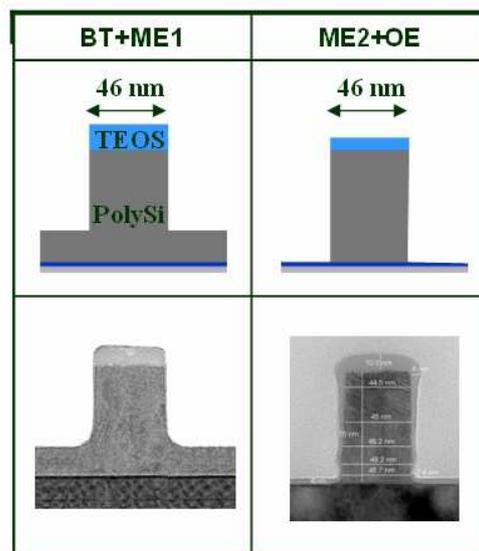


Figure III-3: Schémas des différentes étapes composant la gravure polysilicium et images SEM des profils associés.

c) La stratégie de conditionnement

Dans les réacteurs de gravure, les espèces du plasma diffusent et interagissent avec les parois du réacteur. Cette interaction va conduire à la formation d'un dépôt sur les parois du réacteur pendant les procédés de gravure par plasma. Par conséquent l'état de surface des parois du réacteur va évoluer avec le temps modifiant ainsi la physico-chimie du plasma. Dans ces conditions, la reproductibilité des procédés de gravure plasma d'une plaque à une autre ne peut plus être garantie. Il est donc nécessaire d'avoir recours à une stratégie de conditionnement.

La stratégie utilisée pour la gravure des grilles 45nm a été breveté en 2007 par Singh *et al.*⁵⁶, ingénieurs chez l'équipementier LAM, elle consiste à nettoyer les parois du réacteur avec un plasma fluoré puis à déposer avant chaque substrat à graver, une couche à base de silicium de type SiOCl_x par plasma SiCl₄/O₂ (pour des raisons de

confidentialité nous ne donnerons pas les recettes de ce conditionnement). L'épaisseur de la couche se fait en fonction du procédé de gravure. Ainsi un conditionnement est effectué avant chaque gravure HM et un autre avant chaque gravure polysilicium (soit 2 conditionnements de chambre par plaque).

III.1.3 Contrôle dimensionnel

Deux outils de caractérisation, présentés dans le chapitre II, sont communément utilisés pour le contrôle dimensionnel de la grille : le microscope électronique à balayage (SEM) et la scattérométrie (OCD). Selon l'étape de conception de la grille 45nm, le choix de la mesure va être différent. Selon les études de Junwei Bao⁵⁷ la scattérométrie donne une répétabilité de la mesure finale de la grille de polysilicium de l'ordre du nanomètre alors que le SEM montre une variation plus importante provenant principalement des limitations pour la mise au point de l'image. En effet, comme les électrons bombardent l'échantillon, un champ électrique localisé est créé à l'interface faisceau ligne. Cette création de champ peut modifier la trajectoire des électrons secondaires, créant une image floue où la localisation du bord de la ligne est incertaine. De plus, l'angle droit du bord affecte aussi la mesure SEM. Des études faites à Crolles par Séverine Marquet⁵⁸ avaient conclu en 65nm que la scattérométrie était un outil plus fiable au niveau répétabilité de la mesure. De par un empilement plus complexe en 45nm, il est obligatoire de vérifier à nouveau quel est l'outil le plus fiable pour nos caractérisations. Afin de caractériser les deux méthodes nous avons fait une double mesure SEM et OCD aux niveaux des étapes photolithographiques, HM et polysilicium, en 17 points de mesure (le placement des 17 points a été optimisé pour être représentatif de la plaque⁵⁹), sur 4 plaques (échantillonnage classiquement utilisé à STMicroelectronics) de 9 lots différents. Les résultats de l'étude sur les CD_{poly} sont présentés dans la figure III-4.

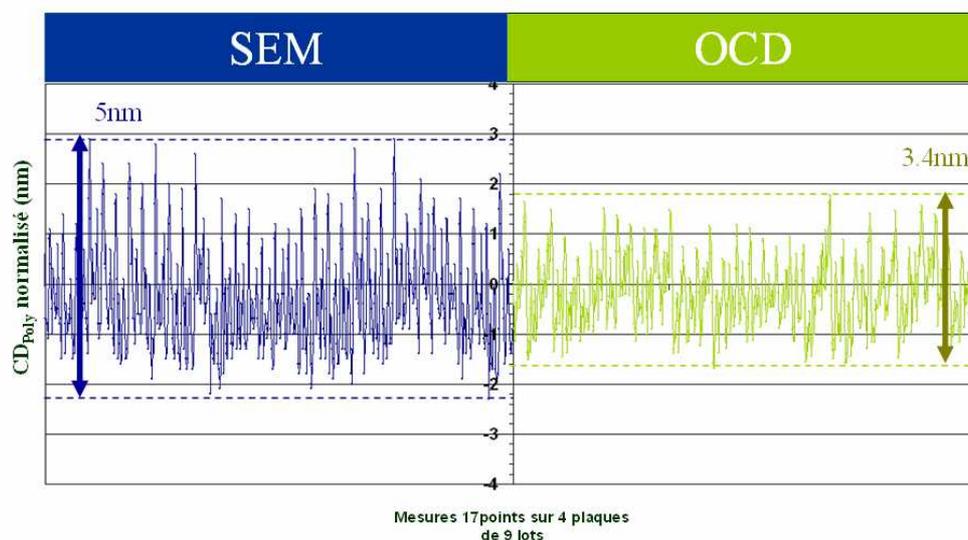


Figure III-4: Comparaison de la mesure CD_{Poly} après gravure Polysilicium en SEM et scattérométrie OCD.

Les mesures faites par SEMCD présentent une plus forte variabilité CD_{Poly} que les mesures effectuées en OCD, 5nm en SEMCD contre 3.4nm en OCD. Cette variabilité supplémentaire peut être attribuée au bruit de la mesure du microscope électronique. Les mêmes constatations ont été faites sur les mesures photolithographiques.

En ce qui concerne la mesure sur le masque dur TEOS (après gravure HM), le problème est tout autre. Comme on peut le voir dans la figure III-5, bien que la variabilité de la mesure CD_{HM} soit meilleure en OCD qu'en SEM, la comparaison des mesures avec celles obtenus en imagerie TEM, montre que la recette de scattérométrie n'arrive pas à mesurer correctement les motifs sur TEOS, d'épaisseur trop faible. Un décalage, non constant, entre la mesure moyenne en SEM et en OCD, d'environ 7nm est ainsi observé.

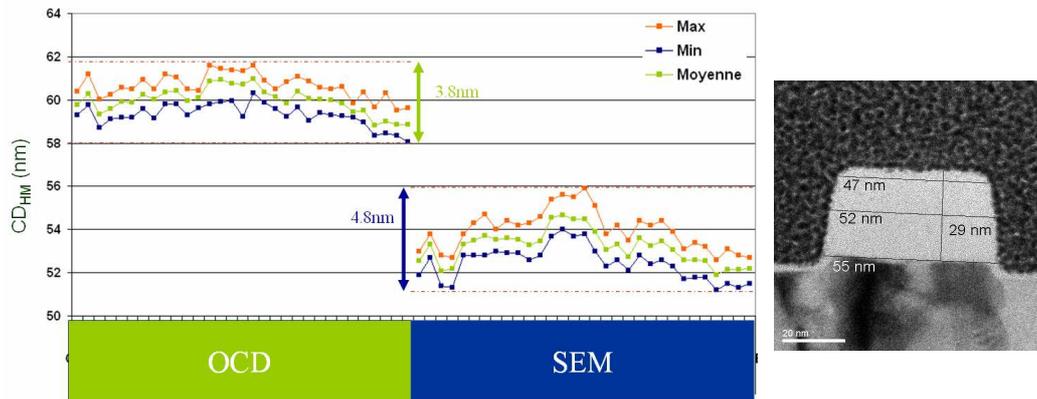


Figure III-5: Comparaison de la mesure CD après gravure HM en SEM et scattérométrie OCD. Image TEM du profils du masque dur TEOS après gravure.

Ces études ont permis de montrer que la scattérométrie était l'outil le plus fiable pour les mesures en ligne après photolithographie et après gravure polysilicium. Mais l'incapacité de celle-ci à mesurer les motifs sur TEOS a conduit à la qualification du SEMCD pour les mesures en ligne après gravure HM.

Les études entreprises lors de cette thèse tiennent compte de ces résultats. Ainsi les appellations CD_{PH} , CD_{HM} et CD_{Poly} que nous emploierons souvent dans les prochains paragraphes, désigneront les dimensions critiques des motifs mesurées après photolithographie en scattérométrie, après gravure masque dur TEOS en SEM et après gravure polysilicium en scattérométrie. Dans le cas contraire, le moyen de mesures sera spécifié.

Le tableau III-1 donne un récapitulatif des dimensions (CD, LER et uniformité) de la grille après lithographie, gravure HM et gravure polysilicium sur la technologie 45nm faite à STMicroelectronics. Après lithographie on mesure un CD_{PH} de 66.6nm pour un $CD_{visé}$ de 66nm, après gravure HM un CD_{HM} de 54.3nm pour un $CD_{visé}$ à 55nm et après gravure polysilicium un CD_{Poly} de 46.7nm pour un $CD_{visé}$ de 46nm.

La rugosité LER (mesurée au SEM) est diminuée lors de la gravure de 6nm à 4.0nm après gravure complète du polysilicium. L'uniformité CD est, elle, dégradée de 3.4nm à 4.5nm lors de la gravure.

Il est important de préciser que ces valeurs sont celles mesurées au SEM (à +/-0.4nm) au début de la thèse, avant de passer en scattérométrie pour les mesure en photolithographie et polysilicium. Une nouvelle revue sera faite dans le chapitre V consacré à l'amélioration de la variabilité des dimensions de grille.

	Après Photolithographie	Après gravure HM	Après gravure polysilicium
CD_{Motif} (nm)	66.6	54.3	46.7
LER (nm)	6.0	4.6	4.0
Uniformité CD (nm)	3.4	3.6	4.5

Tableau III-1: Caractérisation des dimensions de la grille 45nm après photolithographie, gravure HM et polysilicium (à +/- 0.4nm).

Les deux étapes de gravures grille conduisent à des CD_{Bias} ($CD_{Final}-CD_{initial}$) négatifs, correspondant à une érosion latérale des motifs. Pour la gravure HM, le CD_{HMBias} ($CD_{HM}-CD_{PH}$) est de -12.3nm, il est dû principalement à l'étape de réduction de côte résine. Quand à la gravure polysilicium, on mesure un $CD_{PolyBias}$ ($CD_{Poly}-CD_{HM}$) de -7.6nm, dû principalement à l'érosion du masque dur.

Le procédé 45nm présente, après gravure polysilicium, les mêmes dimensions de grille que ce soit pour les transistors p-Mos et n-Mos. On observe un léger effet de microloading Isolé/Dense de 1.1nm pour les transistors n-Mos, et 0.7nm pour les transistors p-Mos. La figure III-6 présente les images SEM des profils de grilles isolées et denses de transistor n-Mos et p-Mos.

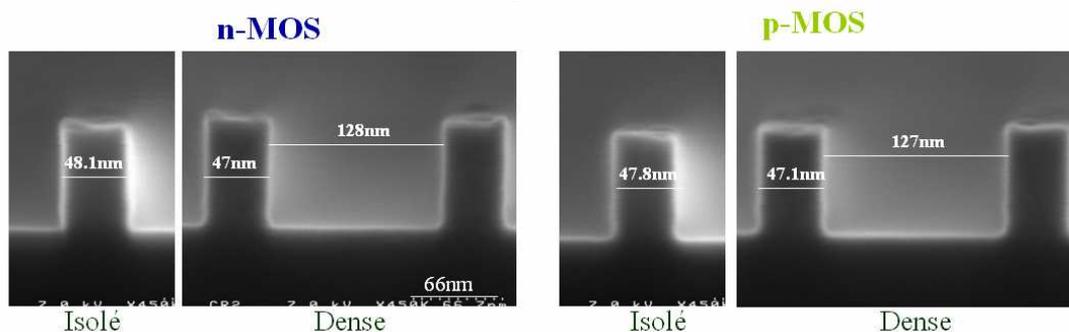


Figure III-6: Images SEM des profils de grilles isolé et denses pour transistors N-MOS et P-MOS.

III.2 Etude du procédé de gravure HM

Les paragraphes suivants décrivent les différentes études menées sur la gravure du HM (regroupant toutes les étapes présentées dans la section III.2.2 a)). Devant la complexité du procédé 45nm, il n'était pas possible d'évaluer tous les paramètres plasma de chaque étape de la gravure HM, nous nous sommes donc concentrés sur l'évaluation des étapes et des paramètres plasma qui étaient susceptibles de présenter le plus fort impact. Pour chaque expérience, nous avons réalisé les mesures suivantes :

- CD_{HMBias} ($CD_{HM}-CD_{PH}$)
- $CD_{PolyBias}$ ($CD_{Poly}-CD_{HM}$)
- $CD_{Bias\ Total}$ ($CD_{Poly}-CD_{PH}$)
- Rugosité LER de ligne sur des structures denses par mesure SEM en vue de haut sur les grilles
- Uniformité des dimensions (CD et LER).

Ces mesures ont été effectuées après photolithographie, après gravure HM ainsi qu'après gravure polysilicium sur les zones denses des mires scattérométriques (structures Mesdim cf. chapitre II) dans chacune des 66 puces présentes sur la plaque.

III.2.1 Impact de la température lors de la gravure HM

Comme nous l'avons vu dans le chapitre I, la physique des plasmas fait intervenir des phénomènes complexes, et l'interprétation des résultats obtenus peut devenir rapidement très difficile. Il est donc important d'évaluer, dans un premier temps, l'influence de paramètres dont l'effet est connu, c'est le cas de la température. La température du porte substrat de la Kiyō 45, étant modifiable de façon indépendante au centre et en bord, nous avons évalué l'augmentation de la température au centre de la plaque lors de toutes les étapes de la gravure HM. Une première plaque a été gravée avec une température centre/bord de 40/40°C (correspondant aux conditions standards), une seconde avec 45/40°C et une troisième avec 50/40°C.

Le tableau III-2 nous donne un récapitulatif des résultats sur la moyenne du CD_{HMBias} et $CD_{Bias\ total}$ ainsi que l'uniformité sur les plaques obtenus après gravure HM et après gravure polysilicium (statistiques obtenus sur 66 points de mesures sur la plaque)

		40°/40°C	45/40°C	50/40°C
Après gravure HM	CD_{HMBias} (nm)	-13.8	-14.4	-15.6
	3σ (nm)	2.4	3	4.3
Après gravure poly	$CD_{Bias\ total}$ (nm)	-20.4	-21.2	-22.3
	3σ (nm)	2.4	3.6	4.4

Tableau III-2: Récapitulatif des mesures CD_{HMBias} et $CD_{BiasTotal}$ moyen et uniformité obtenues à +/- 0.4nm pour des températures de gravure HM au centre/bord de plaque de 40/40, 45/40 et 50/40°C.

Dimension des motifs

La figure III-7 représente les dimensions de grille après gravure complète de la grille en fonction de la distance par rapport au centre.

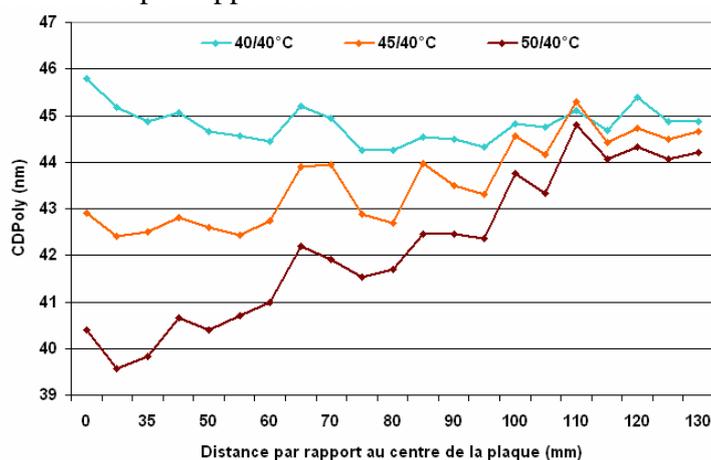


Figure III-7: Mesures CD_{Poly} (à +/- 0.4nm) en fonction de la distance par rapport au centre de la plaque, pour des températures de gravure HM centre/bord de plaque de 40/40, 45/40 et 50/40°C.

En faisant un calcul très simple, on peut voir que l'écart de 10°C au centre de la plaque va induire un CD final plus petit d'environ 5nm, soit 0.5nm/°C. Les effets de la température du substrat sur les polymères ont été largement étudiés⁶⁰. De plus

récentes recherches⁶¹ ont montré que le coefficient de collage des espèces passivantes se déposant sur les flancs des motifs dépendait de la température du substrat. En effet il y aura moins de redépôt des produits de gravure sur les flancs des grilles en augmentant la température du porte substrat. Utilisant des chimies passivantes lors de l'ouverture du masque dur, on peut donc expliquer la diminution de la dimension des motifs par une plus faible passivation des flancs due à l'augmentation de la température de la plaque.

Uniformité intraplaque:

L'augmentation de température ayant un impact fort sur les dimensions de grille comme nous venons de le voir, le fait d'avoir appliqué ce changement au centre de la plaque uniquement dégrade l'uniformité de la dimension des structures sur la plaque. En augmentant de 10°C la température au centre de la plaque, la non-uniformité double et passe de 2.4nm à 4.4nm en fin de gravure. La figure III-8 présente cette dégradation sous forme de cartographies des CD_{Poly} mesurées au SEM sur toutes les puces des plaques, pour des températures de gravure HM au centre de la plaque de 40, 45 et 50°C.

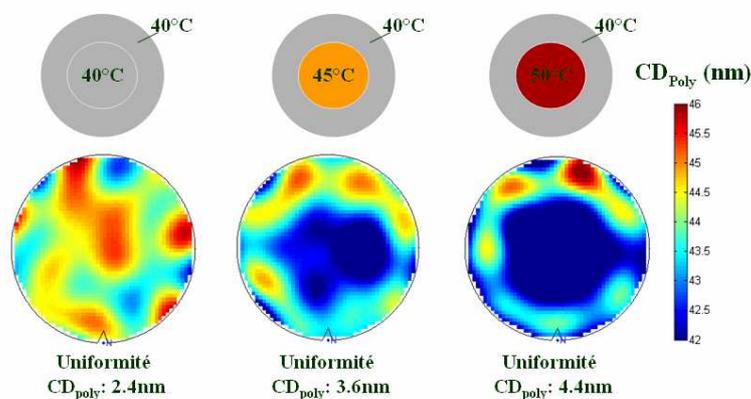


Figure III-8: Cartographies des CD_{Poly} sur les plaques gravées avec des températures de gravure HM au centre/bord de plaque de 40/40, 45/40 et 50/40°C.

Rugosité de ligne :

L'analyse des résultats n'a pas montré d'effet significatif de la température sur la rugosité de bord de ligne.

III.2.2 Etude paramétrique de l'étape de traitement résine : « Cure »

Il est important de rappeler que l'étape de traitement de la résine, également appelée étape de « cure », est utilisée pour améliorer les rugosités de ligne mais aussi afin de rendre la résine plus résistante aux procédés de gravure.

Des études effectuées par A.Bazin⁶² ont montré une modification des résines 193nm lors d'un traitement plasma par HBr, notamment une densification de celle-ci avec une graphitisation de la surface conduisant à des dimensions de motifs plus faibles que sans « cure ». Sur la technologie 65nm utilisant une intégration type masque dur, il a été montré que l'étape de cure permettait d'obtenir le même type de densification, il en résultait une dimension de grille plus petite et une rugosité moindre que sans cette étape de traitement. Par la suite, nous avons constaté sur la technologie 45nm, utilisant une résine à immersion, que le fait d'ajouter l'étape de cure entraînait une augmentation du CD ce qui était en contradiction avec les expériences précédemment faites sur le sujet.

a) Effet de l'ajout de l'étape de cure

Afin de comprendre ces observations, nous avons évalué le comportement de trois résines 193nm avec et sans étape de traitement résine HBr sur la technologie 45nm: une résine 193nm JSR utilisée pour le nœud technologique 65nm (la résine N°1) et deux résines à immersion, une résine Fuji étant la résine utilisée au début du développement de la technologie 45nm (résine N°2) et une résine Rhom and Haas utilisée par la suite en 45nm (résine N°3).

Bien que ces résines possèdent des compositions chimiques assez proches, le nombre de groupement protecteur, lactone ou polaire peut différer d'une résine à une autre. La figure III-9 présente la structure de base d'une résine 193nm avec un groupe protecteur permettant à la résine de mieux résister à la gravure, un groupement lactone contrôlant la température de transition vitreuse de la résine et un groupement polaire contrôlant l'adhérence de la résine.

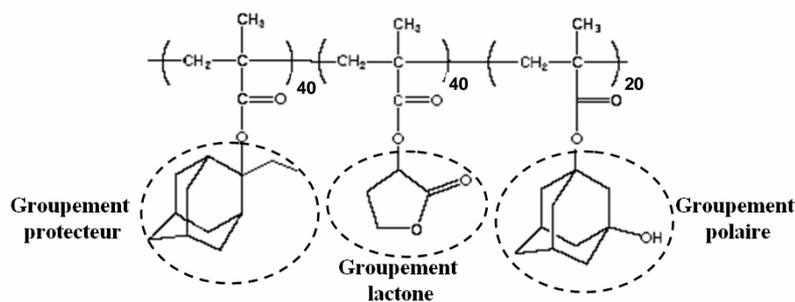


Figure III-9: Structure générale d'une résine 193nm

Dimension des motifs (CD_{HMBias}) et rugosité de ligne

La figure III-10 présente l'effet de l'ajout de l'étape de « cure » sur les dimensions des motifs HM ainsi que sur la rugosité de lignes des transistors mesurées au SEM en fonction des différentes résines.

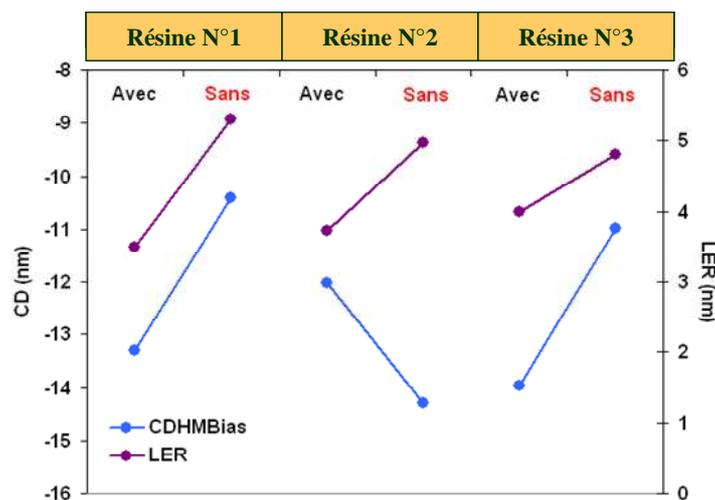


Figure III-10: Evolution du CD_{HMBias} et de la rugosité de ligne LER (à +/- 0.4nm) avec et sans étape de traitement résine sur 3 types de résine.

On remarque que, avec ou sans étape de traitement résine, les résines N°1 et N°3 se comportent de manière très similaire. Dans le cas de la résine N°2, si aucun traitement résine n'est appliqué, on va induire des dimensions de motifs plus petites (CD_{HMBias}

plus grand en valeur absolue). La rugosité est, quand à elle, améliorée de 1nm avec n'importe quelle résine.

Retrouvant en 45nm les mêmes résultats constatés sur la technologie 65nm pour la résine N°1, on peut en conclure que la différence de comportement observée sur la résine N°2 ne peut donc pas être attribuée à la différence de température entre le procédé 45 et celui du 65nm. On peut donc penser, que sans étape de « cure », la résine N°2 résiste moins bien que les autres résines aux étapes de gravure.

Des mesures SEM ont été, par la suite, effectuées juste après l'étape de réduction de cote résine avec et sans étape de traitement HBr de la résine N°2. Les résultats décrits dans la figure III-11 montrent que l'effet observé sur les dimensions de motifs, à savoir un CD plus important de 3-4nm avec le traitement par HBr, est déjà présent après l'étape de réduction de cote résine.

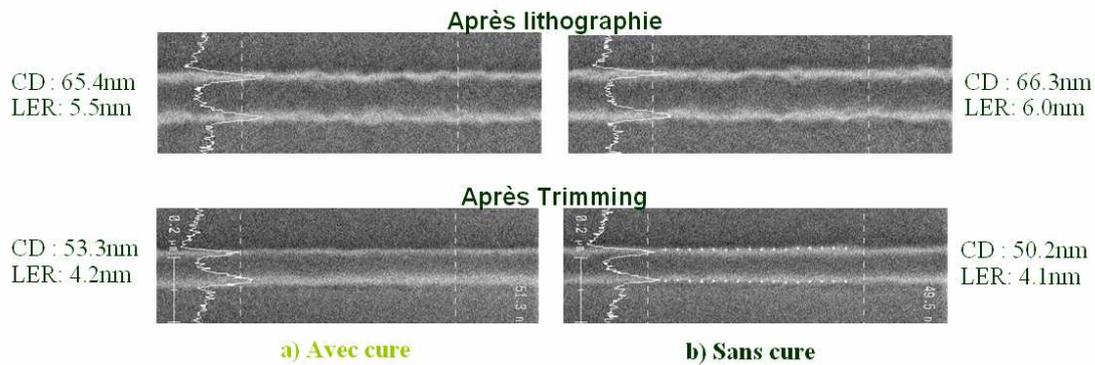


Figure III-11: Mesures CD et LWR après lithographie et après réduction de cote résine avec et sans traitement de la résine par plasma HBr au préalable.

Afin de poursuivre l'analyse de la résine N°2 nous avons fait varier le temps de « trimming » avec et sans traitement HBr, les résultats des mesures CD_{HMBias} (SEM) effectuées après gravure HM sont présentés dans la figure III-12.

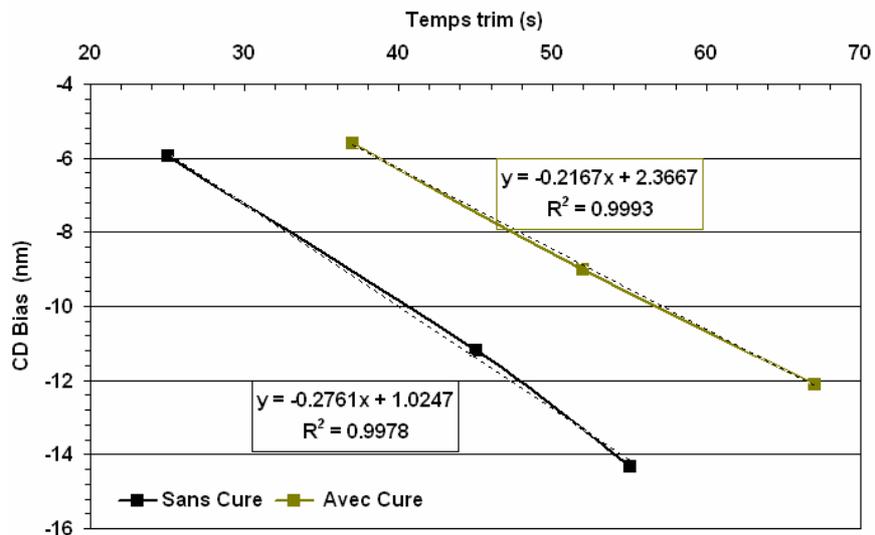


Figure III-12: Evolution du CD_{HMBias} (à +/-0.4nm) en fonction de différents temps de « trimming » de résine avec et sans étape de traitement résine.

Nous pouvons noter que la vitesse d'érosion de la résine est plus élevée lorsque l'on ne traite pas la résine N°2 (0.28nm/s au lieu de 0.22nm/s). Ce qui représente pour temps de trimming standard de 45s, une différence en CD de 2nm. Ces résultats sont

cohérents avec les travaux de recherche d'A. Bazin, à savoir qu'une résine 193nm traitée par plasma HBr résiste mieux aux étapes de gravure.

En résumé, on peut dire que la plus forte différence entre les résines est perçue lorsqu'elles ne sont pas traitées, la réduction de cote résine de la N°2 se fait beaucoup plus rapidement que pour les autres résines. Afin de compléter cette étude, on pourra, dans de prochains travaux, examiner plus précisément le procédé lithographique notamment les températures de recuit des résines afin de faire varier le degré de compaction des différentes résines.

Uniformité intraplaque:

En ce qui concerne l'uniformité sur les plaques, aucun effet significatif n'a été observé entre les plaques gravées avec et sans étape de cure, quelle que soit la résine utilisée. On obtient une uniformité 3sigma de 2nm environ.

La figure III-13 présente les cartographies des mesures CD_{HM} (SEM) effectuées sur toutes les puces des plaques ayant été gravées avec et sans cure pour la résine N°2.

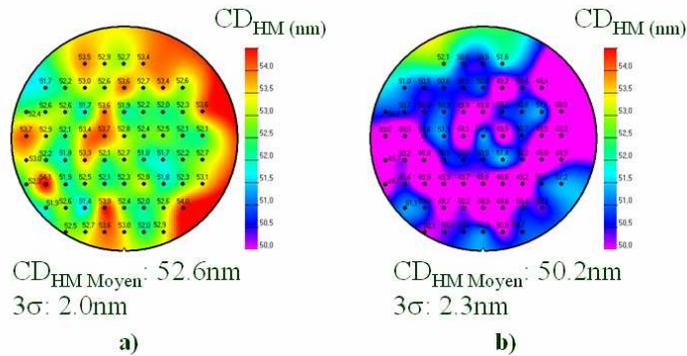


Figure III-13: Cartographie des CD obtenues après gravure HM avec a) et sans b) étape de cure de la résine N°2.

b) Influence du temps de l'étape de cure

On peut également se poser la question de la linéarité de l'impact du traitement HBr de la résine N°2 en fonction du temps de l'étape.

Dimension des motifs (CD_{HMBias}) et rugosité de ligne:

La figure III-14 nous montre l'évolution des CD_{HMBias} ainsi que celle de la rugosité LER mesurées au SEM après gravure HM en fonction du temps de traitement résine appliqué.

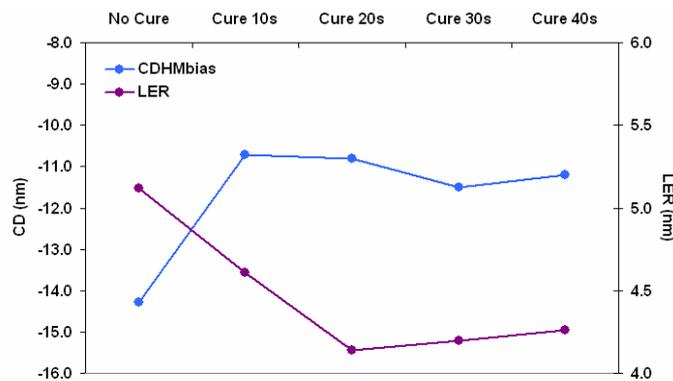


Figure III-14: Evolution du CD_{HMBias} et de la rugosité LER (à +/- 0.4nm) en fonction de différents temps de traitement résine.

Selon ces résultats, on peut faire la remarque que ce sont les 10 premières secondes du traitement de la résine qui impactent le plus les dimensions des motifs. En final, que ce soit pour 10, 20, 30 ou 40 secondes de traitement, nous obtenons une grille plus large de 3nm que sans traitement. En ce qui concerne la rugosité, on remarque qu'elle s'améliore et atteint un pallier à 4.2nm pour 20 secondes de temps de traitement résine. Les mêmes constatations ont été faites sur les mesures CD_{Poly} effectuées après gravure polysilicium.

Uniformité intraplaque:

L'uniformité intraplaque reste constante, autour de 2.2 à 2.4nm. Le temps de traitement résine n'a donc pas d'influence sur l'uniformité de la plaque.

c) Influence de la température pendant l'étape de « cure »

Afin d'évaluer l'effet de la température de l'étape de cure sur la résine N°2, nous avons augmenté la température du porte substrat de 40°C (valeur standard pour le procédé 45nm) à 60°C uniquement sur l'étape de cure.

Dimension des motifs (CD_{HMBias}) et rugosité de ligne:

Lors de l'étape de traitement de la résine, une augmentation de la température de 40°C à 60° induit une dimension de grille plus petite d'environ 1nm, comme nous le montre la figure III-15.

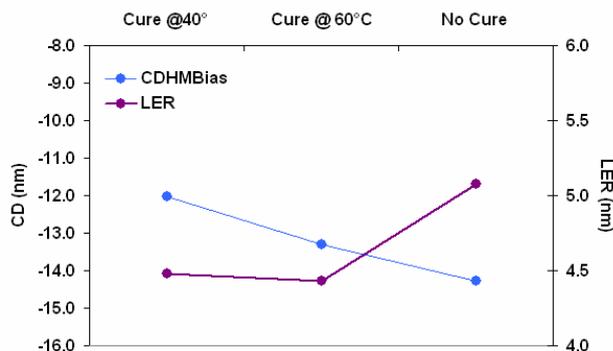


Figure III-15: Comparaison des CD_{HMBias} et de la rugosité LER pour des températures de traitement résine différentes (40°C et 60°C) et comparaison avec le procédé sans étape de traitement résine.

Le fait d'augmenter la température de 20°C n'a pas ou peu d'influence sur la rugosité de ligne. Les mêmes tendances ont été observées après la gravure du polysilicium.

Uniformité intraplaque :

On ne constate pas d'effet significatif sur l'uniformité de la plaque.

d) Influence de la pression, puissance source et débit de gaz HBr

Nous avons réalisé l'étude de l'influence de la pression, de la puissance source, et le débit de gaz HBr de l'étape de « cure » sur la résine N°3 (présentant un comportement plus « classique ») sous forme d'un plan d'expérience.

Choix du plan d'expérience

Afin de pouvoir évaluer les effets directs ainsi que certaines interactions d'ordre 2 nous avons choisi un plan fraction demi ($2^{3-1} = 4$ essais) et 3 points au centre du

domaine (étudié afin d’obtenir une bonne répétabilité), soit au total 7 essais. Le domaine d’étude est le suivant :

- Pression [a-1 ; a+1] Facteur A
- Puissance source [b-200 ; b+200] Facteur B
- Débit HBr : [c-20 ; c+20] Facteur C

Avec a, b et c étant les valeurs utilisées dans les conditions standards. Le tableau III-3 présente le récapitulatif des essais effectués.

	A	B	C
Plaque N°	Pression (mTorr)	TCP (Watt)	HBr (sccm)
1	a+1	b+200	c+20
2	a-1	b+200	c-20
3	a	b	c
4	a	b	c
5	a-1	b-200	c+20
6	a	b	c
7	a+1	b-200	c-20

Tableau III-3: Tableau représentant les différents essais du plan d’expérience effectué sur la pression, la puissance source TCP et le flux de HBr lors de l’étape de traitement de la résine.

Qualité du plan d’expérience:

Le tableau III-4 présente la matrice de corrélation entre les différents paramètres étudiés. Cette matrice est orthogonale ce qui signifie que les effets directs des paramètres ainsi que leurs interactions ont été évalués sans biais.

	(1)	(2)	(3)	(4)
(1) average	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
(2) A: Pressure	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
(3) B: TCP	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000
(4) C: HBr	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000

Tableau III-4: Matrice de corrélation des paramètres étudiés.

Analyse du plan d’expérience :

Le tableau III-5 présente les résultats CD_{HMBias} , $CD_{BiasTotal}$, d’uniformité (en pourcentage des CD_{HM}), et de rugosité de bord de ligne LER.

Plaque N°	CD_{HMBias} (nm)	Uniformity %	LER (nm)	$CD_{BiasTotal}$ (nm)
1	-10.9	1.1	4.3	-18.5
2	-12.0	1.2	4.2	-19.3
3	-10.4	1.3	4.3	-18.3
4	-10.5	1.3	4.4	-18.4
5	-10.0	1.1	4.4	-18.0
6	-10.5	1.4	4.5	-18.5
7	-10.5	1.1	4.5	-18.3

Tableau III-5: Récapitulatif des résultats obtenus sur le CD_{HMBias} et $CD_{BiasTotal}$, l’uniformité des CD (à +/- 0.4nm) sur la plaque après gravure HM et la rugosité LER lors du plan d’expérience.

Ainsi ces réponses ont été modélisées par le logiciel “Statgraphics”. Et voici l’analyse obtenue.

Dimension des motifs (CD_{HMBias}) :

L'étude de la réponse CD_{HMBias} nous montre qu'elle ne varie pas beaucoup en fonction des différents paramètres étudiés. Seule la puissance source (TCP) a un effet significatif sur les variations des dimensions de grille, une augmentation de la puissance source lors de l'étape de traitement résine aura pour conséquence d'augmenter le CD_{HMBias} en valeur absolue et donc de conduire à des valeurs de CD_{HM} plus petites (-0.83nm/400W). Le diagramme de Pareto obtenu pour la réponse sur le CD_{HMBias} est présenté dans la figure III-16.

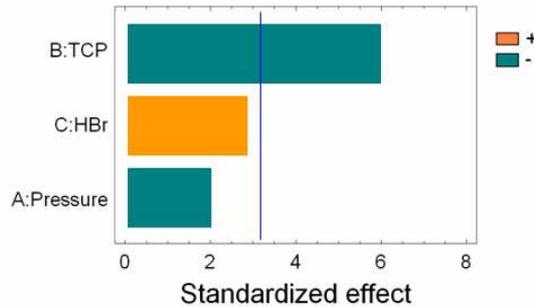


Figure III-16: Diagramme de Pareto standardisé donnant la significativité de l'influence de la puissance source, du débit HBr, et de la pression sur le CD_{HMBias} .

Rugosité de ligne et uniformité intraplaque:

L'uniformité et la rugosité LWR (ou LER) n'ont pas ou peu été impactées par les variations des paramètres plasma étudiés. Aucune des variations de paramètres ne semble significative comme le montrent les diagrammes de Pareto de la figure III-17.

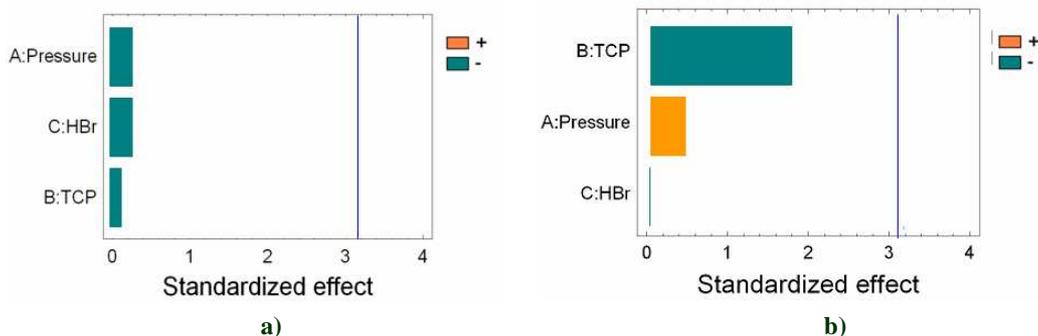


Figure III-17: Diagrammes de Pareto standardisés donnant la significativité de l'influence de la puissance source, du débit HBr, et de la pression sur a) l'uniformité b) la rugosité LER.

e) Résumé

Au travers de cette première étude, nous pouvons conclure que l'étape de traitement de la résine est une étape complexe et essentielle pour le procédé de gravure grille. Outre le fait qu'elle permette de diminuer la rugosité de bord de ligne de 1nm, nous avons montré que sans cette étape, le comportement, en termes de dimension des motifs, selon la résine utilisée est différent. En effet, la résine N°2 est érodée latéralement plus rapidement lors de l'étape de réduction de côte résine que la N°1 et 3. On peut penser qu'une différence de degré de compaction de la résine, lors des procédés de recuit en lithographie, est à l'origine de ce phénomène. Et le fait d'appliquer un plasma HBr reviendrait à uniformiser cette compaction.

Lors de cette étude, nous avons également pu définir quel était l'impact des différents paramètres utilisés lors de ce traitement, tel que le temps de traitement résine, la température, la pression, la puissance source et le débit de gaz HBr, sur les

dimensions des grilles, la rugosité de ligne et l'uniformité des dimensions sur la plaque. Le tableau III-6 nous en donne un résumé des effets observés sur le domaine d'étude présenté dans le tableau III-3.

	CD	Rugosité	Uniformité
Temps	+	-	Peu d'effet
Température	-	Peu d'effet	Peu d'effet
Pression	-	Peu d'effet	Peu d'effet
Puissance source	-	Peu d'effet	Peu d'effet
Flux HBr	+	Peu d'effet	Peu d'effet

Tableau III-6: Récapitulatif de l'influence des paramètres plasma étudiés lors de l'étape du traitement résine. Le signe + signifie qu'il y a augmentation et le signe - diminution du paramètres considéré.

III.2.3 Etude des étapes d'ouverture Darc, aC et TEOS

a) Rôle du CH₂F₂ lors de l'étape d'ouverture du Darc et du TEOS

Le CH₂F₂ est un gaz passivant qui joue un rôle essentiel dans l'anisotropie des gravures. Nous avons donc voulu évaluer quelle était son influence dans les étapes d'ouverture du Darc et de TEOS. La figure III-18 nous montre l'évolution des différents CD_{HMBias} et des temps de gravure pour des débits de CH₂F₂ de 20 à 40sccm dans le cas de l'ouverture du Darc (a) et de 0, 10 et 20 sccm lors de l'ouverture du TEOS (b).

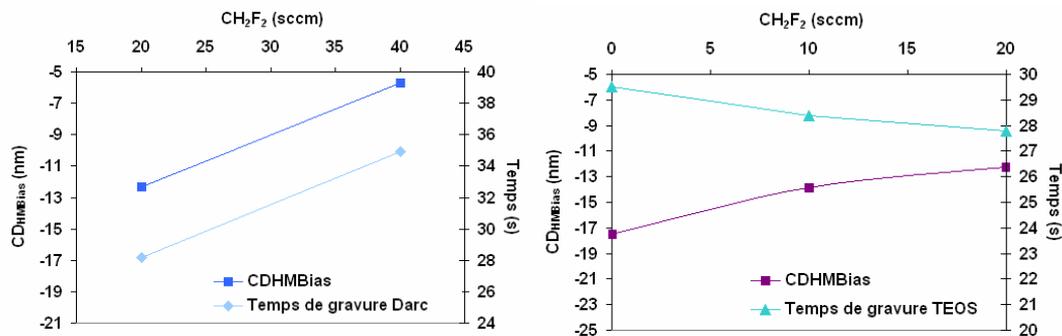


Figure III-18: Evolution du CD_{HMBias} et des temps de gravure en fonction du débit de CH₂F₂ lors de la gravure a) du Darc et b) du TEOS.

Dans le cas de l'ouverture du Darc, l'augmentation du débit de CH₂F₂ de 20sccm va induire des dimensions de motifs HM plus important de 6.7nm (0.3nm/sccm) et des temps de gravure plus long. La diminution de la vitesse de gravure du Darc peut être attribuée à la formation d'une couche de passivation plus importante en surface du Darc lors de la gravure. De plus le fait d'augmenter le débit de CH₂F₂, contribue à accroître le dépôt de CH_xF_y sur la résine 193nm⁶³ conduisant à une meilleure résistance de la résine à la gravure et à des motifs plus larges.

Dans le cas de l'ouverture du TEOS, le fait de diminuer le débit CH₂F₂ lors de l'ouverture du TEOS induit un CD_{HMBias} plus petit, environ -0.2nm par sccm de CH₂F₂. On remarque que les temps de gravure sont similaires.

Les images SEM des motifs HM en vue de dessus de la figure III-19, montrent que le profil des motifs TEOS a également évolué avec la diminution du débit de CH_2F_2 . Par différence de contraste, on constate un profil en pente (type triangle) si l'on ne met pas de CH_2F_2 , ceci peut être expliqué par une surgravure latérale du masque TEOS par le manque de passivation.

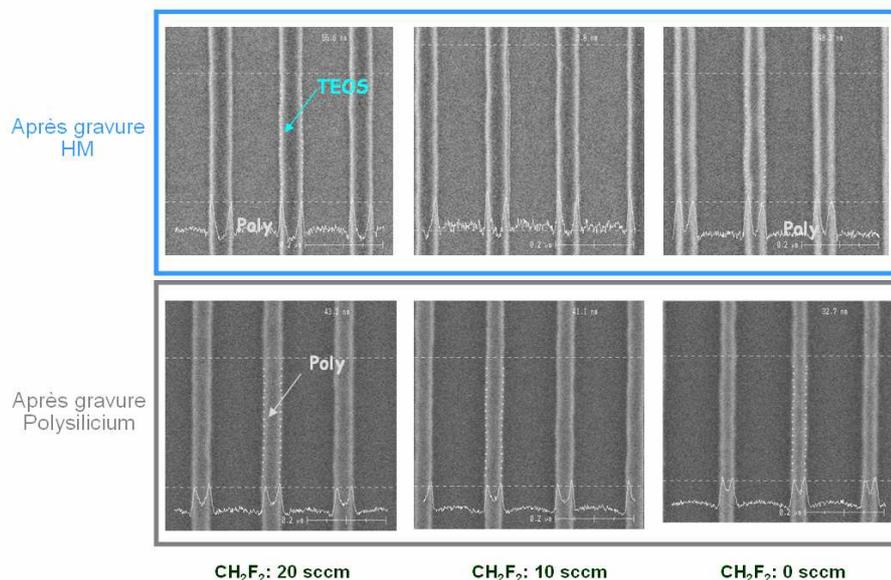


Figure III-19: Images SEM prises en vue de dessus après gravure HM (Haut) et Polysilicium (Bas) pour des débits de CH_2F_2 différents lors de l'ouverture TEOS.

Le fait de diminuer le CH_2F_2 lors de la gravure du TEOS entraîne une diminution des dépôts carbonés de type CF_x sur le TEOS, induisant une gravure latérale plus importante en CF_4 du TEOS et donc des dimensions plus faibles.

On notera également que le fait de diminuer le flux de CH_2F_2 lors de la gravure du TEOS va rendre le procédé moins sélectif au polysilicium sous jacent.

Rugosité et uniformité :

En ce qui concerne la rugosité et l'uniformité, on ne constate pas un effet significatif en faisant varier le débit de CH_2F_2 .

b) Influence des temps de gravure aC et TEOS

Afin d'évaluer l'influence de chaque étape sur les dimensions des motifs, nous avons établi un plan d'expérience faisant varier les pourcentages de surgravure (« Over Etch ») des étapes d'ouverture du carbone amorphe et du TEOS. Comme nous l'avons déjà indiqué dans le paragraphe III.1.2, ces surgravures ou « OE » sont définies en pourcentage de l'étape auxquelles elles se rattachent.

Pour le plan d'expérience, deux facteurs seront donc variables de 10 à 30 %

- OE aC : valeur standard à 20%
- OE TEOS : valeur standard à 20%

Choix du plan d'expérience

Au vu du nombre de facteurs à étudier un plan factoriel complet a été choisi, soit 4 essais. Nous avons ajouté 2 essais au centre du domaine d'étude afin de tester la

répétabilité des mesures. Ce plan va permettre de calculer, en plus de la constante, les 2 coefficients du terme de 1^{er} degré et l'interaction entre les deux facteurs. Le tableau III-7 présente les différents essais de ce plan d'expérience ainsi que le domaine d'étude de cette analyse.

	OE aC (%)	OE TEOS (%)
1	10	30
2	20	20
3	10	10
4	20	20
5	30	10
6	30	30

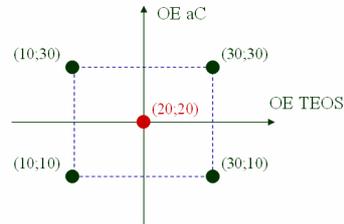


Tableau III-7: Récapitulatif des essais effectués lors du plan d'expérience et domaine d'étude choisi pour l'OE aC et TEOS.

Qualité du plan d'expérience

La matrice de corrélation du tableau III-8 est orthogonale ce qui permet d'estimer les effets des différents facteurs et leurs interactions sans biais.

	(1)	(2)	(3)	(4)
(1) average	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
(2) A: OE aC	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
(3) B: OE TEOS	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000
(4) AB	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000

Tableau III-8: Matrice de corrélation du plan d'expérience.

Analyse du plan d'expérience

Les résultats obtenus après gravure HM sur le CD_{HMBias} , l'uniformité en pourcentage du CD HM et la rugosité de bord de ligne LER (mesurés au SEM) sont résumés dans le tableau III-9.

	OE aC (%)	OE TEOS (%)	CD_{HMBias} (nm)	Uniformité CD (%)	LER (%)
1	10	30	-14	32	9.7
2	20	20	-14.7	24.5	9.2
3	10	10	-14.5	28.4	8.8
4	20	20	-14.9	26.3	10.3
5	30	10	-15.7	27	9.4
6	30	30	-17.1	23	10.4

Tableau III-9: Récapitulatif des résultats obtenus sur le CD_{HMBias} , l'uniformité des CD sur la plaque et la rugosité LER (à +/-0.4nm) après gravure HM lors du plan d'expérience.

Ainsi la modélisation de ces réponses par le logiciel "Statgraphics" a permis l'analyse décrite ci-après.

Dimension des motifs (CD_{HMBias}) et uniformité intraplaque:

Le modèle ainsi obtenu présente un coefficient de détermination ajusté R^2 de 84 % pour le CD_{HMBias} et de 60 % pour l'uniformité en pourcentage, c'est-à-dire que les effets retenus expliquent 84 % des variations du CD_{HMBias} et 60 % de la non uniformité.

Les deux diagrammes de Pareto de la figure III-20, montre que la surgravure de l'ouverture du carbone amorphe apparaît comme le seul effet significatif sur le CD_{HMBias} , avec environ 2.5nm pour 20% d'augmentation du temps de surgravure, soit environ 0.8nm/s. En revanche il n'y a pas vraiment d'effet significatif expliquant les variations sur l'uniformité sur la plaque.

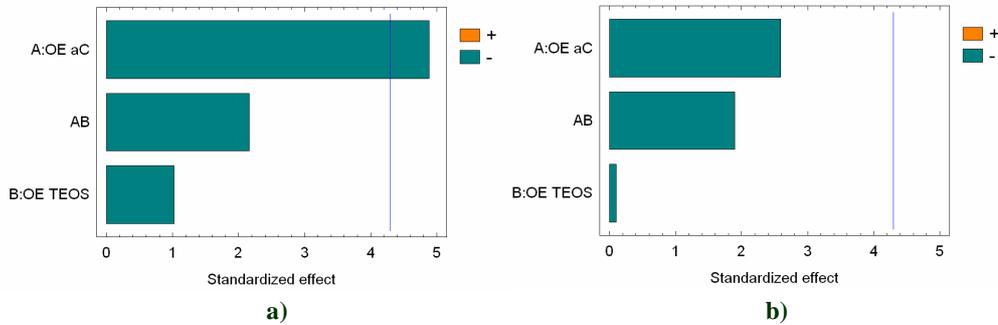


Figure III-20: Diagramme de pareto donnant la significativité de l'influence de l'OEaC et de l'interaction OE aC/OE TEOS sur a) le CD_{HMBias} , b) uniformité en % du CD_{HM} .

Rugosité de ligne :

En ce qui concerne la rugosité de bord de ligne, on n'observe pas de variation significative. Le diagramme de Pareto de la figure III-21 ne montre pas de facteur significatif. Aucun facteur étudié ici n'a donc d'impact sur la rugosité de ligne LER.

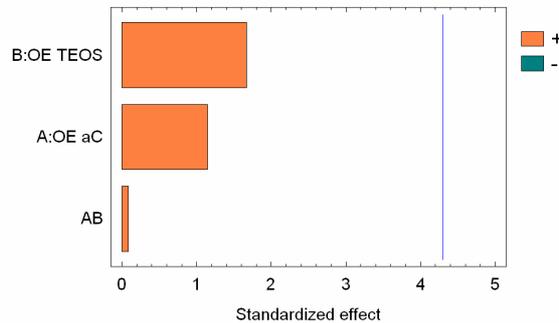


Figure III-21: Diagramme de Pareto standardisé sur la rugosité LER.

Les mêmes analyses peuvent également être faites sur les mesures CD_{Bias} après la gravure du polysilicium, les résultats sont présentés dans le tableau III-10.

	OE aC (%)	OE TEOS (%)	CD_{Bias} (nm)
1	10	30	-20.7
2	20	20	-21.6
3	10	10	-21.0
4	20	20	-21.7
5	30	10	-22.2
6	30	30	-23.6

Tableau III-10: Récapitulatif des résultats obtenus sur le $CD_{Bias Total}$ (à +/-0.2nm), l'uniformité des CD sur la plaque et la rugosité LER (à +/-0.4nm) après gravure polysilicium.

Le diagramme de Pareto pour le CD_{Bias} de la figure III-22, présente les mêmes résultats qu'après la gravure HM, c'est-à-dire que seule la surgravure du carbone amorphe apparaît comme un effet significatif.

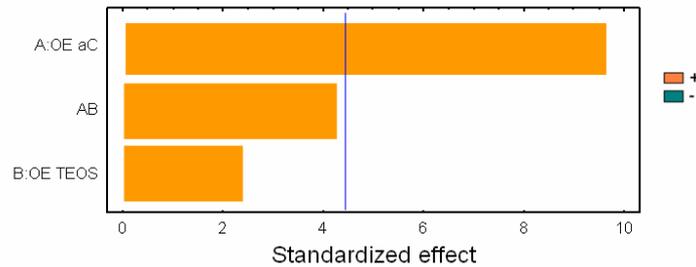


Figure III-22: Diagramme de Pareto standardisé donnant la significativité de l'influence de l'OEaC, de l'OE TEOS et de leur interaction sur sur le $CD_{BiasTotal}$

En résumé, cette étude nous a permis de montrer que l'étape de surgravure du carbone amorphe présentait une plus forte influence sur les dimensions des grilles que celle du TEOS. En effet le caractère physique de la gravure étant prépondérant lors de l'ouverture du TEOS, l'augmentation de la surgravure ne va donc pas avoir de conséquence sur les dimensions des grilles. Alors que dans le cas de l'ouverture du carbone amorphe, c'est le caractère chimique de la gravure qui est prépondérant et l'augmentation du temps de surgravure du carbone amorphe, conduit à une surgravure latérale du carbone, on va parler de « trimming » du carbone amorphe. Ainsi, lors de l'ouverture du masque dur TEOS, et surtout lors de la surgravure du TEOS il va y avoir une déprotection du haut de motifs conduisant à une surgravure du TEOS et donc des dimensions de motifs plus faible. Ce phénomène est schématisé dans la figure III-23.

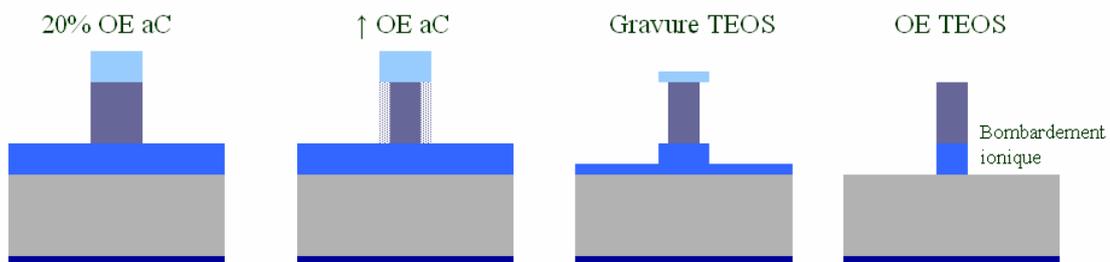


Figure III-23: Représentation du phénomène d'augmentation de l'OE aC.

III.3 Etude du procédé de gravure polysilicium

Dans ce paragraphe, nous avons étudié le procédé de gravure du polysilicium indépendamment des procédés d'ouverture du masque dur. Comme nous l'avons décrit au début de ce chapitre, cette gravure se déroule en trois grandes étapes :

- L'étape de gravure principale (BT+ME1) qui consiste à graver les trois quarts de la grille
- L'étape d'atterrissage (ME2) sur l'oxyde de grille, étape plus sélective et moins énergétique afin d'arriver en douceur sur l'oxyde pour ne pas l'altérer.
- L'étape de surgravure (OE), étape qui élimine les résidus de silicium encore présents sur l'oxyde de grille.

Lors de cette étude, nous nous sommes surtout intéressés à l'étape principale de la gravure, très importante car c'est elle qui détermine l'anisotropie de la gravure (profil et dimension).

III.3.1 Etude de l'étape de gravure principale du polysilicium (BT+ME1)

a) Etat de l'art de la gravure polysilicium

Pour les technologies dont la dimension de grille était supérieure à 90 nm, la gravure polysilicium était généralement réalisée par des chimies à base de Cl_2 , de HBr et de O_2 . Le Cl_2 et le HBr permettent en effet d'avoir une gravure rapide du polysilicium tout en gardant une grande sélectivité vis-à-vis de l'oxyde de grille. Avec la réduction en dimension des grilles, les équipementiers sont revenus à des plasmas fluorocarbonés comme les chimies en $\text{SF}_6/\text{CH}_2\text{F}_2$. Outre le fait que ces chimies étaient largement connues (car utilisés lors des débuts de la gravure polysilicium⁶⁴), elles présentent l'avantage de générer des couches de passivation CF plus uniformes et plus minces que pour les couches de passivation SiOCIBr , offrant ainsi de meilleures propriétés de microloading isolé/dense. L'autre avantage non négligeable d'utiliser des chimies $\text{SF}_6/\text{CH}_2\text{F}_2$ est qu'elles permettent de graver les transistors de type N et de type P avec la même vitesse de gravure ce qui n'était pas le cas jusqu'à présent. Les mécanismes de gravure mis en jeu lors de l'utilisation des plasmas fluorocarbonés ont été décrits par E.Kay^{65,66}. Ces travaux sont résumés dans la figure III-24.

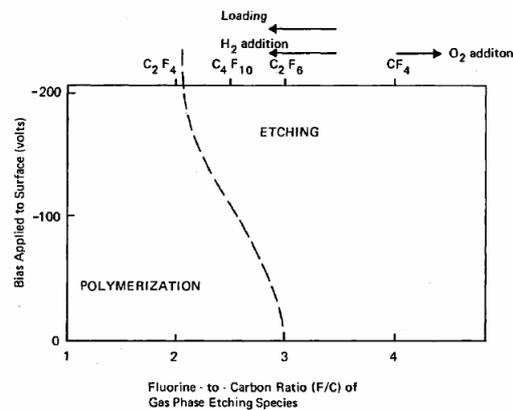


Figure III-24: Représentation de la limite entre la région de gravure et la région de polymérisation en fonction du ratio de fluor sur carbone et de la tension de polarisation appliquée au substrat.

Lors de la gravure du silicium, la forme des profils de gravure résulte de la vitesse de gravure verticale du silicium, de la vitesse de gravure latérale des motifs et du dépôt d'espèces passivantes sur les flancs de ces motifs. La limite entre gravure et polymérisation, ainsi que leur dépendance à la tension de polarisation appliquée au substrat peuvent être représentées qualitativement par le ratio C/F des espèces réactives du plasma.

L'atome de fluor est chimisorbé à la surface du silicium et pénètre dans les lacunes du polysilicium sur plusieurs monocouches. La probabilité d'adhésion d'un fluor sur un silicium fluoré (SiF , SiF_2 , SiF_3) pour former un SiF_4 augmente considérablement. Comme le fluor continue à se déposer en surface, les réactions continuent lentement et des composés fluorés volatils commencent à être produits (85% de SiF_4 et le reste

étant du SiF₂ et SiF). Lorsqu'il y a bombardement par des ions, la vitesse de gravure est accélérée (cf. section I.2.2 b)).

La polymérisation a plusieurs origines. Les espèces passivantes peuvent soit venir de la phase gazeuse du plasma (dépôt des produits de gravure ou condensation des espèces de la phase gazeuse) soit du redépôt d'espèces pulvérisées au fond des motifs de gravure. Pour le cas d'un plasma simple de CF₄, sous l'impact des collisions avec les électrons il va produire en majorité des atomes F, des ions CF₃⁺ et des radicaux CF_n (n=1, 2,3) ^{2,67}. Coburn et al ⁶⁸ ont montré que les CF₃⁺ sous bombardement ionique engendraient un dépôt carboné sur le silicium. L'autre source de dépôt de carbone provient des radicaux CF₃ qui vont être chimisorbés à la surface du silicium puis dissociés. Ces dépôts carbonés auront tendance à apparaître préférentiellement sur les zones ayant un faible bombardement ionique, comme les flancs des grilles. Ils représentent une barrière pour les neutres, et vont ralentir les réactions entre le fluor et le silicium, rendant la gravure des motifs plus anisotropes.

Dans le cas de la gravure du silicium par des chimies SF₆/CH₂F₂, des études ⁶⁹ ont montré que les espèces passivantes provenaient préférentiellement du redépôt d'espèces pulvérisées au fond du motif, conduisant à des couches de passivation uniforme sur les flancs.

Il est donc essentiel, dans la compréhension des mécanismes de gravure du polysilicium en chimie SF₆/CH₂F₂/N₂, de caractériser la couche de passivation et les éléments carbonés qui la composent.

b) Caractérisation de la couche de passivation

Épaisseur de la couche de passivation

Afin de déterminer l'épaisseur des couches de passivation lors de la gravure principale du polysilicium (BT+ME1), nous avons effectué des analyses en microscopie électronique à transmission (TEM pour Transmitted electron microscopy).

Protocole expérimental

Après avoir effectué les étapes BT et ME1 de la gravure polysilicium, nous avons déposé sur la grille, un film de polysilicium de 80nm afin d'encapsuler la couche de passivation et ainsi la protéger. Les couches de passivation sur les flancs étant très minces et donc non mesurables avec précision à partir des images TEM BF (champ clair), un contraste plasmon a donc été effectué (images faites avec les électrons ayant subi des interactions, lors de leurs passages dans le matériau, avec l'excitation collective du nuage d'électrons, les plasmons). Avec ce type d'imagerie, la luminosité du SiO₂ est 4 fois plus élevée que le silicium (mono ou polycristallin). La couche de passivation ayant été légèrement oxydée, lors de sa remise à l'air en sortie de la gravure, la mesure des intégrales de luminosité a permis d'en déduire son épaisseur.

Résultats

La figure III-25 présente les images en champ clair et par contraste plasmon des motifs après la gravure principale du polysilicium (BT+ME1). La couche de passivation est uniforme le long du flanc de la grille, son épaisseur est d'environ 1 nm. Au fond des motifs, la couche paraît plus mince de 0.7 à 0.8 nm. Ces mesures sont en accord avec les études faites par O. Luere ⁶⁹ dans le cas de la gravure du

polysilicium en SF_6/CH_2F_2 . Le fait que la couche soit uniforme, nous fait penser que le mécanisme de passivation est lié au dépôt d'espèces passivantes pulvérisées au fond du motif. En effet il ne peut s'agir de passivation provenant de la phase gazeuse car celle-ci serait non uniforme avec une accumulation de passivation en haut du motif (cf paragraphe I.2.3).

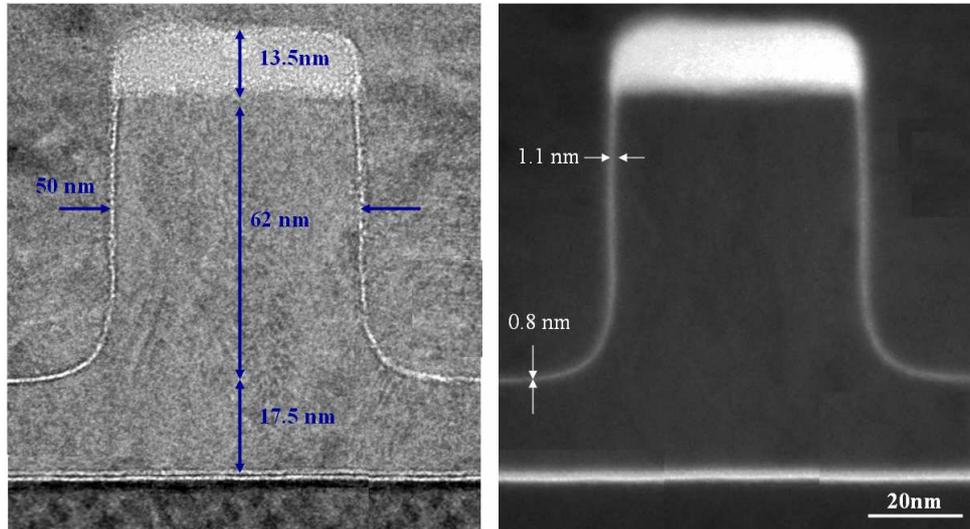


Figure III-25: Images TEM par a) champ clair et b) contraste plasmon du motif après la gravure principale du polysilicium (BT+ME1) dans les conditions standard du procédé grille 45nm.

Ces analyses ont été réalisées au centre et au bord de plaque. A partir des images TEM, des mesures CD, d'épaisseur de polysilicium gravé et restante ainsi que d'épaisseur de SiO_2 ont été effectuées et sont résumées dans le tableau III-11.

	CD (nm)	PolySi gravé (nm)	PolySi restant (nm)	HM restant (nm)
Centre	50	62	17.5	13.5
Bord	51	61	19	14.5

Tableau III-11: Mesures CD, d'épaisseur de polysilicium total et gravée, d'épaisseur du masque dur faites à partir des images TEM en champ clair (à +/- 0.4nm).

Ces mesures, dont la précision est de +/-0.2nm, montrent la bonne uniformité du procédé de gravure polysilicium centre/ bord, seule une différence de 1nm est perceptible entre les dimensions de grille. La gravure principale permet de graver environ 60nm de polysilicium tout en ayant un budget confortable de masque dur pour terminer la gravure en ME2 et OE.

Pour un temps de gravure de 32s, la vitesse de gravure verticale est de 1.92 nm/s pour le silicium, et de 0.66nm/s pour le SiO_2 (estimation en prenant pour épaisseur initiale 35nm), soit une sélectivité de 2.9.

Analyse chimique de la couche de passivation

Protocole expérimental

Afin de caractériser les grilles polysilicium et surtout la couche de passivation se formant lors de l'étape de gravure principale, nous avons réalisé des analyses XPS au

laboratoire du LTM. La technique d'analyse topographique chimique associée à la technique de chargement d'un matériau isolant par bombardement à l'aide d'un faisceau d'électrons, décrite dans la section II.2.2 d), nous a permis d'analyser la composition chimique des flancs des motifs.

Pour faire cette analyse nous avons utilisé un masque lithographique spécifique (cf. section II.4.1). Nous avons également dû modifier les épaisseurs de l'empilement utilisé avec un dépôt de 100nm de TEOS sur 130nm de polysilicium comme nous le montre la figure III-26. Cette adaptation de l'empilement a été réalisée afin d'obtenir après gravure des motifs d'environ 160nm de hauteur au total.

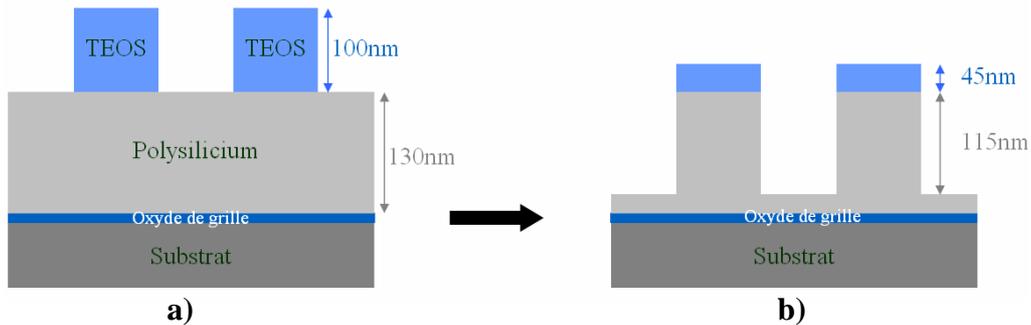


Figure III-26: Représentation des structures a) avant et b) après gravure du polysilicium.

De par la configuration des gaz disponibles sur le réacteur de gravure Centura300, le procédé de gravure a, lui aussi, dû être adapté (CHF_3 / SF_6 / N_2 / Ar / Pression/ Puissance source/ Puissance de polarisation/ Temps: 53s)

Afin de reproduire les conditions de procédé de gravure grille 45nm utilisé à STMicroelectronics, les parois du réacteur ont été recouvertes d'un dépôt SiOCl développé par le laboratoire (cf. paragraphe III.3).

Les analyses angulaires ont été faites selon 8 angles, ainsi les 60° de collection sont divisés en 8 secteurs, qui collecteront chacun les photoélectrons sur un secteur angulaire de 7.5° . La figure III-27 présente les différentes zones analysées par XPS, à savoir les flancs et le fond des motifs de polysilicium et le masque dur SiO_2 .

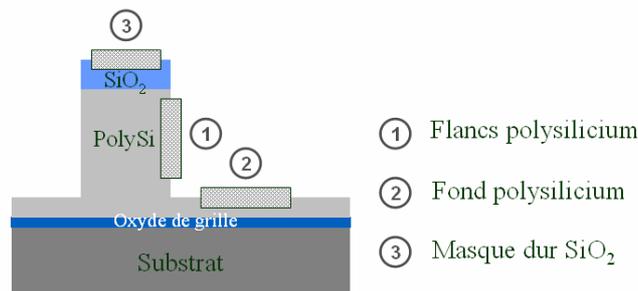


Figure III-27: Représentation schématique des différentes zones analysées par XPS (Flancs, fond et sommet des motifs).

La composition chimique du fond des motifs a été réalisée sur la zone ouverte de polysilicium du masque, celle du SiO_2 sur la zone ouverte masque. Pour déterminer la composition chimique des flancs des grilles, nous avons utilisé une zone motifs de 160nm de hauteur (40nm de SiO_2 sur 120 nm de polysilicium) et espacés de 160nm.

De par la configuration géométrique des motifs, l'angle de collection 53.75° ($\pm 3.75^\circ$) correspond au signal provenant des flancs de grille et du masque dur TEOS. La figure III-28 présente le profil des motifs utilisés pour cette analyse après la gravure principale du polysilicium. Sont également représentées les différentes surfaces analysées sur les motifs selon l'angle de collection.

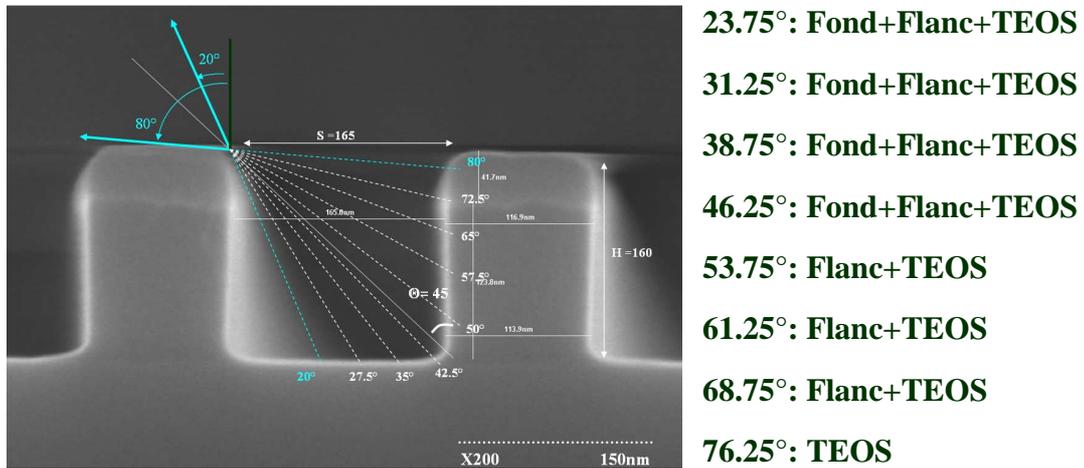


Figure III-28: Image SEM présentant la correspondance entre l'angle de collection du signal XPS et les surfaces des motifs analysés pour des structure de 117nm espacées de 160nm et de hauteur 160nm.

Grâce au potentiel de surface se formant sur le masque dur SiO_2 lors de la mise en route du canon à électrons, nous avons pu discriminer les contributions provenant des flancs de celles provenant du masque dur (cf. figure III-33).

Quantification

Les quantifications ont été obtenues à partir des aires des pics et de leurs facteurs de Scofield respectifs (correspondant à la section efficace de photo-ionisation de l'orbitale correspondante). Des facteurs correctifs intégrant les caractéristiques instrumentales de transmission et d'efficacité de détection entrent également dans le calcul des quantifications. Pour une source aluminium les facteurs de Scofield des éléments que nous cherchons à quantifier sont résumés dans le tableau III-12.

Pics	Si2p	S2s	C1s	N1s	O1s	F1s
Facteur de Scofield	0.817	1.43	1	1.8	2.93	4.43

Tableau III-12: Facteurs de Scofield des orbitales des éléments analysés pour une source aluminium.

La figure III-29 présente la composition chimique du masque dur, du fond et des flancs des motifs de polysilicium.

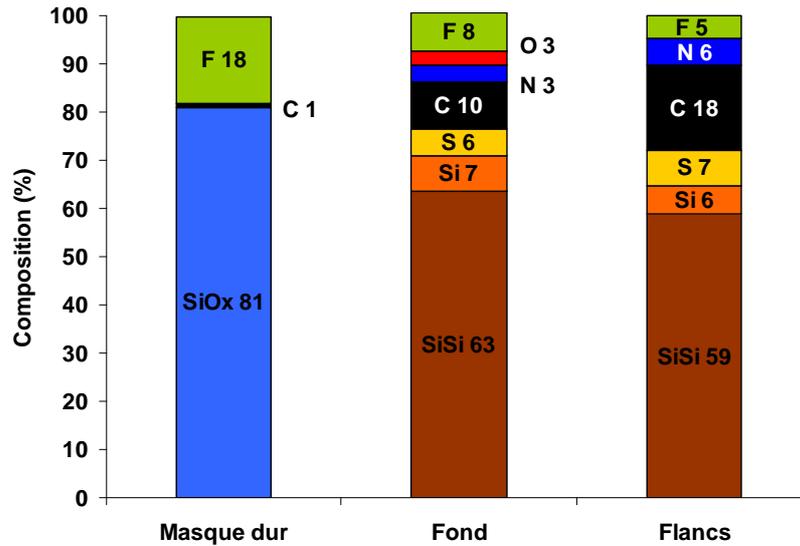


Figure III-29: Composition chimique (en %) des différentes zones analysées par XPS (Masque dur, fond et flancs des motifs) après gravure du polysilicium en $SF_6/CHF_3/N_2/Ar$.

Nous pouvons tout d'abord remarquer le faible écrantage des substrats dans les 3 cas, ceci montre que les couches réactives formées sont assez minces. La nature chimique de ces couches réactives est différente en surface du silicium Si et de l'oxyde SiO_2 . On ne trouve pas d'éléments soufre et azote dans la couche réactive du masque dur, alors qu'environ 6% et 5% sont respectivement présents sur les surfaces du polysilicium. On remarque une forte concentration en fluor (18%) et très peu de carbone (1%) sur le masque dur. Les couches réactives du fond et des flancs des motifs apparaissent assez similaires. On notera tout de même 3% d'élément oxygène au fond des motifs et une plus forte concentration d'éléments carbone sur les flancs, 18% contre 10% au fond des motifs.

Afin de comprendre le mécanisme de passivation intervenant sur le polysilicium nous allons approfondir l'analyse du fond et des flancs des motifs.

Composition chimique du fond des motifs : Analyse de la zone ouverte polysilicium du masque

L'ensemble des pics XPS obtenus ainsi que leur position en énergie et leur quantification sont résumés dans le tableau III-13 et sont en accord avec la littérature^{70,71,72,73}.

Le signal provenant du substrat est identifié sur le spectre XPS Si2p par un pic à 99.2eV correspondant aux liaisons Si-Si. L'oxygène probablement présent sous forme de SiOx, est identifié sur le spectre Si2p par un pic à 102.8eV et sur le spectre O1s par un pic à 532.7eV.

L'élément soufre lié à du silicium sous forme Si-S est identifiable sur le spectre S2s par un pic à 226.7eV et sur le spectre de Si2p par un pic à 100.6eV.

Dans la couche carbonée, on identifie les composantes C-Si, C-C, CCF/CN, C-F, CF_2 , CF_3 , à 283.9, 284.7, 286.6, 288.0, 290.4, 292.4 eV respectivement sur le spectre C1s.

Les CN présents sous forme d'hybridation sp^3 , sont identifiables dans le spectre N1s par 2 pics, à 398.7eV et à 400.6eV⁷⁴. Les CF de la couche carbonée sont présents sur le pic F1s par un pic à 687eV.

	Si2p			S2s	C1s						N1s		O1s		F1s
Energie liaison (eV)	99.2	100.6	102.7	226.7	283.9	284.7	286.6	288.0	290.4	292.4	398.7	400.6	532.7	534.3	687.0
Quantification %	63.2	3.7	3.7	5.7	3.6	4.2	0.8	0.9	0.2	0.0	2.7	0.7	2.3	0.7	7.8

Tableau III-13: Tableau récapitulatifs des pics XPS détectés sur la région du Si2p, S2s, C1s, N1s, O1s et F1s.

Grâce aux variations d'intensités relatives des pics en fonction des 8 angles de l'acquisition des spectres XPS, nous avons pu, par le logiciel commercial Angle Resolved Processing de « VG Scientific », estimer l'épaisseur des couches de passivation au fond des motifs à environ 1nm ce qui est en bonne adéquation avec les mesures faites à partir des images à contraste plasmon de la figure III-25.

La composition chimique de la couche réactive présentant un fort pourcentage d'élément carbone, nous avons voulu voir l'évolution de cette couche réactive en diminuant le rapport SF_6/CHF_3 de 15/40 à 10/45. La figure III-30 présente l'évolution de la composition chimique du fond des motifs en polysilicium en fonction du rapport SF_6/CHF_3 (quantifications réalisées en sommant tous les angles de collection).

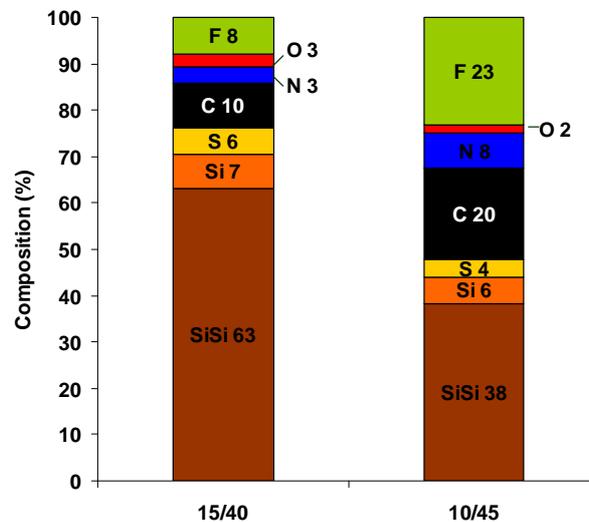


Figure III-30: Composition chimique (en %) des zones ouvertes de polysilicium après gravure en $SF_6/CHF_3/N_2/Ar$ en fonction du rapport de débit SF_6/CHF_3 : 15/40 et 10/45.

En diminuant le rapport des débits SF_6/CHF_3 de 15/40 à 10/45, on constate que le signal provenant du substrat (liaison Si-Si) est plus fortement écranté à cause de l'augmentation des espèces carbonées, fluor et azote dans la couche réactive du fond des motifs. L'examen des spectres C1s du carbone présentés dans la figure III-31, montre que la diminution du rapport des débits SF_6/CHF_3 entraîne une augmentation des fluorocarbones CF, CF_2 et CF_3 mais également des CN.

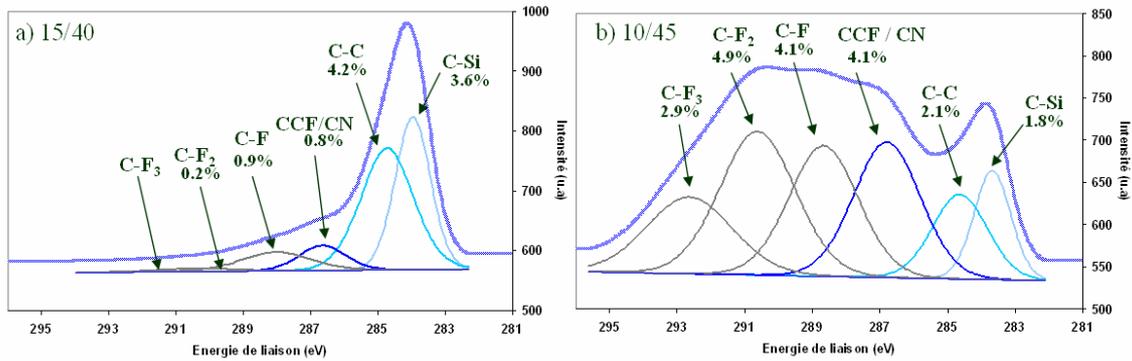


Figure III-31: Détail des spectres C1s issus de l'analyse XPS des zones ouvertes de polysilicium après gravure en SF₆/CHF₃/N₂/Ar en fonction du rapport de débit SF₆/CHF₃, a) 15/40 et b) 10/45.

Composition chimique des flancs des grilles : quantifications obtenues selon l'angle de collection 53.75° (+/- 3.75°) à partir des pics non décalés

Comme nous l'avons dit précédemment, l'analyse chimique des flancs de grille a été réalisée en éliminant les contributions provenant du masque dur. Les pics provenant du masque ont été discriminés de ceux provenant des flancs par l'application d'un faisceau d'électrons créant un potentiel en surface du SiO₂ et décalant les pics vers des énergies de liaisons plus faibles. Le détail des spectres Si2p, F1s, C1s, N1s, S2s avec et sans application du faisceau d'électrons est présenté dans la figure III-32.

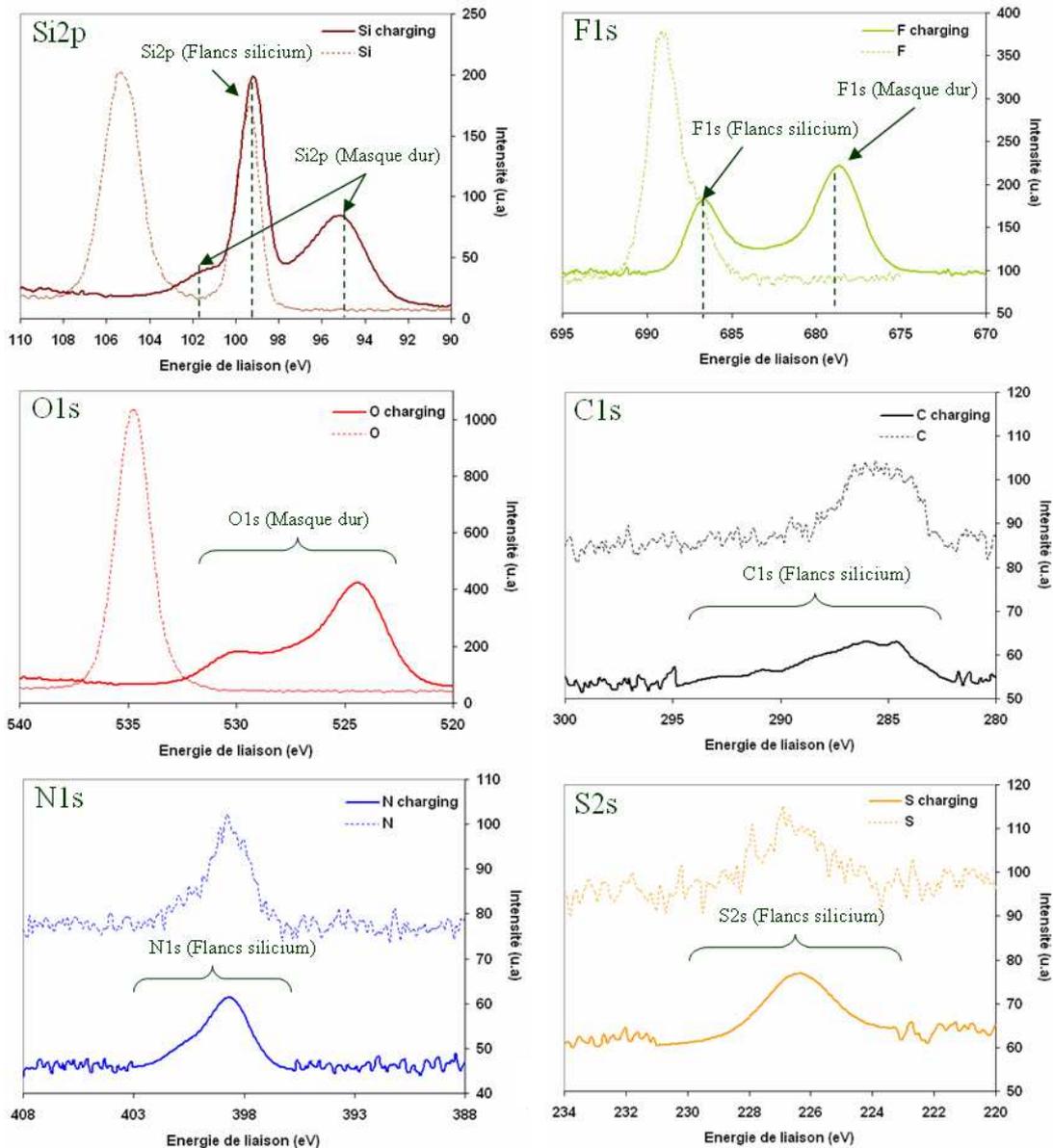


Figure III-32: Spectres XPS obtenus sans et avec le chargement du masque dur par le canon à électron des éléments: Si2p, F1s, O1s, C1s, N1s, S2s.

Seuls les spectres Si2p, F1s et O1s, semblent être impactés par l'effet du potentiel, on peut donc en conclure que le masque dur contient peu ou pas de carbone, d'azote et de soufre sur sa couche réactive, ce qui est en accord avec les mesures XPS de la zone ouverte du masque présentées dans la figure III-29. Afin de déterminer la composition chimique des flancs, seuls les pics attribués au polysilicium ont été pris en compte dans la quantification.

L'ensemble des pics XPS obtenus ainsi que leur position en énergie et leur quantification sont résumés dans le tableau III-14. Les spectres XPS détectés sur les flancs du motif sont similaires à ceux détectés au fond des motifs à l'exception de l'oxygène qui n'est pas présent. On remarque également un plus fort pourcentage d'éléments carbonés, présents là encore sous forme CF, CF₂, CF₃ et CCF/ CN.

	Si2p		S2s	C1s						N1s		F1s
Energie liaison (eV)	99.2	100.4	226.4	283.7	284.9	286.6	288.2	290.3	292.8	398.7	400.4	687.4
Quantification %	58.8	5.9	7.2	2.0	4.0	3.8	3.6	2.0	2.4	5.2	0.6	4.56

Tableau III-14: Energie de liaison des composantes des flancs de grille polysilicium gravé par un plasma de SF₆/CHF₃/N₂/Ar.

Les analyses XPS faites en bord de plaque sont similaires à celles faites au centre en ce qui concerne la composition des couches de passivation.

Dans les mêmes conditions que précédemment, nous avons évalué l'impact de la diminution du rapport SF₆/CHF₃ sur la couche réactive des flancs des motifs. La figure III-33 présente l'évolution de la composition chimique des flancs de grille polysilicium en fonction du rapport SF₆/CHF₃.

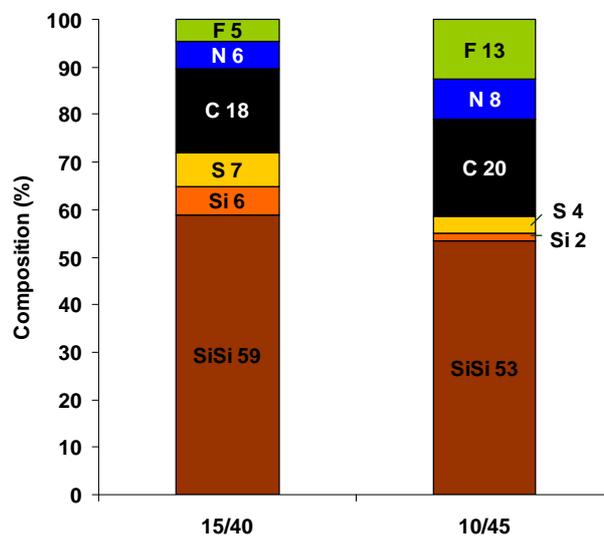


Figure III-33: Composition chimique (en %) des flancs de polysilicium après gravure en SF₆/CHF₃/N₂/Ar en fonction du rapport de débit SF₆/CHF₃ : 15/40 et 10/45.

La comparaison des compositions chimiques montre que le fait de diminuer le rapport SF₆/CHF₃ permet de créer une couche réactive plus riche en fluorocarbonate, mais l'impact est moins important que dans le cas du fond de motif car le signal provenant du substrat (liaison Si-Si) est très peu écranté. L'examen des spectres C1s du carbone présentés dans la figure III-34, montre une augmentation des espèces CF, CF₂ au détriment des CC et CSi.

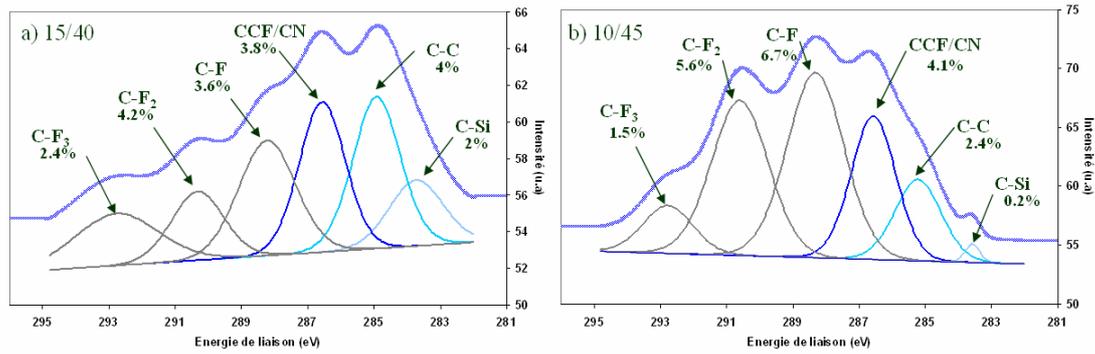


Figure III-34: Détail des spectres C1s issus de l'analyse XPS des flancs de polysilicium après gravure en SF₆/CHF₃/N₂/Ar en fonction du rapport de débit SF₆/CHF₃, a) 15/40 et b) 10/45.

Cet enrichissement en espèces fluorocarbonées de la couche réactive se traduit par une plus forte passivation sur les flancs, entraînant un ralentissement de l'attaque latérale du polysilicium et donc des dimensions CD plus élevées: 125nm pour les grilles gravées avec le rapport SF₆/CHF₃ de 10/45 et 117 nm pour celles gravées avec le rapport 15/40. Les profils vont également être impactés, comme le montre la figure III-35, une passivation plus importante des flancs de grille va rendre les profils pentus.

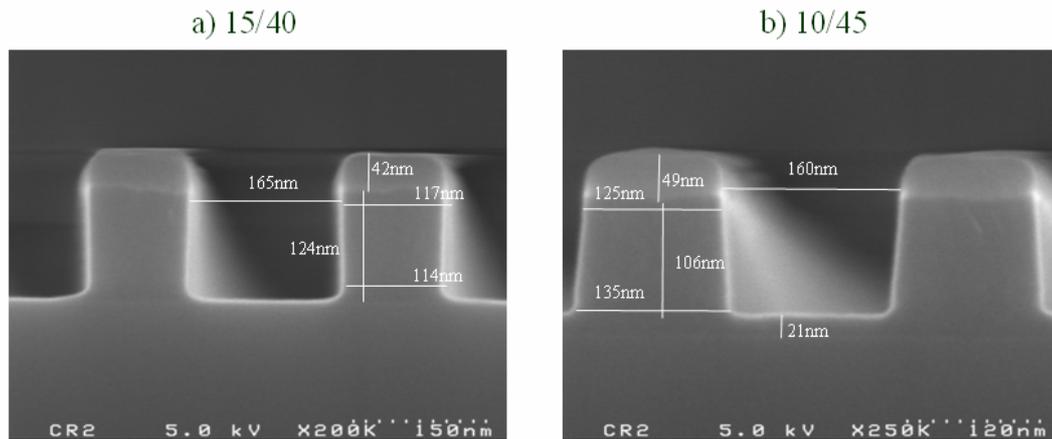


Figure III-35: Profils de grille obtenue après gravure en SF₆/CHF₃/N₂/Ar en fonction du rapport de débit SF₆/CHF₃, a) 15/40 et b) 10/45.

c) Vitesses de gravure verticale et sélectivité

Grâce aux mesures ellipsométriques des épaisseurs de polysilicium et de SiO₂ (structures TBox) effectuées sur le masque C45Lynx, nous avons pu évaluer les vitesses de gravure du polysilicium et du masque dur SiO₂, lors de l'étape de gravure principale (dans les conditions standard du procédé). Afin d'évaluer l'uniformité de la gravure, ces mesures ont été répétées sur 17 puces de la plaque. Les vitesses de gravure, ainsi que leur uniformité (3sigma) sont présentées sous forme de cartographies dans la figure III-36.

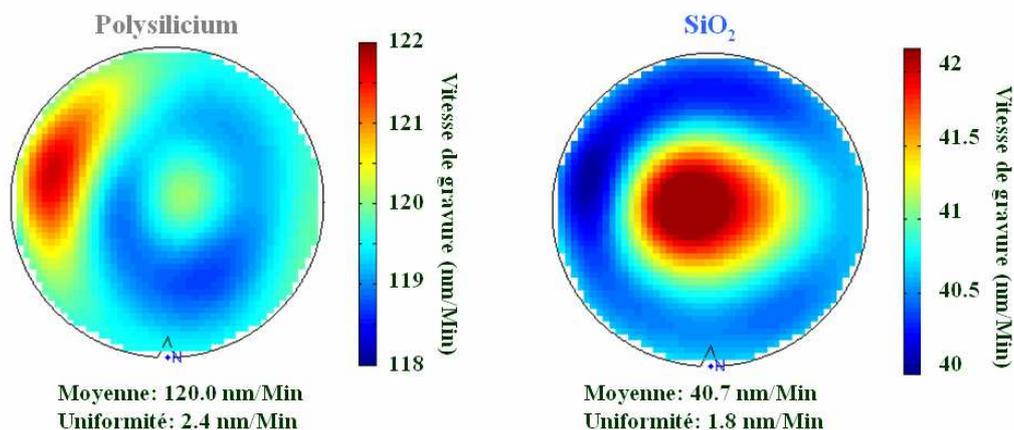


Figure III-36: Vitesses de gravure du polysilicium et du masque dur SiO₂ lors de la gravure principale en SF₆/CH₂F₂/N₂/He.

La vitesse de gravure verticale du polysilicium est de 120nm/min alors que l'oxyde SiO₂ de 40.7nm/min, représentant une sélectivité de 2.9 du polysilicium par rapport à l'oxyde. On notera que la sélectivité obtenue sur zone ouverte (TBox) est similaire à celle estimée à partir des images TEM de la figure III-25.

d) Influence des paramètres du plasma

La gravure principale de la grille polysilicium est complexe dans sa conception, elle fait intervenir un gaz de gravure le SF₆, des gaz polymérisant le CH₂F₂ et N₂ et un gaz homogénéisant He.

Etant limité par le nombre de plaques disponibles pour l'étude des paramètres plasma, nous avons opté pour une étude de cinq des principaux paramètres par un plan d'expérience: la pression qui aura une influence sur le libre parcours moyen, la puissance source (TCP) qui va intervenir sur la densité des espèces, la tension de polarisation (Bias) qui va contrôler l'énergie des ions, les débits massiques CH₂F₂ et N₂ jouant un rôle important lors de la passivation. Le tableau III-15 présente les différents paramètres étudiés ainsi que le domaine d'étude réalisé.

Paramètres	LB	Valeurs standard	LH
A: Pression (mTorr)	a-1	a	a+1
B: TCP (Watt)	b-50	b	b+50
C: Bias (V)	c-10	c	c+10
D: CH ₂ F ₂ (sccm)	d-4	d	d+4
E: N ₂ (sccm)	e-5	e	e+5

LB: Limite Basse LH: Limite Haute

Tableau III-15: Domaine d'étude du plan d'expérience.

Nous avons fait varier les valeurs des paramètres autour de leur point de fonctionnement. La pression varie de 2 mTorr, la puissance source de 100 Watt, la tension de polarisation de 20 V, les débits de CH₂F₂ de 8 sccm et celui de N₂ de 10 sccm.

Choix du plan d'expérience

Afin de pouvoir évaluer les effets directs ainsi que les interactions d'ordre 2 (hormis les interactions carré) nous avons choisi un plan comprenant 16 essais et 3 points au centre du domaine étudié pour tester la répétabilité de notre procédé, soit au total 19 essais. Le tableau III-16 présente le récapitulatif des essais effectués lors de ce plan d'expérience répartis de façon aléatoire.

	A	B	C	D	E
Plaque N°	Pressure (mTorr)	TCP (Watt)	Bias (V)	CH ₂ F ₂ (sccm)	N ₂ (sccm)
1	a-1	b+50	c+10	d-4	e+5
2	a+1	b+50	c-10	d+4	e-5
3	a+1	b+50	c-10	d-4	e+5
4	a-1	b-50	c-10	d-4	e+5
5	a+1	b+50	c+10	d-4	e-5
6	a	b	c	d	e
7	a+1	b-50	c+10	d-4	e+5
8	a	b	c	d	e
9	a-1	b+50	c-10	d+4	e+5
10	a+1	b+50	c+10	d+4	e+5
11	a-1	b-50	c+10	d-4	40
12	a+1	b-50	c+10	d+4	e+5
13	a-1	b+50	c-10	d-4	e-5
14	a-1	b-50	c+10	d+4	e+5
15	a	b	c	d	e
16	a-1	b+50	c+10	d+4	e-5
17	a-1	b-50	c-10	d+4	e-5
18	a+1	b-50	c+10	d+4	e-5
19	a+1	b-50	c-10	d-4	e-5

Tableau III-16: Plan d'expérience généré par le software "statgraphics"

Cinq réponses ont été analysées lors de ce plan d'expérience :

La *dimension de la grille* ($CD_{BiasPoly}$) : correspondant à la différence entre la dimension mesurée après la gravure du polysilicium et celle mesurée après gravure de masque dur. Cette dimension nous renseigne sur la vitesse latérale de gravure.

L'*uniformité en %* : correspondant à l'uniformité sur la plaque en pourcentage du $CD_{BiasPoly}$ moyen.

La *rugosité LER* : Rugosité moyenne mesurée sur toute la plaque par SEM.

Le *temps de détection de fin d'attaque du ME1*: Temps relevés lors de la gravure des grilles polysilicium. Le temps de ME1 va nous renseigner sur la vitesse de gravure verticale.

Cette étude a été réalisée sur le procédé de gravure principale du polysilicium mais les mesures ont, elles, été effectuées après la gravure complète de la grille. En effet nous nous intéressons principalement à la mesure du CD final. De plus le passage de l'étape de gravure principale à l'étape d'atterrissage est visible sur les profils, il sera donc plus facile de juger de la qualité de la gravure avec les trois étapes de gravure.

Qualité du plan d'expérience

La matrice de corrélation est diagonale jusqu'au terme d'ordre 2, donc il n'y a pas de biais sur l'estimation des interactions d'ordre 2, par contre les effets des carrés des paramètres et les interactions supérieures à l'ordre 2 ne pourront pas être analysés.

Analyse du plan d'expérience

Dimension de la grille ($CD_{BiasPoly}$):

Après simplification du modèle nous avons obtenu le diagramme de Pareto présenté dans la figure III-37, expliquant plus de 99% de la variabilité observée sur le $CD_{BiasPoly}$.

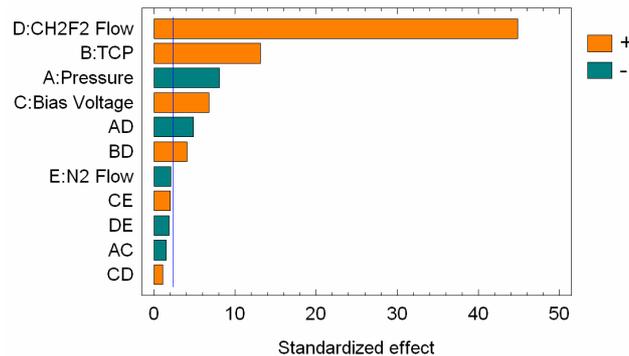


Figure III-37: Diagramme de Pareto montrant l'impact des différents paramètres étudiés et de leurs interactions sur les variations du $CD_{BiasPoly}$.

Sur le domaine d'étude, l'analyse de ce diagramme de Pareto montre que, le changement qui va le plus modifier la dimension de grille est le débit massique de CH_2F_2 . La puissance source, la pression ainsi que la tension de polarisation ont eux aussi un effet significatif mais moins important. L'effet direct du débit de N_2 n'apparaît pas comme significatif sur le $CD_{BiasPoly}$. On notera également que les interactions de la pression et du débit de CH_2F_2 ainsi que la puissance source avec le CH_2F_2 sont également significatifs.

La figure III-38 présente l'impact des différents paramètres étudiés sur le $CD_{BiasPoly}$.

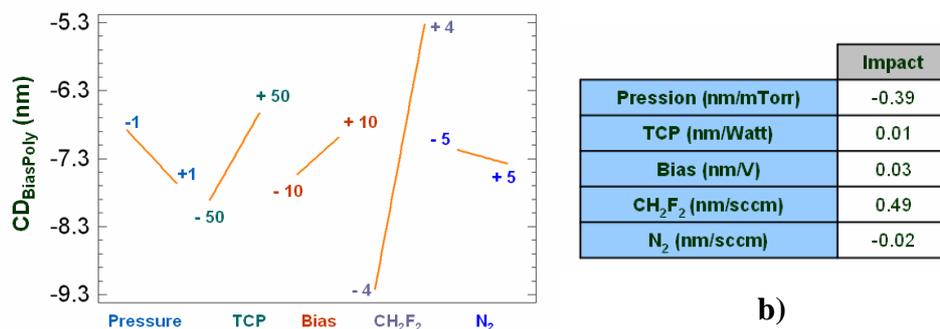


Figure III-38: a) Impacts des paramètres sur le $CD_{BiasPoly}$ dans la fenêtre de procédé étudiée, b) estimation de ces effets.

L'effet du CH_2F_2 sur le $CD_{BiasPoly}$ est estimé à 0.49 nm/sccm, celui de la pression à -0.39 nm/mTorr, celui de la tension de polarisation du substrat à 0.033 nm/V, celui de la puissance source à 0.013 nm/watt et du débit de N_2 à -0.020 nm/sccm.

Débit de CH₂F₂

Le fait d'augmenter le débit de CH₂F₂ induit une augmentation du ratio C/F et donc un plus fort pouvoir polymérisant et donc des dimensions de grille plus élevées. Bien contrôlé il permet de protéger les grilles d'une attaque latérale du SF₆ en formant des polymères sur les flancs, et donc de rendre la gravure plus anisotrope.

Puissance source

L'augmentation de la puissance source aura pour conséquence d'augmenter la densité du plasma. Ceci se traduit ici par une augmentation des dimensions de grilles.

Pression

L'augmentation de la pression entraîne un effet inverse, c'est-à-dire des CD plus petits donc une gravure latérale plus importante. La pression changeant complètement la phase gazeuse, il est difficile de statuer sur le mécanisme conduisant à la diminution des CD.

Tension de polarisation

L'augmentation de la tension de polarisation va induire un CD plus élevé. Cela renforcerait l'idée que la polymérisation des flancs de polysilicium est issu du redépôt d'espèces fluorocarbonées pulvérisées au fond des motifs.

Temps de fin d'attaque ME1 (ou vitesse de gravure verticale) :

Après avoir simplifié le modèle en enlevant l'effet du N₂ et des interactions d'ordre 2 qui n'avaient pas d'impact, nous avons obtenu le diagramme de Pareto présenté dans la figure III-39, expliquant plus de 94% de la variabilité observée sur le temps de ME1.

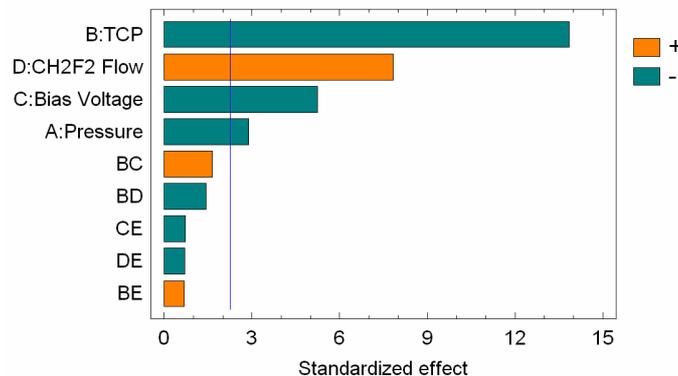
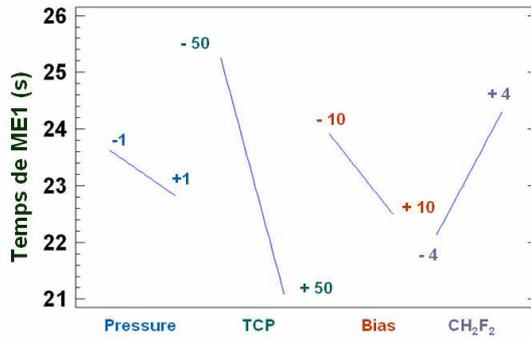


Figure III-39: Graphique de Pareto montrant l'impact des différents paramètres étudiés et de leurs interactions sur les variations du temps de ME1.

L'analyse de ce diagramme de Pareto montre que ce sont les variations de la puissance source ainsi que celles du débit de CH₂F₂ qui ont le plus d'impact sur le temps de gravure ME1 (-2.2nm/Watt et 1.1s/sccm respectivement) et donc sur la gravure verticale. La figure III-40 présente l'impact des différents paramètres étudiés sur le temps de gravure du ME1.



	Impact
Pression (s/mTorr)	-0.40
TCP (s/Watt)	-0.04
Bias (s/V)	-0.07
CH ₂ F ₂ (s/sccm)	0.3

a)

b)

Figure III-40: a) Impacts des paramètres sur le temps de ME1 dans la fenêtre de procédé étudiée, b) estimation de ces effets.

Puissance source

Il apparaît que la puissance source a un très fort impact sur le temps de gravure du ME1. En effet son augmentation va favoriser la dissociation du plasma et donc la formation de fluor atomique et donc une vitesse de gravure verticale plus importante (temps de gravure plus court). Le fait d'avoir une gravure latérale plus faible en augmentant la puissance source viendrait donc du fait que le temps de gravure est plus court, donc l'attaque latérale moins importante.

Débit de CH₂F₂

L'augmentation du flux de CH₂F₂ diminue la vitesse de la gravure verticale par dépôt d'espèces passivantes au fond des motifs. Ceci va dans le même sens que les observations faites pour la gravure latérale.

Tension de polarisation

L'augmentation de la tension de polarisation conduit à une augmentation de l'énergie des ions et permet d'obtenir une vitesse de gravure verticale plus rapide (temps ME1 moins long). Ceci est dû au fait qu'on va favoriser le caractère physique de la gravure (pulvérisation du polysilicium au fond des motifs) mais aussi chimique (cf. chapitre I).

Pression

L'augmentation de la pression va diminuer le temps de ME1 et donc avoir tendance à augmenter la vitesse de gravure verticale. Comme pour la vitesse latérale de gravure, l'augmentation de la pression peut donc favoriser la dissociation du fluor atomique.

L'uniformité intraplaque en % :

Après avoir simplifié le modèle nous avons obtenu le diagramme de Pareto présenté dans la figure III-41. Il explique 69% des variabilités CD observées sur les plaques. Ceci signifie qu'une partie de la non-uniformité n'est pas expliquée par le plan d'expérience que nous avons choisi.

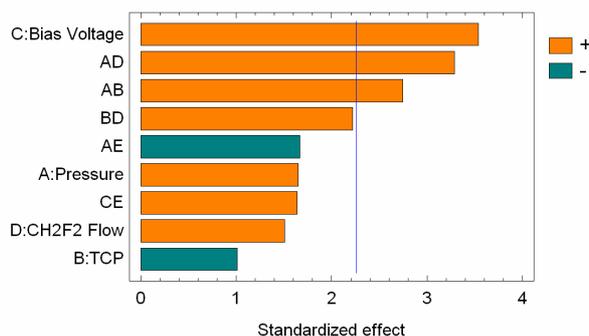


Figure III-41: Diagramme de Pareto des différents paramètres étudiés sur les variations de l'uniformité en % sur la plaque.

Les variations d'uniformité entre les différents essais sont faibles, de l'ordre de 0.3nm. On peut donc en conclure qu'il n'y a pas vraiment d'impact des paramètres étudiés sur l'uniformité de la gravure sur le substrat 300mm.

Rugosité de ligne LER :

Pour la rugosité aucun paramètre n'apparaît significatif. Seule une très faible variation de la rugosité est observée entre les différents essais. On peut donc en conclure que comme pour l'uniformité, les paramètres étudiés ici n'ont pas d'impact sur la rugosité de lignes.

Résumé :

Dans le domaine d'étude présenté dans le tableau III-15, nous avons pu dégager l'évolution des composantes latérale (CD des grilles) et verticale (Temps de gravure du ME1) en fonction de cinq des principaux paramètres plasma. Le tableau III-17 résume ces évolutions.

	Gravure verticale	Gravure latérale
Pression	++	++
Puissance source	+++	--
Tension de polarisation	++	--
Débit CH2F2	--	---
Débit N2	Peu d'effet	Peu d'effet

Tableau III-17: Récapitulatif de l'influence de paramètres étudiés lors de l'étape du ME1 de la gravure polysilicium. Le signe + signifie qu'il y a augmentation et le signe - diminution du paramètres considéré.

Augmenter la pression revient à augmenter la vitesse de gravure verticale ainsi que la vitesse de gravure latérale conduisant à des dimensions de grille plus petites pour des temps de procédé ME1 plus courts.

L'augmentation du débit de CH₂F₂ va ralentir la gravure verticale du polysilicium ainsi que la gravure latérale des motifs.

Le fait d'augmenter la tension de polarisation ou la puissance source va augmenter la vitesse de gravure verticale et diminuer la vitesse de gravure latérale. Par comparaison avec les résultats décrits par O.Luere, l'hypothèse d'un redépôt sur les flancs

d'espèces passivantes provenant de la pulvérisation du fond des motifs, ralentissant ainsi l'attaque latérale des espèces neutres semble la plus probable.

Quant aux variations du débit de N₂, il ne semble pas avoir une influence importante sur les dimensions de motifs en moyenne et les temps de gravure ME1. Ceci peut paraître contradictoire par rapport aux analyses chimiques réalisées sur les flancs des grille, mais nous verrons dans le chapitre IV, lors d'une étude plus poussée de ce plan d'expérience sur les profils de gravure, que combiné au débit de CH₂F₂ il devient un facteur important pour la passivation.

e) Influence de la température

Comme pour la gravure HM, nous avons voulu établir quelle pouvait être l'influence du changement de la température du substrat sur le procédé de gravure polysilicium. Pour cela nous avons décidé de changer la température en bord de plaque pendant l'étape de gravure principale (BT+ME1). Le HM a été gravé sur trois substrats dans les conditions standards. Puis une première plaque a été gravée en polysilicium avec une température centre/bord 60/40°C (condition standard), une seconde avec 60/50°C et une troisième avec 60/60°C.

Le tableau III-18 nous donne un récapitulatif des résultats obtenus sur le CD_{PolyBias}, le CD_{Bias total} ainsi que l'uniformité 3σ sur la plaque après gravure polysilicium pour ces trois conditions de température.

		60/40°C	60/50°C	60/60°C
Après gravure PolySi	CD_{PolyBias} (nm)	-6.3	-6.1	-7.2
	CD_{Bias total} (nm)	-17.5	-17.9	-18.5
	3σ (nm)	1.1	1.4	2.1

Tableau III-18: CD_{PolyBias}, CD_{Bias total} et uniformité intraplaque obtenus après la gravure du polysilicium (à +/-0.4nm) avec des températures centre bord de BT et ME1, à 60/40, 60/50 et 60/60°C..

Dimension des motifs (CD_{Poly}) :

La figure III-42 représente les dimensions de grille après gravure complète de la grille en fonction de la distance par rapport au centre de la plaque.

Selon les résultats obtenus, une augmentation de 20°C en bord de plaque, a entraîné des dimensions de grille plus petites de 1.5nm, soit 0.075nm/°C. Cette perte en CD peut être expliquée, comme pour le cas de la gravure du masque dur, par un coefficient de collage des espèces passivantes moins important à plus forte température du porte substrat. On notera que, dans le cas de la gravure du polysilicium, le changement de température aura un impact moins important que lors de la gravure du masque dur.

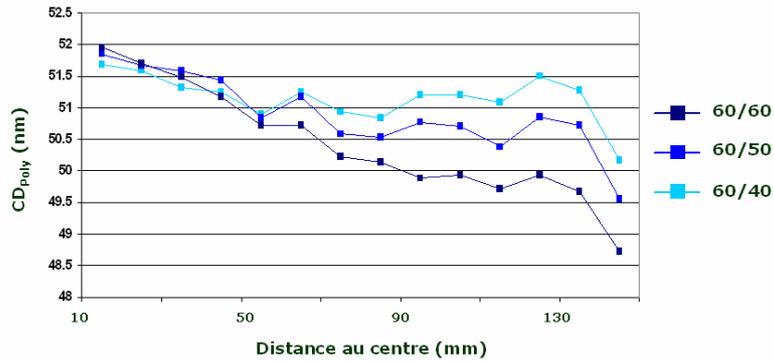


Figure III-42: Mesures CD_{Poly} (à +/- 0.2nm) en fonction de la distance par rapport au centre de la plaque, pour des températures de gravure de BT et ME1 centre/bord de 60/40, 60/50 et 60/60°C.

Uniformité intraplaque:

Avec une même uniformité intraplaque après gravure HM, le fait d’avoir appliqué un changement de température uniquement en bord de plaque pendant la gravure polysilicium, dégrade l’uniformité. En augmentant de 20°C la température au bord de la plaque, l’uniformité est dégradée d’environ 50%, passant de 1.1nm à 2.1nm. La figure III-43 montre les cartographies des CD après gravure polysilicium mesurés au SEM sur toutes les puces de la plaque pour les trois conditions de température en bord de plaque.

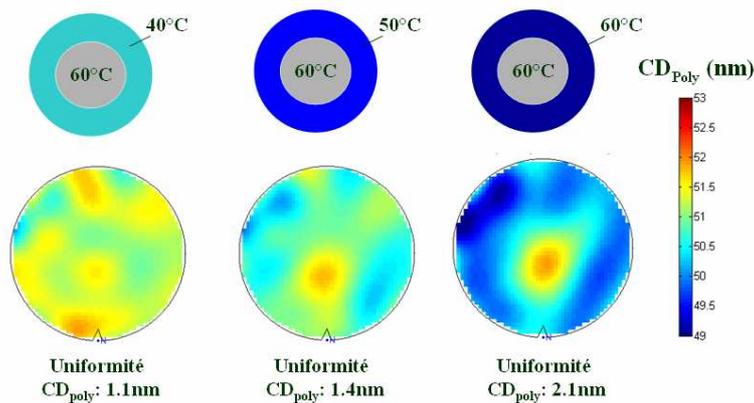


Figure III-43: Cartographies des CD_{Poly} mesurées en scattérométrie sur toutes les puces de la plaque pour des températures centre bord de BT et ME1, à 60/40, 60/50 et 60/60°C.

Rugosité de ligne :

Aucun effet significatif n’a été constaté sur la rugosité de ligne comme nous le montre le tableau III-19.

	40°C	50°C	60°C
LWR (nm)	4.9	5.1	4.9
LER (nm)	4.1	4.1	3.9

Tableau III-19: Rugosités LWR et LER mesurées au SEM (à +/- 0.4nm) en bord de plaque pour différentes températures : 40, 50 et 60°C

III.3.2 Etude de l'étape d'atterrissage (ME2) et de surgravure (OE)

Comme nous l'avons vu lors de la description des différentes étapes de gravure au début de ce chapitre, l'étape d'atterrissage ME2 permet de graver la majeure partie des 20nm de silicium restant après la gravure ME1. Cette étape se fait de façon sélective en HBr/O₂. Une étape de surgravure (dit « OE ») de 5s de l'étape du ME2 vient terminer la gravure. Quand à l'étape de surgravure, elle aura pour but de nettoyer les restes de polysilicium en surface de l'oxyde de grille et n'aura pas d'incidence sur les dimensions de grille. Dans ce paragraphe nous décrirons très succinctement les vitesses de gravure verticale du ME2 et OE, l'influence du temps de gravure du ME2 sur les profils et l'évolution de la couche de passivation après la gravure complète de la grille.

a) Vitesse de gravure verticale du ME2

Beaucoup plus lente que lors du ME1, les vitesses de gravure du polysilicium lors du ME2 et OE sont, respectivement de 66 et 58.5 nm/min au lieu de 108nm/min pour le ME1. Il apparaît dans la figure III-44 que les gravures verticales sont plus lentes au centre de la plaque qu'en bord.

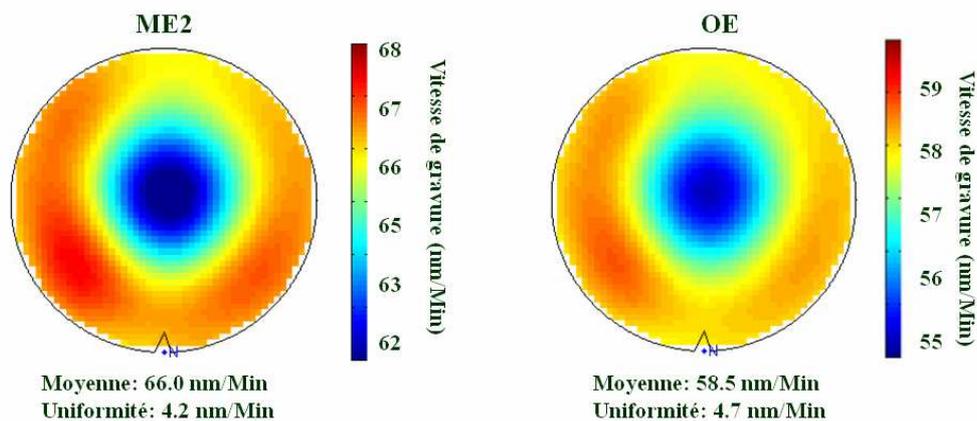


Figure III-44: Cartographies des vitesses de gravure verticale du polysilicium obtenue pour les gravures ME2 et OE en HBr/O₂.

b) Influence du temps de gravure ME2

Afin d'évaluer l'impact de la gravure ME2 sur le profil de grille, nous avons fait varier le temps de surgravure du ME2 de 5s (condition standard) à 15s. L'évolution du CD_{Poly} (mesuré au milieu de grille en OCD après gravure complète de la grille BT+ME1+ME2+OE) en fonction du temps de ME2 est présentée dans la figure III-45.

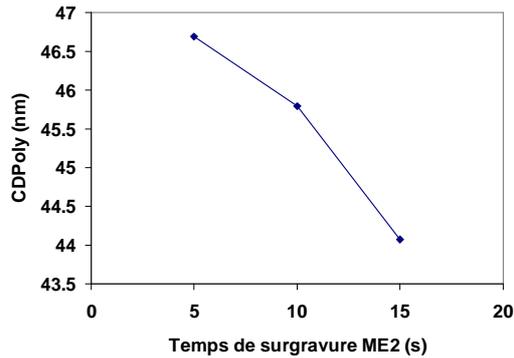


Figure III-45: Evolution du CD_{Poly} moyen (à +/- 0.2nm) en fonction du temps de gravure ME2.

On constate une perte en dimension de la grille moyenne d'environ 0.26nm/s. De plus l'analyse des profils par image TEM de la figure III-46 montre une attaque importante du bas de la grille en fonction du temps de gravure du ME2. On estime la perte de dimension au bas de la grille à 0.6nm/s.

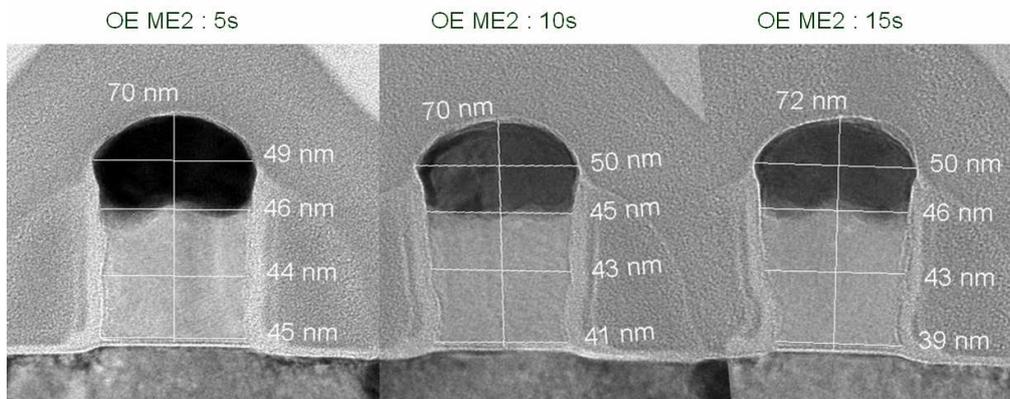


Figure III-46: Image TEM donnant l'évolution du profil de grille pour des temps de surgravure ME2 de 5s (standard), 10s et 15s.

Nous avons évalué l'impact de cette attaque du bas des grilles sur les paramètres électriques : CD électrique et courant I_{on} . Sur les résultats présentés dans la figure III-47, on peut voir que les CD électriques varient d'environ 1nm mais sans tendance spécifique. Par contre on remarque que le courant I_{on} va être impacté de façon importante. En effet pour 10s en plus de gravure ME2, on voit que le courant I_{on} a baissé de $300\mu A.\mu m^{-1}$.

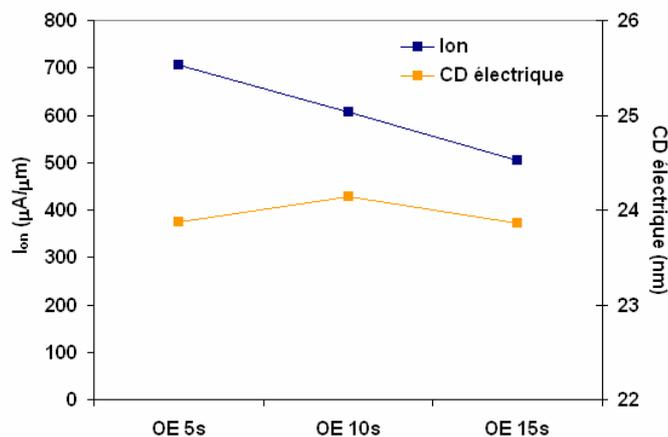


Figure III-47: Evolution des CD électrique et du courant Ion des transistors n-Mos pour des temps de surgravure ME2 de 5, 10 et 15s.

Cette perte de courant I_{on} est liée, non pas à la perte en dimension mais à la forme de la grille. En effet si l'on rogne le bas de la grille, un effet d'ombrage par le haut de la grille lors de l'implantation des extensions source drain causera des zones de non recouvrement au pied de la grille, comme présenté dans la figure III-48, induisant une baisse du courant I_{on} pour une même tension de grille V_g .

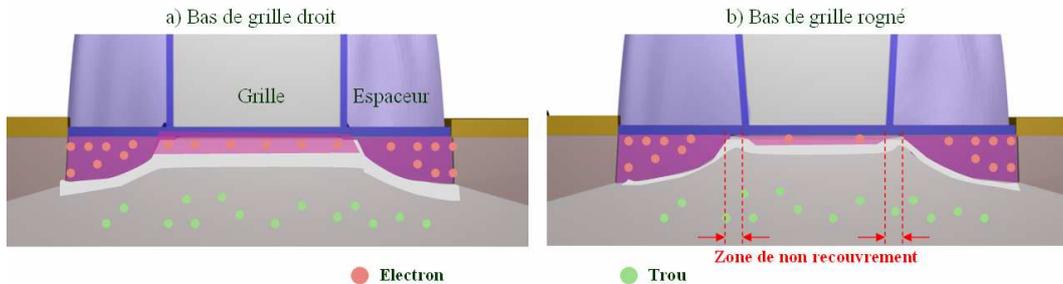


Figure III-48: Représentation de l'effet du rognage de la grille sur la zone de depletion de charge et le passage du courant I_{on} .

c) Evolution de la couche de passivation

Alors que la couche de passivation après ME1 était fine et uniforme, l'analyse du profil par imagerie TEM après gravure complète du polysilicium montre des couches de passivation plus conséquentes. En effet, comme la chimie de gravure du ME2 et OE se fait en HBr/O_2 , on retrouve une passivation de type SiO_xBr_y . La forme des couches de passivation présentée dans la figure III-49 rappelle également le type de mécanisme énoncé dans le chapitre I (cf. figure I-28). Les radicaux de brome gravent le silicium avec l'aide du bombardement ionique et forment des produits volatils de gravure $SiBr_x$ qui sont relâchés dans le plasma. Ces produits se déposent ensuite sur les parois des motifs où ils sont oxydés par l'oxygène, formant ainsi une couche de passivation non volatile de type SiO_yBr_x . En jouant sur la concentration d'oxygène introduite dans la phase gazeuse, on peut donc jouer sur la vitesse de formation de la couche de passivation.

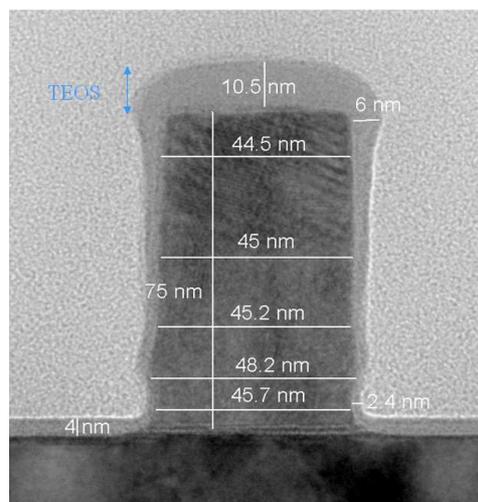


Figure III-49: Evolution de la couche de passivation après gravure complète du polysilicium de la grille.

La couche de passivation peut donc être attribuée essentiellement à la gravure ME2 car comme nous l'avons déjà mentionné, l'étape d'OE du polysilicium ne va avoir pour objectif que de nettoyer la surface de l'oxyde des résidus de polysilicium sans avoir d'impact sur les flancs de grille.

III.3.3 Influence de la nature du masque dur

Dans ce paragraphe nous avons voulu déterminer quel était l'impact de la nature du masque dur sur le procédé de gravure du polysilicium. Nous avons donc remplacé le masque dur SiO₂ de 35nm par un masque Si₃N₄ de 55nm ou un masque de 100nm de carbone amorphe. Le masque en carbone amorphe a été gravé avec la chimie standard en HBr/O₂ (cf. section III.1). Le masque nitrure a été ouvert avec la chimie de la gravure polysilicium en CH₂F₂ / SF₆ / N₂ / He.

La gravure du masque Si₃N₄ est stoppée lors de la chute brutale de la raie CN (387nm) détectée par émission optique. Les mesures après HM montraient des résultats similaires de dimension de motifs entre le masque SiO₂, Si₃N₄ et aC (environ 52nm).

Nous avons par la suite gravé le polysilicium avec la recette standard. Le tableau III-20 présente les résultats des CD_{BiasPoly}, de l'uniformité 3σ intraplaque et de la rugosité LER obtenus pour le cas d'un masque dur SiO₂ (conditions standards) et pour le cas d'un masque dur nitrure Si₃N₄ et carbone amorphe aC. Ces mesures ont été effectuées au SEMCD.

		SiO ₂	Si ₃ N ₄	aC
Après gravure polysilicium	CD _{BiasPoly} (nm)	-6.0	-15.7	-1.2
	3σ (nm)	3.2	3.2	3.4
	LER (nm)	4.1	4.1	3.9

Tableau III-20: Mesures des CD_{BiasPoly}, uniformité 3σ et rugosité LER (à +/-0.4nm) en fonction de la nature du masque dur utilisé : SiO₂, Si₃N₄, aC.

Dimension des motifs (CD_{BiasPoly})

Les résultats montrent que la nature du masque dur va influencer fortement la perte en CD lors de la gravure du polysilicium. L'utilisation d'un masque dur en nitrure va conduire à un CD_{Poly} plus faible de 10nm par rapport à la gravure avec un masque oxyde SiO₂. L'utilisation d'un masque en carbone amorphe conduit à l'effet inverse, puisque l'on obtient un CD_{Poly} plus élevé de 5nm.

$$CD_{Poly} \text{ aC} > CD_{Poly} \text{ SiO}_2 > CD_{Poly} \text{ Si}_3\text{N}_4$$

Uniformité intraplaque et rugosité LER

L'uniformité 3σ de la plaque ainsi que la rugosité de bord de ligne LER ne semblent pas être affectées par le changement de masque dur.

Profil

L'analyse des profils des structures TEM n-Mos présentés dans la figure III-50, montre un effet de pente dans le cas d'un masque dur en carbone amorphe, accentué au pied des motifs (correspondant à la gravure du ME2). Une légère pente est également présente sur les profils gravés avec un masque dur nitrure.

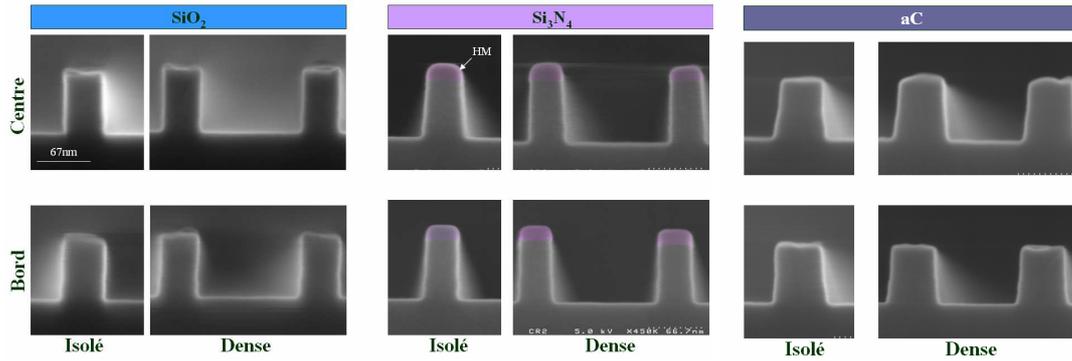


Figure III-50: Images SEM des profils de grille réalisées dans les conditions de gravure standard selon différents type de masque dur : SiO₂, Si₃N₄, aC.

L'effet microloading isolé/dense mesuré sur les profils de la figure III-51 au centre de la plaque est respectivement d'environ -1.5nm, -3nm et -4 nm dans le cas du masque dur oxyde, carbone amorphe et nitrure.

Cette étude nous a permis de montrer que l'érosion latérale du masque dur est très différente, lors de la gravure polysilicium, selon que l'on utilise un masque aC, SiO₂ ou Si₃N₄. Il semble que le masque nitrure résiste moins bien à la gravure en SF₆/CH₂F₂/N₂. On peut également penser que la nature du masque dur intervient dans la formation des couches de passivation (modification des profils de gravure et effet de microloading accentué)

III.4 Conclusion

Lors de ce chapitre, l'analyse de l'impact des procédés de gravure plasma sur les caractéristiques dimensionnelles tels que les CD, l'uniformité CD et la rugosité de ligne ainsi que la caractérisation chimique des surfaces exposées aux plasmas nous ont permis de comprendre les mécanismes fondamentaux des gravures HM et polysilicium.

Dans un premier temps, nous avons montré que, quelle que soit la résine 193nm utilisée, le fait d'appliquer un plasma HBr améliore la rugosité de ligne de 1nm. Nous avons pu observer que lorsque la résine à immersion Fuji (résine N°2) n'a pas été traitée, elle sera érodée latéralement plus rapidement que les autres résines, lors de l'étape de réduction de cote résine. Cette différence ne peut être attribuée ni à un effet de température ni au fait que ce soit une résine à immersion. L'hypothèse la plus probable est que le degré de compaction de la résine Fuji, lors du recuit en lithographie, diffère de ceux des résines JSR et Rhom and Haas, mais elle reste à vérifier.

Plusieurs paramètres ont un impact sur les dimensions des motifs du masque dur. Le changement de débit de gaz CH₂F₂ permet entre autre, de jouer sur les couches CH_xF_y déposées sur la résine lors de l'ouverture Darc. Nous avons également pu montrer l'influence du temps de la gravure du carbone amorphe. L'augmentation du temps de surgravure peut amener dans le cas du carbone amorphe à obtenir des dimensions de grille plus petites et peut constituer un bouton alternatif en 45nm à la réduction de cote résine pour ajuster les CD.

Dans un deuxième temps, une caractérisation approfondie des couches de passivation se formant sur les flancs de polysilicium lors de la gravure en ME1 a pu être faite. Formées grâce à la pulvérisation d'espèces passivantes au fonds des motifs, elles sont uniformément réparties le long de la grille et d'une épaisseur de 1nm. Composées principalement de CC, CF, CN, SiS ces couches vont permettre de ralentir l'attaque latérale des grilles polysilicium par les neutres du plasma.

Lors de la gravure ME2 et OE, nous avons montré l'importance de contrôler les dimensions au pied de la grille. En effet l'augmentation du temps de gravure ME2 à conduit à des profils de grille rognés qui sont à l'origine de dérive du courant de saturation I_{on} .

L'autre aspect important évoqué dans ce chapitre est la nature du masque dur utilisé lors de la gravure du polysilicium. On peut penser que l'érosion latérale du masque dur est différente selon que l'on utilise un masque dur SiO_2 , Si_3N_4 ou carbone amorphe et qu'il va intervenir dans la formation des couches de passivation des flancs du polysilicium.

L'évaluation de l'impact de la température sur tout le procédé de gravure de la grille nous a montré qu'il pouvait être un bon moyen pour améliorer l'uniformité des CD sur la plaque.

Le chapitre III a été consacré à l'analyse des interactions plasma/matériaux à graver, le chapitre IV traite des interactions plasma/parois du réacteur et leurs impacts sur les motifs de grille polysilicium localement mais aussi au niveau du substrat.

Chapitre IV : Etude des interactions plasma/parois au sein d'un réacteur de gravure

Nous avons vu dans le chapitre I que les espèces provenant de la dissociation des gaz de gravure ou des produits de réaction vont diffuser et interagir avec les parois du réacteur. Il en résulte la formation de dépôts sur les parois du réacteur évoluant au cours du temps. La reproductibilité des procédés de gravure peut être assurée par la mise en place de stratégies de conditionnement dont l'évaluation sera au centre de ce chapitre IV.

IV.1 Formation de dépôt sur les parois des réacteurs

Un schéma simple des mécanismes de dépôts se formant sur les parois du réacteur lors des gravures a été proposé par R. Ramos⁷⁵.

D'une façon générale, des résidus contenant des éléments du matériau à graver (ex : Si, SiO₂, C) sont détectés sur les parois du réacteur après le procédé de gravure dans un ICP. Ce constat est propre aux plasmas froid basse pression (<50mTorr) haute densité pour lesquels les temps caractéristiques de dissociation, ionisation et diffusion de toutes les espèces vers les parois sont bien plus courts que les temps de résidence dans le réacteur même pour des débits de gaz importants et des vitesses de pompage élevées). Par conséquent des produits de gravure émis par le substrat peuvent être dissociés, ionisés et subir plusieurs collisions avec les parois avant d'être pompés hors du réacteur de gravure.

Lors de procédés dont la contribution physique est prédominante (régime proche de la pulvérisation), les produits de gravure peu volatils pulvérisés vont coller avec une forte probabilité aux parois du réacteur. Pour les procédés à dominante chimique (c'est-à-dire où les espèces neutres jouent un rôle prédominant), les espèces volatiles créées par les réactions chimiques vont être rapidement dissociées dans le plasma, et transformées en espèces généralement peu volatiles (ou ionisées en raison de la haute densité obtenue dans les ICP). Ces espèces ions/radicaux peu volatiles vont coller aux parois du réacteur.

Une fois adsorbées sur les surfaces exposées au plasma, ces espèces interagissent encore avec les flux de radicaux et d'ions arrivant sur les parois et peuvent être soit :

- incorporées dans un film résistant à la gravure sur les parois du réacteur (cas de l'oxydation ex : SiO_x)
- converties à nouveau en espèces volatiles (ex : $\text{SiF}_3 + \text{F} \rightarrow \text{SiF}_4$) et retournent ainsi dans la phase gazeuse, on parle alors de recyclage des produits de gravure

Ces interactions et en particulier la nature chimique du film déposé sur les parois vont donc contrôler les recombinaisons des espèces et donc la chimie du plasma. Les caractéristiques du procédé de gravure, et l'état de surface des parois seront donc potentiellement différents d'une plaque à une autre. Les interactions plasma-parois sont donc intimement liées au manque de reproductibilité d'un procédé. Il est donc nécessaire d'instaurer des stratégies de conditionnement afin d'améliorer la reproductibilité des procédés.

IV.2 Stratégies de conditionnement

Pour la gravure des grilles polysilicium, afin d'obtenir une reproductibilité satisfaisante, les premières stratégies de conditionnement utilisaient des plaques de silicium vierges entre chaque substrat à graver, de manière à ce que les parois du réacteur soient recouvertes du même dépôt que celui déposé par le plasma de gravure grille (par exemple un dépôt du type SiOCl_x). De cette façon la nature des parois n'évolue pas d'une plaque à une autre. La reproductibilité de cette méthode n'est pourtant pas parfaite, car l'accumulation progressive du dépôt peut conduire à des dérives de procédé, notamment le couplage RF entre l'antenne et le plasma évolue et ainsi modifie la fonction de distribution en énergie des électrons⁷⁶. Mais le principal inconvénient de cette technique, est que lorsque l'accumulation du dépôt sur les parois devient trop importante, il se désolidarise de la paroi et des particules venaient tomber sur la plaque au cours de la gravure, générant de la défektivité. Cette stratégie a donc été abandonnée au profit de deux autres stratégies qui sont communément utilisées en milieu industriel.

La première, dite de « nettoyage » consiste à nettoyer les parois du réacteur par des chimies fluorées après chaque substrat gravé. C'est la stratégie de gravure grille utilisée par STMicroelectronics jusqu'au nœud technologique 65nm.

La seconde, dite de « nettoyage + dépôt » enchaîne une étape de nettoyage des parois par des chimies fluorées, puis une étape de dépôt sur les parois de la chambre de la gravure par plasma. Ces deux stratégies sont illustrées sur la figure IV-1.

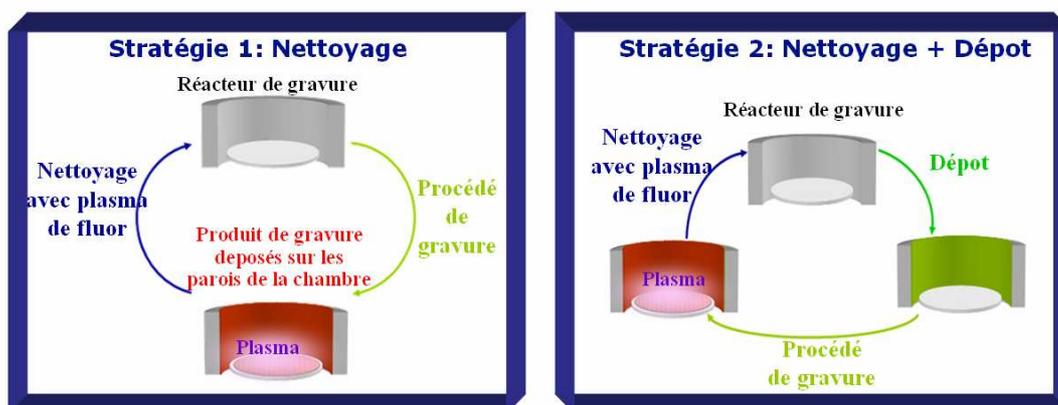


Figure IV-1: Stratégies de conditionnement utilisées

Il existe deux types de dépôt pour la stratégie « nettoyage-dépôt », un dépôt SiOCl_x pour la gravure du polysilicium (breveté en 2007 par Singh *et al.*⁷⁷) et un dépôt fluorocarbonate CF_x (breveté en 2006 par Deshmukh *et al.*⁷⁸) pour les gravures faites en chimies fluorocarbonées.

Les deux stratégies présentent des avantages et des inconvénients. En effet pour la stratégie de « nettoyage » il a été montré que même si les plasmas fluorés étaient capable de retirer la plupart des dépôts formés durant la gravure des substrats, ils ne restauraient pas non plus exactement les parois du réacteur dans leur état initial (formation d' AlF_x). Les parois du réacteur sont également attaquées lors de ce nettoyage et lors de la gravure des substrats, ceci pouvant générer des problèmes de dérives de procédé et de contamination des substrats. La seconde stratégie permet de limiter cette attaque des parois, mais elle présente le désavantage certain de demander plus de temps de procédé que la première stratégie.

LAM research préconise pour la gravure de la grille 45nm l'utilisation de la stratégie « nettoyage-dépôt » avec un dépôt SiOCl_x . Pourtant, l'empilement utilisé pour le masque dur est composé d'une couche de carbone amorphe et les chimies utilisées sont à base de fluorocarbone, il est donc judicieux de se demander si cette stratégie 2 avec dépôt SiOCl_x est bien la plus adaptée pour le procédé de gravure du nœud technologique 45nm.

Dans ce chapitre IV, nous présenterons l'évaluation des deux types de stratégies de conditionnements et leur impact sur le procédé de gravure du HM et du polysilicium. Les différents conditionnements évalués lors de cette étude sont les suivants :

- Conditionnement en parois propres correspondant à la stratégie 1
- Conditionnement avec dépôt SiOCl_x « Dépôt SiOCl_x » et fluorocarboné « Dépôt Carbone » pour la stratégie 2.

Cette étude s'est déroulée en deux temps. Dans un premier temps, nous présenterons l'impact des différents types de conditionnement sur le procédé de gravure grille du nœud technologique 45nm dans le réacteur Kiy045. Puis nous tenterons d'expliquer les phénomènes observés par des analyses similaires faites dans le réacteur DPS 300 du laboratoire LTM.

IV.3 Impact du conditionnement des parois du réacteur kiy045 (LAM) sur le procédé de gravure

Dans cette section nous présenterons, l'impact des trois types de conditionnement sur les dimensions et la rugosité des motifs ainsi que sur l'uniformité des plaques lors de la gravure du masque dur et du polysilicium. Cette étude a été faite en collaboration avec les ingénieurs de LAM research. Soumis à une clause de confidentialité nous ne dévoilerons pas la recette du dépôt SiOCl_x utilisé. Le dépôt carboné utilisé lors de cette étude est constitué d'un mélange de gaz $\text{CF}_4/\text{CH}_2\text{F}_2$ (CF_4 , CH_2F_2 , puissance source, tension de polarisation 0 V, pression, temps 40s)

IV.3.1 Impact sur la gravure HM

L'évaluation de l'impact des conditionnements des parois de la chambre s'est faite dans les conditions standards de gravure du masque dur (décrites dans la section III.2.2). Nous avons donc, pour chaque plaque, conditionné les parois du réacteur selon la stratégie 1 ou 2 puis effectué les étapes de cure, trimming, ouverture, Darc, carbone amorphe et TEOS de la gravure HM. Afin de tester la reproductibilité des résultats nous avons gravé deux plaques pour chaque condition de parois. Pour des raisons de clarté de résultats, seul l'analyse d'une seule des deux plaques par conditionnement sera présentée.

La figure IV-2 représente les cartographies des CD_{HM} obtenus après gravure du masque dur selon un conditionnement en parois propres, en parois SiOCl et en parois carbonées. Les mesures des dimensions des motifs ont été effectuées au SEM sur toutes les puces de chaque plaque.

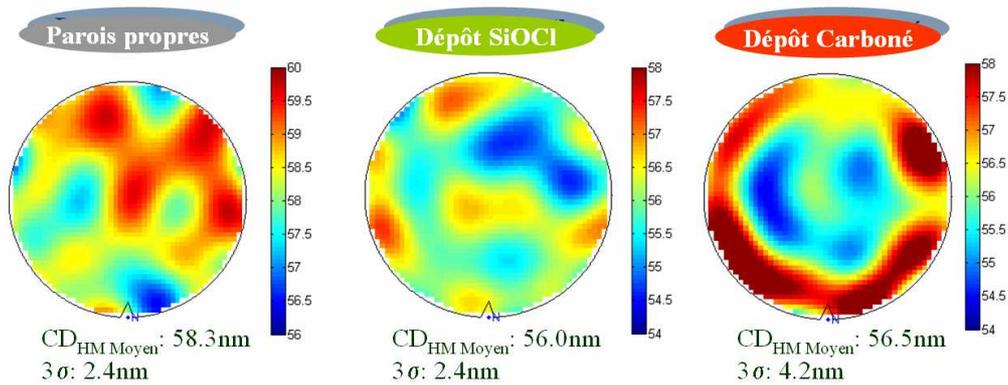


Figure IV-2: Cartographies des CD_{HM} obtenus (à +/- 0.4nm) après gravure du masque dur en fonction des différents conditionnements : dépôt SiOCl, parois propres et dépôt carboné.

Dimension des motifs

Bien que les CD_{HM} moyens obtenus avec une stratégie de dépôt semblent les mêmes, on peut constater que graver en parois carbonées a entraîné des dimensions de grille beaucoup plus importantes (d'environ 3nm) en bord de plaque. Ceci peut être expliqué de plusieurs façons. La première est que, lors de la réduction de cote de la résine (en Cl₂/O₂) l'oxygène, en bord de plaque, va être pompé par les parois carbonées et la réduction en dimension de la résine va donc être moins importante. La seconde, est que lors de la gravure du Darc, une concentration plus importante d'espèces passivantes (due aux parois du réacteur) peut impliquer des dépôts CH_xF_y sur la résine plus importants (cf. paragraphe III.2.4) et donc des dimensions de motifs plus importantes.

Ce qui est très singulier dans ces résultats c'est que l'on constate que la gravure en parois propres engendre des dimensions de grille plus importantes sur toute la plaque. Il est difficile de conclure sur ce phénomène.

Uniformité intraplaque

Les stratégies en parois propres et en parois SiOCl semblent aboutir à la même uniformité intraplaque de 2.4nm. La plaque dont le masque dur a été gravé en parois carbonées présente une forte non-uniformité 3sigma de 4.2nm. Cette augmentation de la non uniformité en bord de plaque est probablement due à la proximité des parois du réacteur.

Rugosité de ligne

Une autre conséquence du passage en parois carbonées est visible sur la rugosité de ligne. En effet lors de l'ouverture du masque dur, on note une augmentation du LER de 1nm. La figure IV-3 représente les cartographies des mesures SEM de la rugosité de bord de ligne LER faites sur toute la plaque, pour les différents conditionnements utilisés, avec les mesure LER_{moyen} et les photographies en vue de dessus associés.

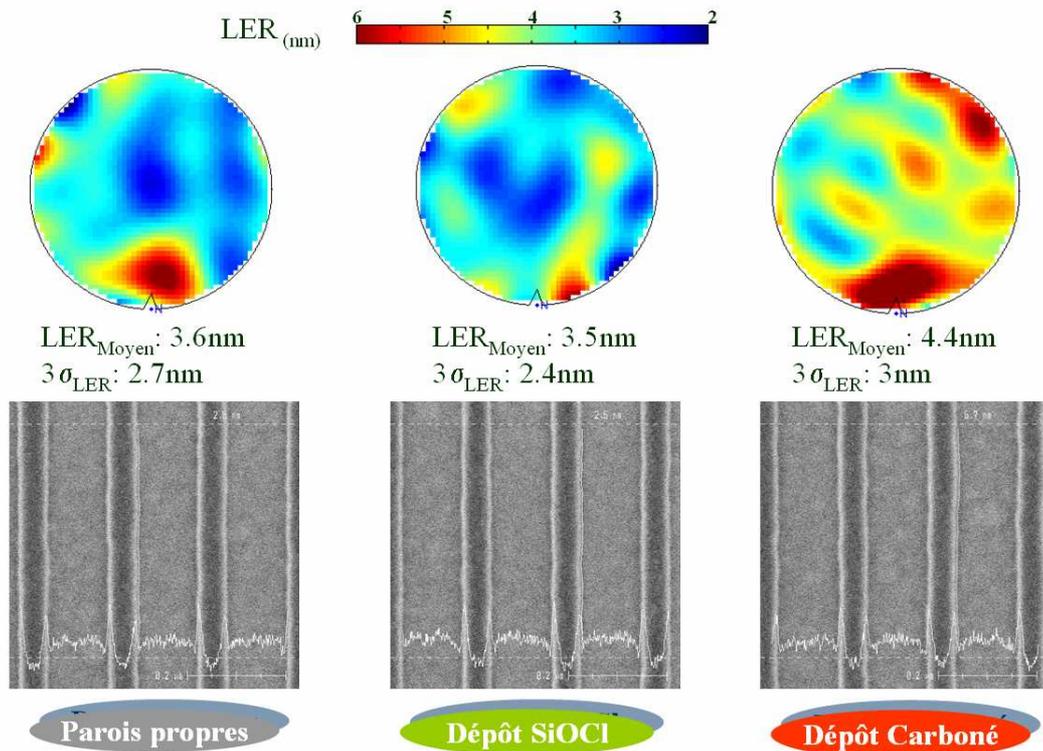


Figure IV-3: Cartographies, mesure moyenne et uniformité 3sigma de la rugosité LER mesurée en fonction des différents conditionnements utilisés pour l'ouverture HM. Photographies SEM en vue de dessus des grilles associées.

Profils des motifs

Sur les profils SEM obtenus pour des réseaux de motifs denses, que présente la figure IV-4 on ne constate pas de différences significatives entre les différents conditionnements. La même constatation a été faite sur les motifs isolés.

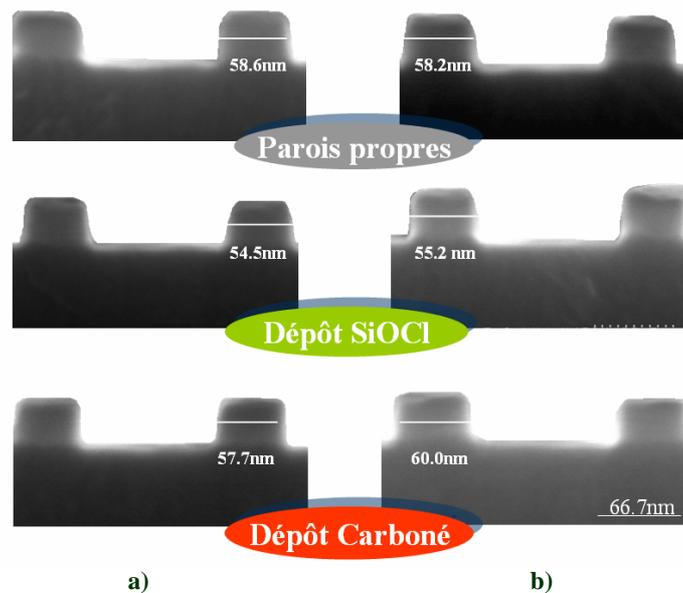


Figure IV-4: Profils du masque dur TEOS au a) centre et b) bord de plaque après ouverture selon les différents conditionnements.

Effet Microloading

La comparaison des mesures CD entre les motifs isolés et denses sur les profils SEM du tableau IV-1 ne donne pas d'effet de microloading marqué ($< 2\text{nm}$, limite de la précision de la mesure au SEMHR).

	Parois propres		Parois SiOCl		Parois carbonées	
	Isolé	Dense	Isolé	Dense	Isolé	Dense
Bord	57.5	58.2	56.4	55.2	58.6	60
Centre	60	58.6	56.2	54.5	58.1	57.7

Tableau IV-1: Mesures CD_{HM} faites sur les profils SEM des motifs isolé et dense après gravure du masque dur en centre et bord de plaque, selon les différents types de conditionnement.

Après l'analyse des résultats après gravure du masque dur, on voit que le conditionnement des parois a une influence sur l'uniformité centre bord des motifs mais peu sur les dimensions moyennes et les profils. On notera que les temps de gravure pour les conditionnements en parois propres et en parois carbonées restent similaires au temps de gravure dans les conditions standard de parois avec dépôt SiOCl.

IV.3.2 Impact sur la gravure du polysilicium

Lors de cette étude, afin de décorréler l'effet du conditionnement des parois entre la gravure HM et la gravure polysilicium, nous avons réalisé la gravure du masque dur des plaques test avec un conditionnement standard SiOCl. Puis nous avons effectué la gravure complète du polysilicium (BT+ME1+ME2+OE), en conditionnant au préalable les parois du réacteur avec la stratégie 1 ou 2. Chaque étude de conditionnement lors de la gravure polysilicium a été faite sur deux plaques. N'ayant pas observé de problème de répétabilité sur les résultats, seul l'analyse d'une plaque sera présentée pour chaque conditionnement.

Les cartographies des CD_{Poly} (mesurées sur toutes les puces de chaque plaque en scattérométrie) après l'ouverture complète de la grille de polysilicium selon les différents types de conditionnements sont présentées sur la figure IV-5.

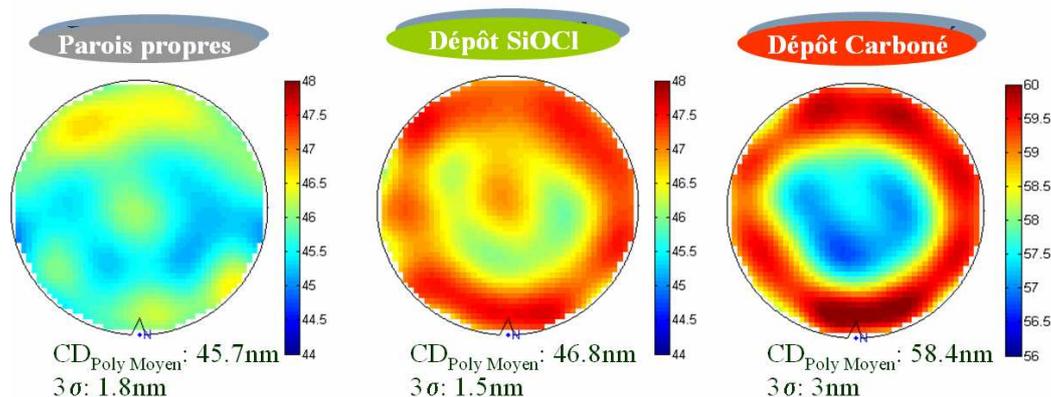


Figure IV-5: Cartographies des CD_{poly} obtenus (à $\pm 0.2\text{nm}$) après gravure polysilicium en fonction des différents conditionnements : parois propres, dépôt SiOCl et carboné.

Dimension des motifs

On remarque que les grilles gravées avec un conditionnement de type dépôt (SiOCl ou carboné) ont tendance à donner des grilles dont la dimension est plus importante. La tendance est la suivante :

$$CD_{\text{Poly Parois propres}} < CD_{\text{Poly Dépôt SiOCl}} \ll CD_{\text{Poly Dépôt Carbone}}$$

On peut là encore, pour les grilles gravées en parois carbonées, faire l'hypothèse d'une passivation des flancs de grille plus importante.

Uniformité intraplaque

L'uniformité intraplaque pour les stratégies de conditionnement en parois propres et parois SiOCl sont similaires, environ 1.5nm. L'effet radial observé lors de l'ouverture du masque dur en parois carbonées se retrouve lors de l'ouverture du polysilicium. Ce qui induit une non uniformité au niveau du contrôle dimensionnel d'environ 3nm.

Rugosité de ligne

Dans le cas de la gravure du polysilicium, les gravures en parois propres et parois SiOCl conduisent à la même rugosité. Pour ce qui est du conditionnement en parois carbonées, il est difficile de se prononcer, car de par une forte pente sur les motifs (contraste centre/bord de ligne important cf. figure IV-6) il n'est pas possible de faire correctement la mise au point sur le SEM ce qui peut fausser les résultats des mesures de rugosité.

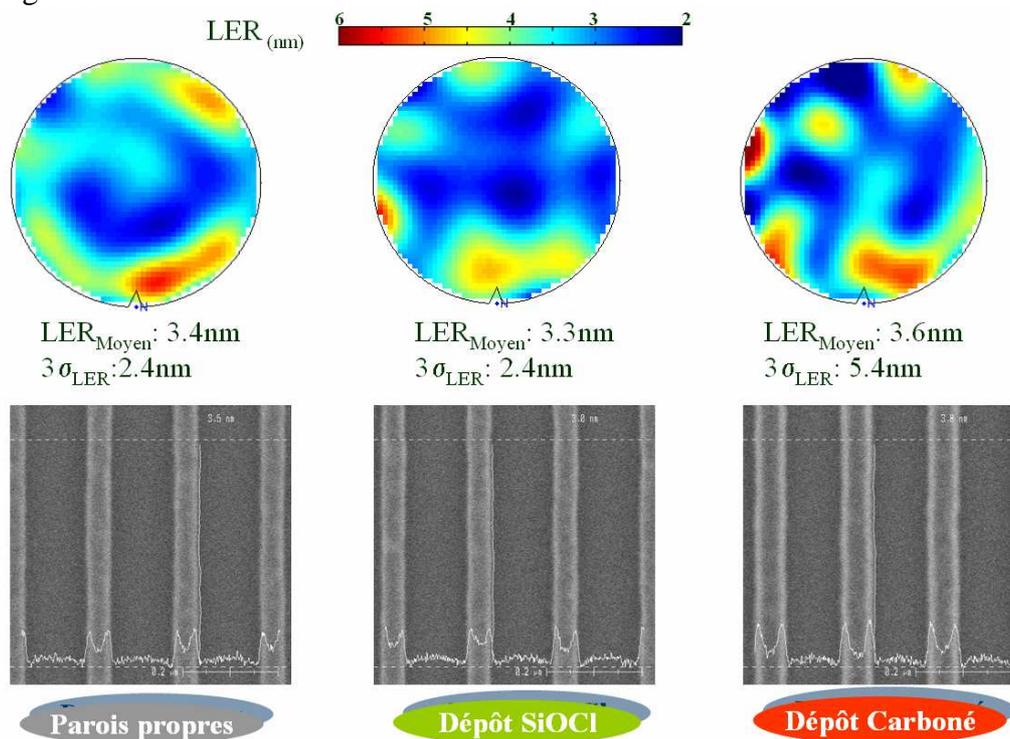


Figure IV-6: Cartographies, mesure moyenne et uniformité 3sigma de la rugosité LER mesurée au SEMCD en fonction des différents conditionnements utilisés pour la gravure polysilicium. Photographies SEM en vue de dessus des grilles associées.

Profils des grilles

Lorsque l'on observe, sur la figure IV-7, les profils des réseaux de grille denses obtenus après gravure polysilicium selon les trois différentes conditions de parois, on peut observer trois types de profils :

- Profils rognés en bord de plaque par une légère surgravure latérale en parois propres
- Profils droits en parois SiOCl.
- Profils en pente pour la gravure faite en parois carbonées.

L'effet bord centre perçu lors de la mesure par scattérométrie pour les conditions en parois carboné est aussi présent. On peut émettre l'hypothèse que la passivation en bord de plaque a été plus importante et a donc conduit à des CD plus importants.

Il apparaît, sur les profils gravés en parois propres, une différence de surgravure latérale entre le centre et le bord de la plaque, que l'on ne pouvait pas détecter par les mesures en ligne (OCD ou SEM). En effet le bord de la plaque paraît plus impacté par la surgravure latérale que le centre. En revanche, on n'observe pas de différence centre-bord pour les grilles gravées en parois SiOCl.

On pourra noter le même type d'effet sur les structures de grille isolée.

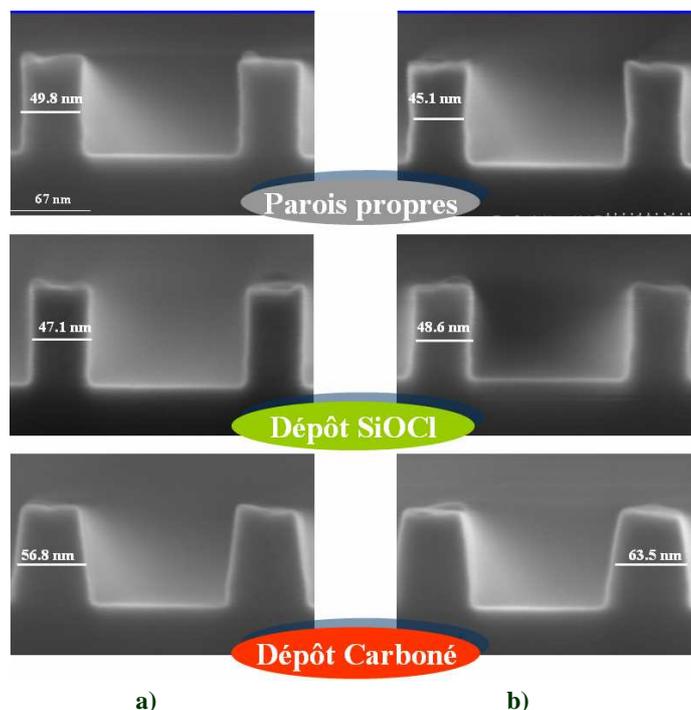


Figure IV-7: Profils des grilles de polysilicium au a) centre et b) bord de plaque après gravure selon différents conditionnements.

Effet microloading

Le tableau IV-2 donne un récapitulatif des mesures CD effectuées sur les coupes SEM sur les structures isolée et dense en centre et bord de plaque.

Au niveau des dimensions de grille on retrouve les tendances vues sur les mesures pleine plaque en SEM (cf. figure IV-5). Un effet microloading d'environ 2nm en bord de plaque (limite de résolution de la méthode de mesure au SEMHR) est observable quel que soit le conditionnement de parois utilisé.

	Parois propres		Parois SiOCl		Parois carbonées	
	Isolé	Dense	Isolé	Dense	Isolé	Dense
Bord	46.6	45.1	51.9	48.6	65.2	63.5
Centre	49.4	49.8	47.8	47.1	59.4	56.8

Tableau IV-2: Mesures CD_{Poly} faites sur les profils SEM des motifs isolé et dense après gravure du polysilicium en centre et bord de plaque, selon les différents types de conditionnement.

Dans le cas de la gravure polysilicium, on notera une influence plus importante du type de conditionnement utilisé. Notamment une différence plus marquée dans le cas de l'utilisation d'un conditionnement avec dépôt carboné. Les temps de gravure dans le cas de parois propres et parois SiOCl restent similaires (temps de gravure ME1 : 22s). En parois carbonées, la gravure du polysilicium semble être ralentie (Temps de gravure ME1 : 25.5s)

Il apparaît après ces premières études dans le réacteur Kiyō45 que les interactions plasma-parois se produisant lors de la gravure HM mais surtout lors de la gravure polysilicium sont très différentes selon le type de conditionnement utilisé. Agissant sur les propriétés physico-chimiques du procédé de gravure, les interactions plasma/parois conduisent à la caractérisation de dimensions et de profils de grille différentes. Les prochains paragraphes tenteront d'expliquer les différences observées lors de cette section.

IV.4 Analyse des interactions plasma/parois dans le réacteur ICP du LTM : DPS300 (Appl.Mat.)

Afin de comprendre l'impact des différents types de conditionnements de parois sur les motifs du paragraphe précédent, les mêmes études ont été entreprises au laboratoire du LTM, doté d'outils d'analyses complémentaires. Au vue des résultats obtenus dans le réacteur Kiyō45, nous nous sommes intéressés plus particulièrement à l'étape de gravure polysilicium qui présente les effets les plus marqués en termes de profils et de dimensions entre les différents conditionnements. Nous avons donc, au préalable, gravé le masque dur des plaques de test dans le réacteur Kiyō45 avec la recette standard puis transféré celles-ci au laboratoire.

A cause de la non disponibilité des gaz CH_2F_2 et hélium sur le réacteur de gravure DPS 300 nous avons dû adapter notre recette de gravure avec du CHF_3 et de l'argon. Nous tiendrons bien sûr compte de cette modification lors des conclusions dans les prochains paragraphes. Ci-dessous la recette de gravure que nous avons utilisée pour graver le polysilicium :

$SF_6/CHF_3/ N_2 / Ar /$ Puissance source / Puissance bias / Pression

Afin de caractériser les grilles, nous avons utilisé l'analyseur XPS, un ellipsomètre et un SEM haute résolution.

IV.4.1 Technique d'analyse des parois du réacteur

La difficulté de ces études est de pouvoir analyser les parois du réacteur et bien évidemment la couche réactive susceptible de se déposer dessus pendant le procédé de gravure.

Pour résoudre ce problème, le laboratoire du LTM a développé une méthodologie permettant de simuler les couches déposées lors de n'importe quel procédé de gravure. Elle consiste à porter un échantillon d' Al_2O_3 au potentiel flottant en fixant

celui-ci à la surface du substrat par des rouleaux de Kapton. Une capacité supplémentaire est donc créée grâce à l'intervalle d'air généré par les rouleaux entre les échantillons d' Al_2O_3 et la surface de la plaque. Les ions bombardant l'échantillon « flottant » arrivent donc avec une faible énergie (potentiel plasma) (cf figure IV-8), et le dépôt formé sur l'échantillon flottant est de même nature que celui déposé sur les parois de la chambre.

Grâce à l'analyse chimique par XPS, il est donc possible de mesurer la composition de la couche déposée sur les parois du réacteur de gravure.

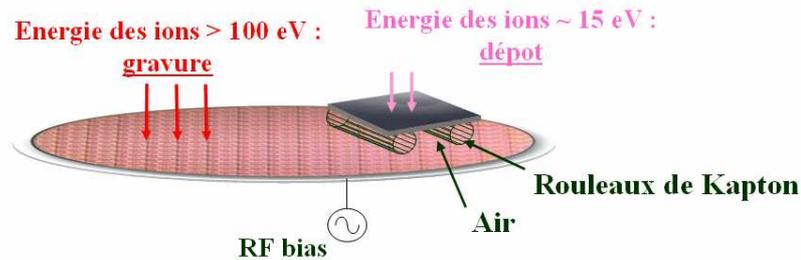


Figure IV-8: Schéma représentant la technique dite « d'échantillon flottant » lors de la gravure d'un substrat.

Plusieurs types d'échantillons sont donc nécessaires pour simuler les trois conditionnements étudiés précédemment :

- Echantillon d' Al_2O_3 pour simuler les parois propres du réacteur Centura 300
- Echantillon d' Al_2O_3 avec un dépôt SiOCl pour simuler les parois recouvertes de SiOCl
- Echantillon d' Al_2O_3 avec un dépôt carboné pour simuler les parois carbonées.

La figure IV-9 présente la méthode de dépôt pour les échantillons flottants avec un dépôt SiOCl et carboné. Elle consiste à placer un échantillon flottant d' Al_2O_3 sur une plaque de silicium « bulk » et à l'introduire dans la chambre (préalablement nettoyée en SF_6/O_2). Le dépôt par plasma est ensuite réalisé à 0 Watt de puissance bias : le dépôt SiOCl , à base de SiCl_4 ou le dépôt carboné, à base de HBr/CHF_3

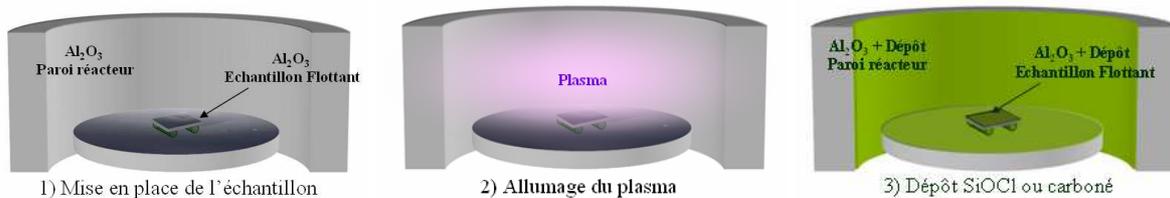


Figure IV-9: Schéma représentant la méthode utilisée lors des dépôts sur les échantillons flottants.

L'autre axe de notre étude est de mesurer la couche de passivation au niveau des flancs des grilles de polysilicium. Ne possédant pas lors de cette étude, de plaques spécifiques pour faire des analyses angulaires comme c'était le cas dans le paragraphe III.3, nous avons utilisé la méthode des échantillons flottants, en remplaçant l'échantillon d' Al_2O_3 par du polysilicium, pour simuler la couche réactive qui se forme sur les flancs de polysilicium lors de la gravure. Cette méthode bien que grossière, car ne prenant pas en compte l'angle de collection des espèces neutres ainsi que l'impact du bombardement ionique des ions en incidence rasante sur les flancs de polysilicium, nous a permis de dégager des tendances.

IV.4.2 Protocole expérimental

Le protocole expérimental utilisé pour cette analyse, schématisé par la figure IV-10 a pour objectifs principaux de pouvoir :

- Corréler les profils des grilles gravées avec les analyses XPS des échantillons flottants de polysilicium
- Analyser la couche déposée sur les échantillons flottants et donc les parois du réacteur.
- Corréler les vitesses de gravure latérales des grilles avec les vitesses de gravure des échantillons.

Il consiste à positionner sur une plaque dont le masque dur a été gravé au préalable à STMicroelectronics, deux échantillons flottants de polysilicium (simulant les flancs des grilles) et deux échantillons flottants d' Al_2O_3 ou SiOCl ou carboné (simulant les parois du réacteur) selon le conditionnement utilisé. Ceci au centre et au bord de plaque afin de voir d'éventuelles différences de gravure entre ces deux zones.

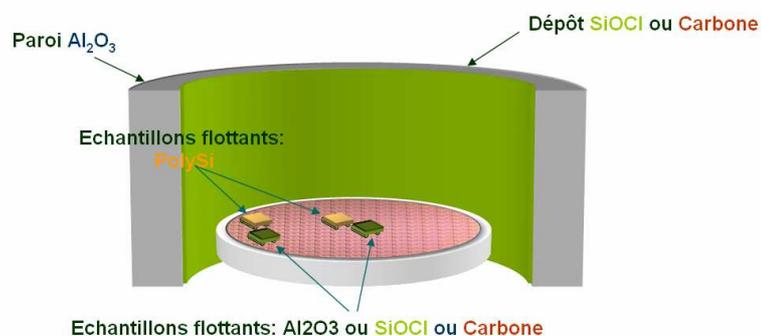


Figure IV-10: Schéma représentant le protocole utilisé lors de la gravure de la plaque de polysilicium avec motifs.

La gravure polysilicium est faite selon les trois types de conditionnements, puis les échantillons flottants sont analysés par XPS et les dimensions de grilles sur la plaque, mesurées en SEM. Des analyses de profils par SEM HR ont également été réalisées.

IV.4.3 Résultats

a) Echantillons simulant les parois du réacteur

Nous allons dans cette première partie, analyser les échantillons simulant les parois du réacteur. La figure IV-11 nous présente les compositions chimiques des échantillons flottants d' Al_2O_3 , SiOCl et de carbone avant (référence) et après gravure du polysilicium (situés au centre de la plaque). Le tableau IV-3 présente les épaisseurs de dépôts gravés, de ces mêmes échantillons, obtenus par mesures éllipsométriques.

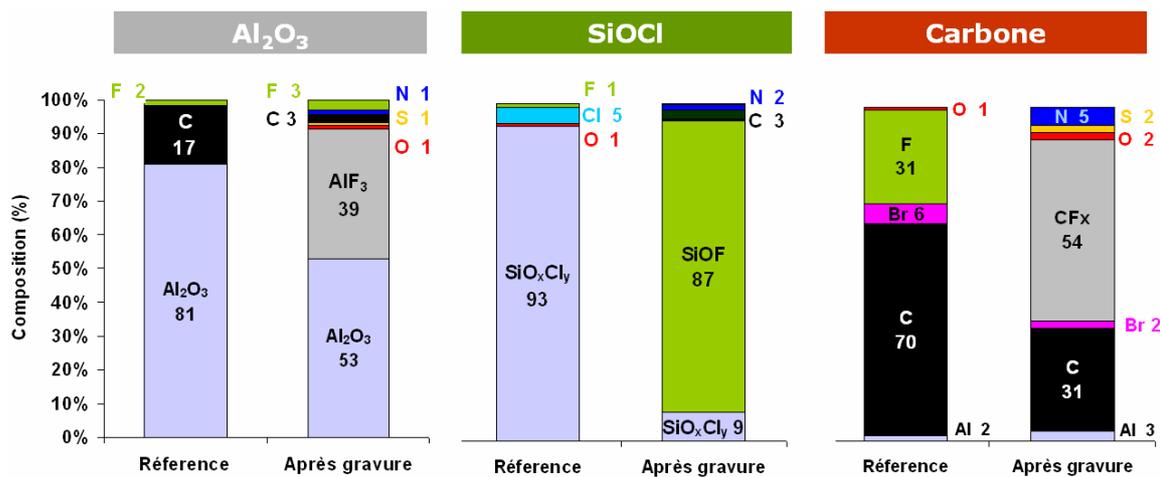


Figure IV-11: Composition chimique des échantillons flottants simulants les parois du réacteur avant (Référence) et après gravure du polysilicium.

	Al ₂ O ₃	SiOCl	Carbone
Epaisseur gravée	1 nm	19 nm	3 nm

Tableau IV-3: Epaisseur des parois gravées lors de l'ouverture polysilicium.

Parois propres

L'échantillon flottant avant gravure présente un fort taux de carbone et d'oxygène en surface, probablement due à la remise à l'air de l'échantillon et une contamination dans le récipient de transport ou foup (pour « Front Opening Unified Pod »).

Après la gravure du polysilicium, une couche d'AlF_x, représentant environ 39% de la zone analysée, s'est formée sur l'échantillon d'Al₂O₃ bloquant ainsi la gravure des parois d'Al₂O₃.

Dépôt SiOCl

Avant gravure, une légère contamination surfacique est présente sur l'échantillon flottant. Après gravure, le comportement de la couche est complètement différent de l'échantillon d'alumine. Une couche réactive riche en fluor se forme en surface du SiOCl et 19nm de la couche de SiOCl ont été gravés. Ceci signifie que le fluor atomique est consommé lors de la gravure du polysilicium afin de graver les parois SiOCl de la chambre.

Dépôt Carboné

Le dépôt carboné sur l'échantillon flottant est composé de carbone à 70% et de fluor à 31%, un léger pourcentage de brome est également présent, 6%. Après gravure le conditionnement carboné peut être considéré comme un cas intermédiaire par rapport aux autres types de conditionnement puisqu'une couche CF_x se forme et 3nm de la couche carbonée ont été gravés lors de la gravure du polysilicium de la grille.

On peut également remarquer que les éléments azote et soufre sont, de façon général, peu présents, notamment sur les parois contenant de l'oxygène comme l'Al₂O₃ ou le SiOCl (des produits volatils ont donc pu être émis lors de la gravure des parois).

Aucun effet centre/bord n'a été remarqué pour les échantillons simulant les parois du réacteur.

La première conclusion que nous pouvons tirer est que selon le conditionnement des parois utilisé, la nature chimique de la couche réactive qui se forme sur les parois est très différente. Cette différence a une influence sur le taux d'espèces réactives du plasma et donc sur les profils finaux des grilles. Le prochain paragraphe décrit les résultats obtenus sur les échantillons flottants de polysilicium.

b) Echantillons simulant les flancs des grilles de polysilicium

La figure IV-12 présente les épaisseurs de polysilicium gravées sur les échantillons flottants en centre et bord de plaque selon les différents types de conditionnement utilisés. Les profils SEM des grilles polysilicium obtenues sur le substrat sont représentés au dessous.

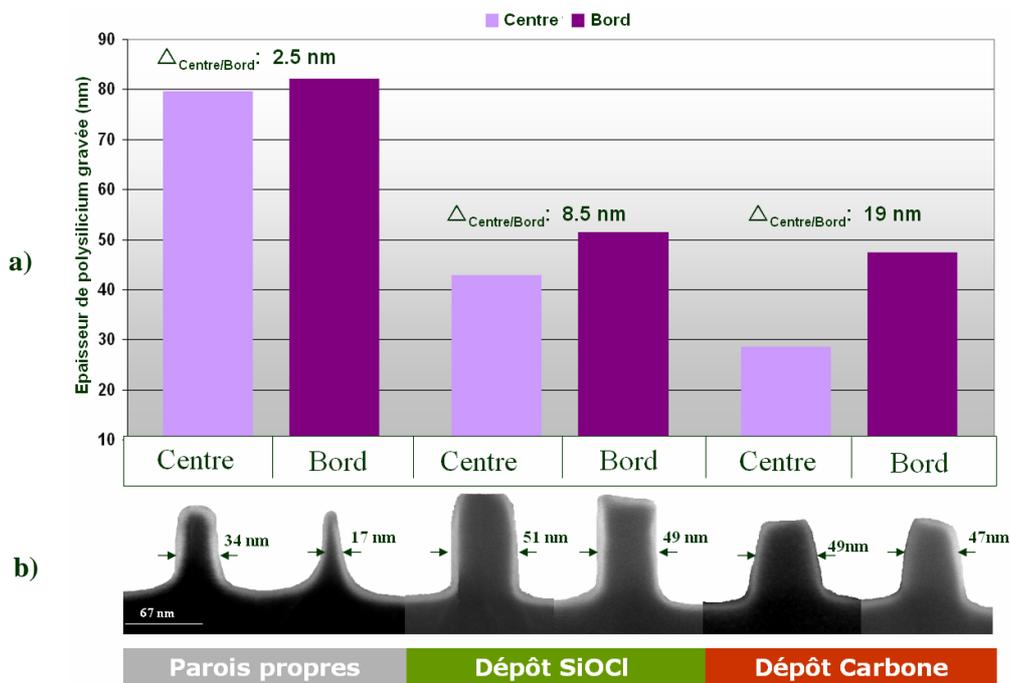


Figure IV-12: a) Epaisseurs de polysilicium gravées sur les échantillons flottants et b) profils de grille SEM obtenus au centre et en bord de plaque selon différents types de conditionnement.

La comparaison des épaisseurs gravées sur échantillons flottants et celle réellement gravées sur les grilles montre les limites de la simulation des flancs de grille par échantillons flottants. On trouve bien les mêmes tendances :

- Une gravure latérale plus importante en parois propres qu'avec un conditionnement type dépôt. Nous avons vu précédemment que les parois d' Al_2O_3 protégées par la formation d' AlF_x ne sont pas gravées par le fluor. Par conséquent, le fluor atomique disponible pour la gravure des grilles sera plus important et la gravure latérale sera plus importante.
- Une gravure latérale plus importante en bord de plaque quel que soit le conditionnement utilisé. Cet effet bord de plaque est attribué à une densité de matière plus importante à graver au centre de plaque qu'au bord pour une même concentration de fluor atomique.

Mais des incohérences sont observées :

- Facteur 4 entre les épaisseurs mesurées sur échantillons flottants et le $CD_{\text{Bias Poly}}$ mesuré sur les grilles
- L'effet centre/bord le plus marquant est perçu sur les grilles gravées en parois propres, alors qu'il n'en est rien pour les échantillons flottants.

Cette méthode peut donc être considérée pour dégager des tendances, mais ne pourra pas être utilisée pour une analyse précise car elle ne reflète pas la réalité de la synergie entre les ions et les neutres sur les flancs des motifs.

La figure IV-13 présente les analyses XPS faites sur les échantillons simulants les flancs de grille au centre de la plaque selon les différents conditionnements utilisés. Quel que soit le conditionnement, les analyses montrent la formation d'une couche réactive CF_x riche en azote et soufre, en accord avec les analyses angulaires décrites lors du paragraphe III.3.5. Toutefois une différence par rapport aux analyses angulaires des flancs, celle de la présence non négligeable d'oxygène, environ 3%. Le fait que l'élément oxygène soit présent pour les trois types de conditionnement suggère qu'il provienne principalement du masque dur. Ce constat tend à renforcer l'hypothèse, faite au paragraphe III.3.3, que le masque dur joue un rôle dans la passivation des flancs de polysilicium.

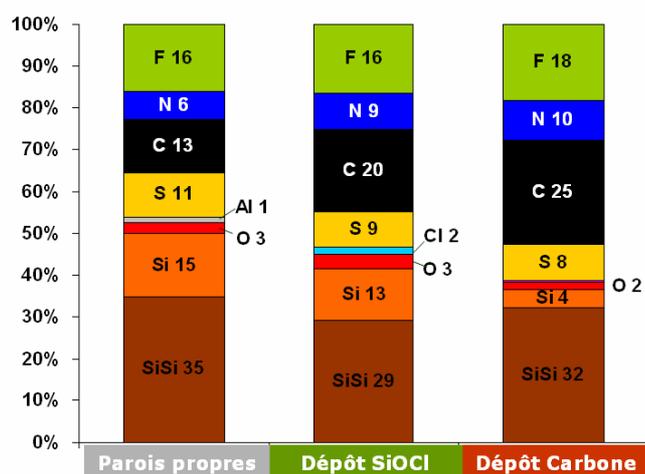


Figure IV-13: Composition chimique (en %) des échantillons flottants de polysilicium placés au centre de la plaque, après gravure selon différents types de conditionnement.

Par comparaison avec les profils obtenus sur les grilles polysilicium du substrat (cf. figure IV-12), il semblerait que plus il y ait de pente sur les flancs de grille et plus la couche réactive soit riche en éléments carbone et azote.

On pourra noter par ailleurs le comportement surfacique différent du polysilicium par rapport aux échantillons d' Al_2O_3 , de $SiOCl$ ou de carbone.

Si l'on considère uniquement la couche réactive et que l'on compare la composition chimique en éléments carbone, azote, soufre et fluor des échantillons flottants de polysilicium au centre et en bord de plaque on obtient les quantifications présentées dans la figure IV-14.

D'une façon générale on observe plus de fluor et moins de carbone sur les échantillons placés en bord de plaque. Ceci peut être expliqué par une possible déplétion d'espèces (collage du carbone et de l'azote aux parois carbonées ou

consommation du fluor et soufre par les parois de SiOCl), conduisant à une plus faible passivation des grilles et une plus forte quantité de fluor en bord plaque.

En parois propres

Dans le cas des parois propres, on peut noter un pourcentage plus important d'élément fluor et un pourcentage en éléments passivants (C et F) plus faible que pour les autres conditionnements. Ce manque de passivation expliquerait la gravure latérale importante des grilles observée sur les profils de la figure IV-12. L'effet est accentué en bord de plaque, ce qui est en accord également avec les profils.

En parois SiOCl

Dans le cas des parois SiOCl, là encore le pourcentage du fluor est plus important en bord de plaque mais l'effet est moindre. On peut penser qu'on se trouve ici dans un cas intermédiaire où, il y a un bon compromis entre le pourcentage d'éléments passivant (C et N) et d'éléments gravant (S et F) conduisant à des profils de grille droits.

En parois carbonées

Dans le cas des parois carbonées, les résultats obtenus sont à l'inverse de ceux obtenus en parois propres. En effet, on observe un fort pourcentage d'éléments passivants et un pourcentage de fluor plus faible que pour les autres conditionnements. Cette surpassivation des flancs ralentit la gravure latérale des grilles et conduit à des profils en pente (cf. figure IV-12).

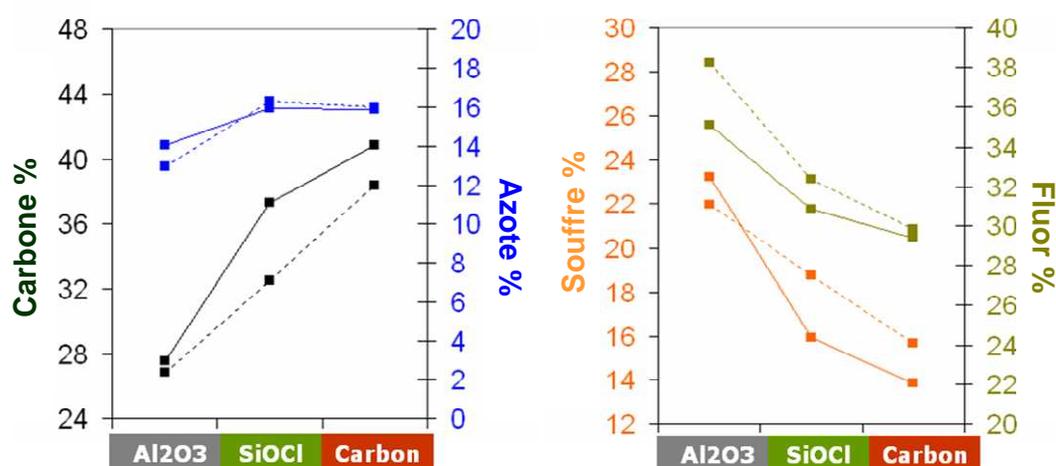


Figure IV-14: Graphiques représentant les analyses XPS des espèces passivantes : Carbone C et Azote N (à gauche) et gravantes Soufre S et Fluor F (à droite) obtenues pour les différents échantillons flottants de polysilicium situés au centre (trait plein) et bord de la plaque (trait pointillé).

Après l'examen des spectres C1s de la figure IV-15, on identifie les mêmes composantes que lors de l'analyse des couches de polysilicium de la section III.2, C-Si, C-C, CCF/CN, C-F, CF₂, CF₃, à 283.9, 284.7, 286.6, 288.0, 290.4, 292.4 eV respectivement. De façon générale on voit que les échantillons flottants de polysilicium déposé en bord de plaque présente un pourcentage plus faible d'espèces carbonées qu'au centre de la plaque.

Par comparaison aux profils de grille de la figure IV-13, on remarque que la pente des flancs est due notamment à l'augmentation des espèces CC et de CCF-CN.

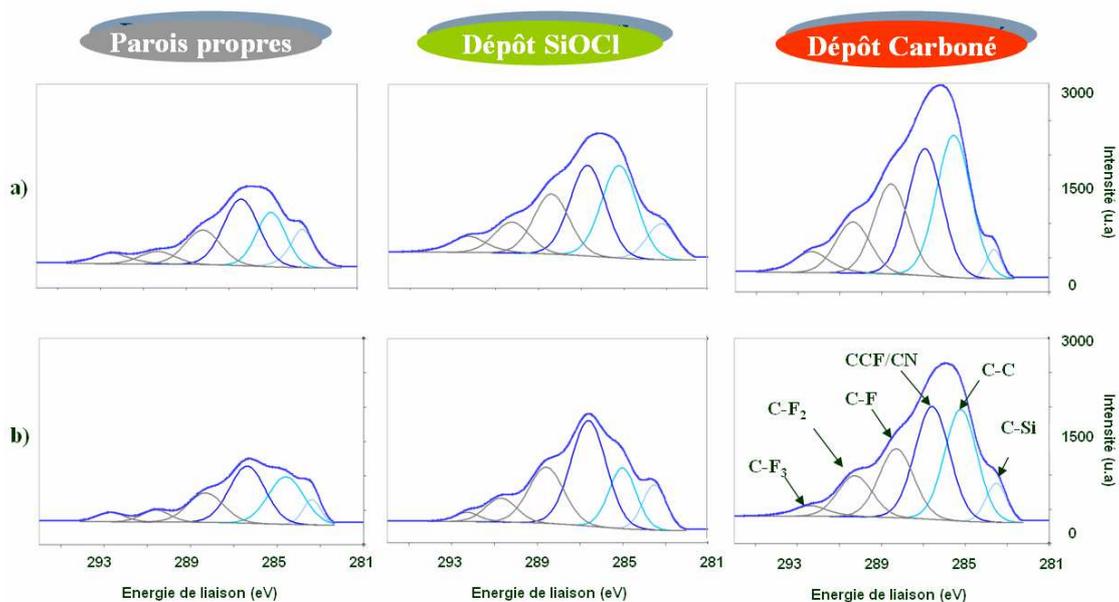


Figure III-15: Détail des spectres C1s issus de l'analyse XPS des échantillon de polysilicium après gravure en fonction de différents types de conditionnement au a) centre et b) au bord de plaque

Conformément aux profils obtenus (cf. figure IV-12), on retrouve moins d'espèces passivantes (CN, CF) sur les flancs polysilicium ayant été gravés en parois propres. Dans le cas de parois carbonées, la gravure de celles-ci par le fluor atomique amène beaucoup plus d'espèces passivantes dans la phase gazeuse que pour les autres conditionnements.

Comme nous l'avons dit la simulation des flancs de polysilicium par un échantillon flottant est une méthode grossière mais elle tend à s'en rapprocher à défaut d'analyse angulaire. Ces analyses d'échantillons flottants de polysilicium nous ont permis d'estimer quelle était la nature du dépôt pouvant se former sur le polysilicium porté au potentiel flottant ainsi que l'évolution de cette couche réactive avec un conditionnement de chambre différent. Par comparaison avec les analyses angulaires faites dans la section III.2, on observe que les analyses de la couche réactive se formant sur le polysilicium restent similaires.

IV.5 Confrontation des résultats et conclusion

Dans ce paragraphe nous confronterons les résultats obtenus en laboratoire avec les effets perçus sur le procédé de gravure à Crolles. De façon générale pour tous les conditionnements utilisés, on remarque un plus fort pourcentage en fluor en bord de plaque probablement dû à une densité de grille plus faible à graver.

Stratégie 1 : nettoyage

Si l'on compare les résultats obtenus au Laboratoire du LTM et à STMicroelectronics, (cf. figure IV-16) on peut voir que l'effet centre/bord est accentué dans le réacteur du laboratoire, alors que l'on observait seulement des crans sur les grilles en bord de plaque dans le réacteur Kiyō45. L'effet centre/bord dans le réacteur DPS300 est de 17nm. Ceci peut être expliqué par l'utilisation du gaz CHF_3 moins polymérisant que le CH_2F_2 .

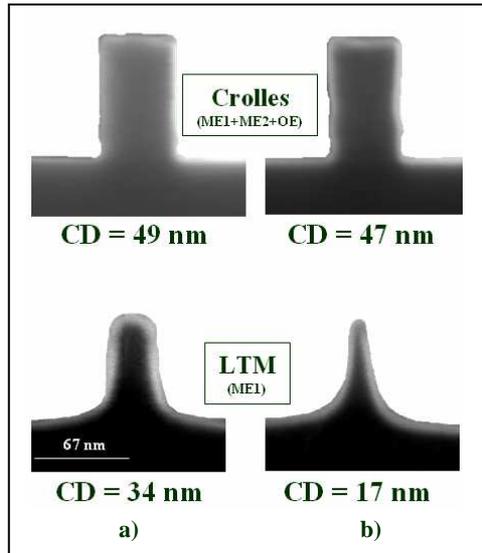


Figure IV-16: Comparaison des profils et CD_{poly} obtenus dans le réacteur industriel à Crolles et au laboratoire LTM au a) centre et b) bord de plaque.

Dans le cas de la stratégie en parois propres, les espèces passivantes, tel que les CF_x et CN, n'étant pas en quantité suffisante pour protéger les flancs d'une attaque latérale, les profils de la grille vont être surgravés latéralement par rapport à un autre conditionnement.

En plus de cet effet, le bord de la plaque va être sujet à un excès de fluor, dû à la non consommation de celui-ci par la gravure de la paroi d' Al_2O_3 (formation AlF_x), l'effet de surgravure en sera donc accentué (cf. figure IV-17).

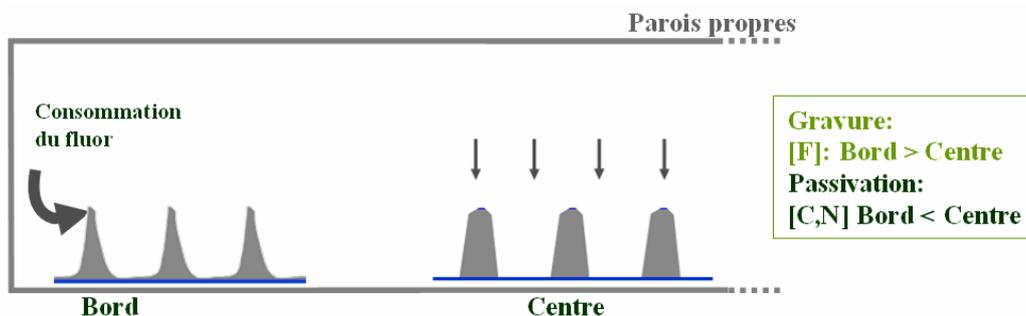


Figure IV-17: Schéma résumant les mécanismes intervenant lors la gravure polysilicium en chimie $CH_2F_2/SF_6/N_2$ dans un réacteur aux parois propres.

Stratégie 2 : Nettoyage + dépôt

Dépôt SiOCl

Si l'on compare les résultats entre les deux réacteurs de gravure on constate des profils de grille similaires, c'est-à-dire droit, et des dimensions de grilles du même ordre de grandeur. Il semblerait que pour les chimies utilisées ici, ce conditionnement SiOCl soit le plus approprié.

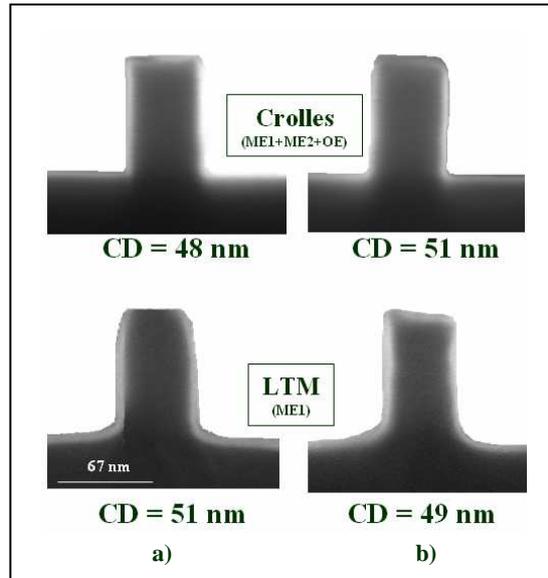


Figure IV-18: Comparaison des profils et CD obtenus dans le réacteur industriel à Crolles et au laboratoire au LTM au a) centre et b) bord de plaque.

Dans le cas des parois SiOCl, la passivation étant en proportion plus importante qu'en parois propres, elle sera suffisante pour ralentir la gravure latérale des motifs et conduire à des profils droits au centre de la plaque, mais aussi en bord de plaque, car l'excès de fluor va être consommé par la gravure des parois de SiOCl en formant une couche réactive de SiOF_x, (cf. figure IV-19).

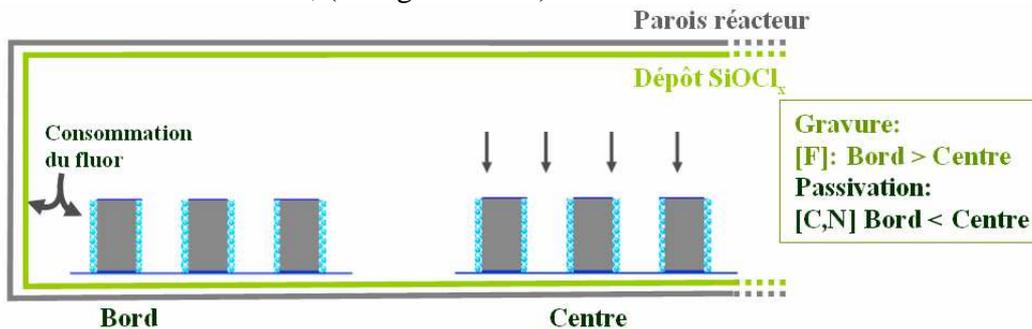


Figure IV-19: Schéma résumant les mécanismes intervenant lors la gravure polysilicium en chimie CH₂F₂/SF₆/N₂ dans un réacteur aux parois recouvertes d'un film de SiOCl.

Dépôt carboné

En comparant les résultats obtenus dans les deux réacteurs en conditionnement carboné on retrouve là aussi le même type de profils, pentus. En bord de plaque, les résultats semblent légèrement différents. Il semble que, dans le réacteur de Crolles, la passivation en bord de plaque est plus importante et induit donc un CD plus grand de 6nm. Pour le réacteur du LTM on constate des grilles plus petites en bord de plaque. Ceci pouvant être expliqué par la nature du conditionnement carboné utilisé. En effet celui utilisé à Crolles est beaucoup plus polymérisant (CF₄/CH₂F₂) en comparaison avec celui utilisé au LTM (HBr/CHF₃)

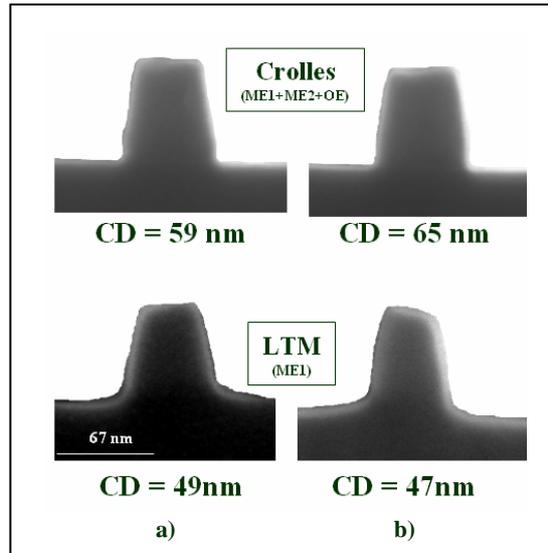


Figure IV-20: Comparaison des profils et CD à mi hauteur obtenus dans le réacteur industriel à Crolles et au laboratoire au LTM au a) centre et b) bord de plaque.

Dans le cas d'un conditionnement carboné (cf. figure IV-21), le fluor grave les parois en carbone et libère des CF_x . Le plasma ainsi enrichi induit une passivation plus importante aux fonds des motifs. Pulvérisée ensuite sur les flancs, cette surpassivation conduit à des profils pentus et des dimensions de grille plus importantes. En bord de plaque, si le conditionnement est très polymérisant on aura tendance à accentuer cet effet. Les profils de grilles seront donc plus larges et plus pentus en bord de plaque dans le cas du conditionnement utilisé à Crolles.

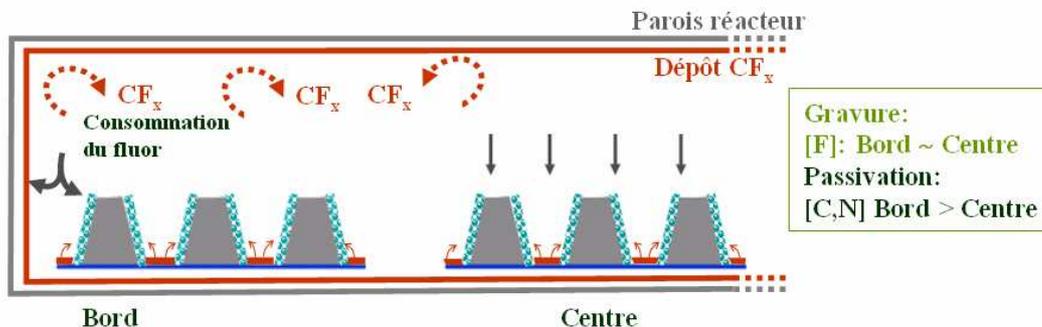


Figure IV-21: Schéma résumant les mécanismes intervenant lors la gravure polysilicium en chimie $CH_2F_2/SF_6/N_2$ dans un réacteur aux parois recouvert d'un film carboné.

Lors de ce chapitre IV nous avons évalué l'impact de la nature chimique des parois du réacteur sur les caractéristiques dimensionnelles de la grille comme le CD, les profils mais aussi l'uniformité des CD sur la plaque. Nous en avons déduit que la stratégie de conditionnement N_2 , et plus particulièrement celle par dépôt $SiOCl$, était la plus adéquate pour les chimies en $SF_6/CH_2F_2/N_2$. Le conditionnement carboné peut également être utilisé à conditions d'une optimisation du procédé de gravure.

Chapitre V : Contrôle de variabilité des dimensions de la grille 45nm et développement de solutions en gravure.

Les spécifications de la microélectronique pour la production des futurs nœuds technologiques 45nm et au-delà, ont classé le contrôle dimensionnel comme l'un des intérêts majeurs pour les ingénieurs chercheurs⁷⁹. Comme nous l'avons décrit dans la section I.3.2, les variations de la dimension des grilles sont l'une des causes principales de dispersion des paramètres électriques du transistor. Il est donc indispensable de minimiser ces variations afin de pouvoir atteindre les spécifications fixées par l'ITRS, à savoir un contrôle dimensionnel total, comprenant les variations lot à lot, plaque à plaque, intraplaque et intrapuce, inférieur à 2.8nm (cf. tableau I-3). Dans ce chapitre, nous présenterons tout d'abord les notions de contrôle des procédés en milieu industriel, puis l'analyse des différents contributeurs de la variabilité du CD de la grille pour le nœud technologique 45nm et enfin les actions correctives mises en place afin de minimiser ces variations.

V.1 Le contrôle des procédés

Aujourd'hui, l'enjeu premier de la microélectronique est d'obtenir des systèmes de transistors dont les performances électriques sont stables et centrées. Toutefois, les mesures électriques n'interviennent qu'à la fin du procédé de fabrication qui compte plus d'une centaine d'étapes pour une durée d'environ deux mois de temps de cycle de production. Il semble donc nécessaire que l'ensemble des étapes du procédé de fabrication, soient elles aussi stables. Il existe deux niveaux de contrôle de stabilité des procédés. Le premier niveau est un contrôle de l'intégration des circuits réalisé grâce au SPC (Statistical Process Control : contrôle statistique des procédés) basé sur les mesures de métrologie. Le deuxième niveau est un contrôle des équipements à l'aide de la FDC (Fault Detection and Classification : détection et classification des dérives équipements)⁸⁰.

V.1.1 Notion de contrôle des équipements (FDC)

Le contrôle des équipements est basé sur l'étude des paramètres machines (pression, puissance, température, émission optique...) mesurés durant chaque étape du procédé. Ainsi pour chaque plaque nous obtenons une série de courbes représentant l'évolution des paramètres pendant le procédé. Ces données permettent à long terme d'établir des corrélations entre les problèmes observés sur les plaques (par exemple dérive de dimensions) et les dérives des paramètres machine.

L'autre intérêt de la FDC est de pouvoir contrôler le procédé en temps réel et détecter rapidement une anomalie de fonctionnement machine. En fixant des limites à certains paramètres critiques il est possible d'arrêter le procédé en cours si ces limites sont dépassées.

La figure V-1 présente le suivi de l'émission optique par réflectométrie lors de la gravure principale du ME1 pour des plaques dont le taux d'ouverture est différent (Lot A < Lot B < Lot C). On remarque que le taux d'ouverture du masque génère un

signal LSR différent, notamment un écrasement du signal dans le cas du Lot C. La fin d'attaque n'est pas détectée et la machine de gravure est arrêtée et mise en alarme.

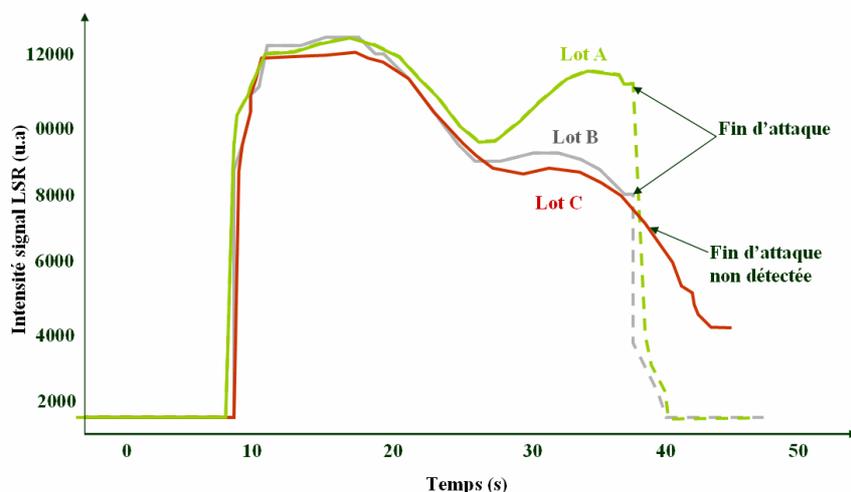


Figure V-1: Suivi FDC du signal LSR lors de la gravure principale du polysilicium ME1

V.1.2 Notion de contrôle statistique des procédés (SPC)

Le contrôle statistique des procédés consiste, pour chaque étape du procédé de fabrication considérée comme critique (comme l'étape de gravure grille), à effectuer automatiquement un contrôle dimensionnel sur un échantillon représentatif de plaques sur un lot. Ces mesures sont physiques et peuvent correspondre à des épaisseurs, des longueurs (ou dimension critique CD), une hauteur... Pour chaque plaque, les mesures sont effectuées en plusieurs sites. Classiquement, chez STMicroelectronics, l'échantillonnage se fait sur 17 points de mesures (représentatifs de la plaque) sur 4 à 8 plaques (selon qu'il s'agisse de mesure SEM ou OCD) d'un même lot.

Cette méthodologie de contrôle est appliquée sur trois différents types de mesures.

- Les mesures physiques effectuées sur un échantillon de plaques données lors des étapes critiques (gravure, polissage mécano chimique,...) du procédé de fabrication par des outils de mesure appelés équipements de métrologie.

- Les mesures électriques effectuées à la fin de la conception du transistor ainsi qu'à la suite des opérations de fabrication des interconnexions. Ces mesures sont effectuées sur l'ensemble des plaques d'un lot sur des structures de tests situées autour du circuit électrique.

Il existe une multitude de mesures électriques, les plus courantes et celles dont nous parlerons dans cette thèse sont la mesure du courant Ion, du CD électrique et la mesure de rendement (cf. paragraphe II.3.3).

Ces tests sont effectués de manière systématique pour garantir aux clients la qualité des circuits livrés.

Le contrôle du procédé va donc être assuré par l'introduction de limites de spécification appliquées à chaque entité de mesure. Ces limites ne doivent être en aucun cas franchies, pour ne pas risquer un dysfonctionnement du circuit électrique. Elles garantissent donc le bon fonctionnement des circuits.

De plus, pour renforcer le contrôle sur chaque étape, à partir des mesures décrites, des indicateurs statistiques (tels que la moyenne, l'écart type,...) sont calculés puis comparés à des limites de contrôle. Les limites de contrôle calculées à $\pm 3\sigma$, déterminent ainsi les limites de maîtrise du procédé. Si elles sont dépassées, l'équipement sera alors arrêté. Ces limites permettent de vérifier le bon déroulement de l'étape de fabrication et de détecter des dérives des équipements. Ce contrôle est aujourd'hui visualisé à travers un système de cartes de contrôle.

La figure V-2 présente l'exemple d'une de ces cartes de contrôle sur la moyenne des CD_{Poly} (mesure scattérométrique moyenne à partir de 17 sites de mesure de 8 plaques par lot) sur une période de 3 mois (soit au total 25 lots).

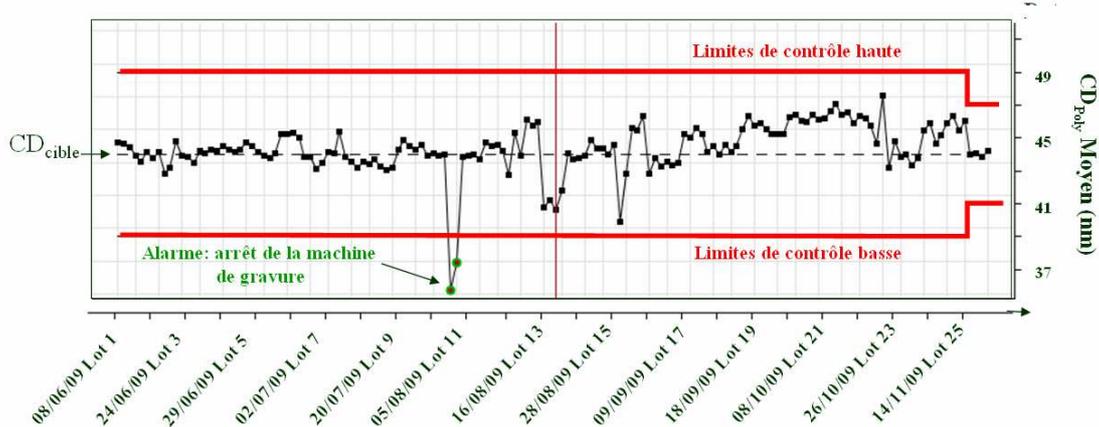


Figure V-2: Suivi SPC des mesures CD_{Poly} par scattérométrie des grille après gravure polysilicium.

Lors de cette période, on distingue deux grandes phases caractéristiques dans le contrôle des procédés. La première correspond à un période de stabilité (entre les lots 1 et 10) où la moyenne des CD est centrée sur le CD_{cible} . La seconde correspond à une période de dérive des CD vers la limite haute de contrôle (entre les lots 11 et 24). Cette dérive CD a été attribuée au mauvais positionnement de la vanne de régulation de la pression. Après maintenance de la machine, le passage du lot 25 montre la résolution de ce problème par le recentrage des CD.

On remarque également, que les mesures sur le lot 11 étaient hors limites de contrôle et ont engendré une alarme et un arrêt de la chambre de gravure.

La SPC et la FDC sont des outils couramment utilisés en microélectronique, et permettent de contrôler la stabilité d'un procédé de gravure. Mais un contrôle n'est pas suffisant, il faut pour obtenir des limites de spécification agressives pouvoir diminuer les variabilités du procédé, et donc comprendre leur origine et mettre des actions correctives en place.

V.2 Variabilité du procédé grille 45nm

Dans un premier temps, nous nous sommes concentrés sur l'évaluation des contributeurs de variabilité du procédé grille 45nm, avec l'effet lot à lot, plaque à plaque et intraplaque. Afin de quantifier ces différents contributeurs, il a fallu déterminer le nombre de lots, de plaques et de sites à mesurer afin d'obtenir un échantillonnage représentatif des variabilités du procédé.

Nous avons évalué la variabilité intraplaque et plaque à plaque en mesurant par scattérométrie chaque structure mesdim des 66 puces présentes sur la plaque, pour 25

plaques d'un lot et sur 4 lots différents. La variabilité lot à lot a été évaluée à partir des mesures scattérométriques sur structure mesdim sur 17 puces représentatives des plaques, sur 4 plaques par lot et pour 15 lots différents.

Afin d'obtenir la contribution de chacune des étapes du procédé de définition de la grille 45nm, nous avons évalué la dispersion de la dimension critique des motifs après l'étape de lithographie sur le CD_{PH} après gravure complète de la grille sur le CD_{Poly} et sur le CD_{Bias} ($CD_{Poly}-CD_{PH}$). Les dispersions CD mesurées pour les étapes de lithographie (dispersion CD_{PH}), gravure (Dispersion CD_{Bias}) et des deux étapes cumulées (dispersion CD_{Poly}) sont 3.1, 2.6 et 3.4nm respectivement.

Grâce à une analyse de variance, nous avons par la suite obtenu les contributions des effets lot à lot, plaque à plaque et intraplaque provenant du procédé de lithographie, du procédé de gravure et des deux procédés cumulés sur la dispersion CD comme le présente la figure V-3.

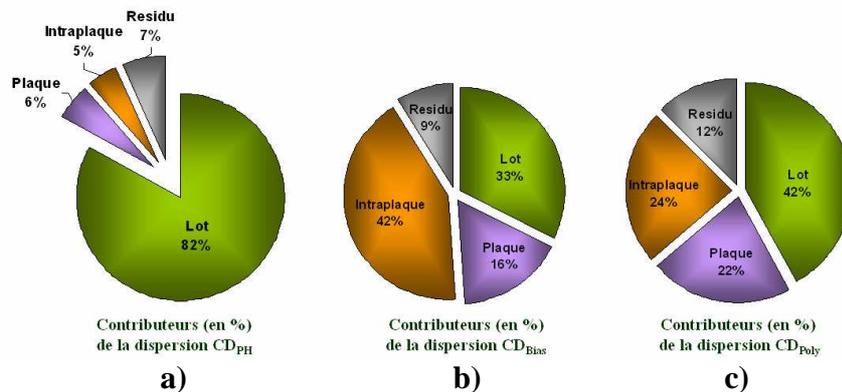


Figure V-3: Contributeurs (en %) de la dispersion du CD_{moyen} des motifs provenant du procédé de a) lithographie, b) gravure et c) des deux étapes cumulées.

L'analyse de variance montre que la contribution principale de la dispersion observée sur le CD après la lithographie vient de l'effet lot à lot, à 82% ($3\sigma=2.2nm$). Quand au procédé de gravure grille, l'effet intraplaque semble contribuer à la dispersion du CD_{Bias} à hauteur de 42% ($3\sigma=1.7nm$). On notera que les effets lot à lot et plaque à plaque contribuent également de manière importante à la dispersion avec 33% ($3\sigma=1.5nm$) et 16% ($3\sigma=1.1nm$) respectivement. Le pourcentage résiduel est faible et montre que les effets lot à lot, plaque à plaque et intraplaque sont bien les contributeurs principaux de la dispersion CD (en lithographie et en gravure).

Ainsi chaque contribution doit faire l'objet d'amélioration, mais cette étude a révélé que les efforts en lithographie devaient se porter principalement sur l'effet lot à lot, et pour la gravure sur l'effet intraplaque et lot à lot.

Un cycle d'amélioration de la variabilité peut donc être défini (cf. figureV-4). Grâce à l'analyse des différents contributeurs de la dispersion CD, de leur origine, et des études faites sur la compréhension du procédé de gravure grille (cf. chapitre III), nous pouvons mettre en place des solutions afin de pouvoir diminuer la variabilité. Cette amélioration devra être vérifiée dans le temps grâce au suivi SPC.

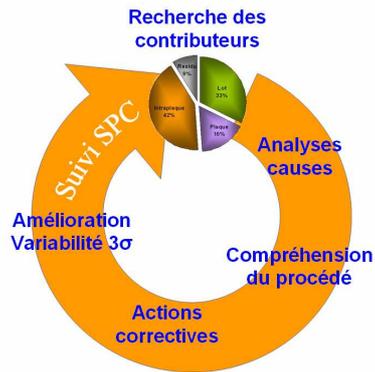


Figure V-4: Boucle représentant la méthodologie d'amélioration de la variabilité du CD_{grille}.

Les prochains paragraphes seront dédiés aux différentes actions entreprises afin d'améliorer la dispersion CD. Chacune de ces actions a fait l'objet d'un suivi SPC et d'une analyse de variance afin de valider leur capacité à améliorer l'uniformité 3sigma. Pour la clarté des résultats nous présenterons l'évolution des variabilités seulement en fin de chapitre.

V.3 La rugosité

Bien qu'elle ne soit pas prise en compte dans la variabilité 3σ totale de 2.8nm préconisée par l'ITRS, avec la réduction en dimension des dispositifs, le contrôle de la rugosité de ligne LER (ou LWR) fait l'objet également d'objectif de plus en plus agressive comme en témoigne l'extrait de l'ITRS 2008 (cf. tableau V-1).

Year of Production	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
DRAM 1/2 pitch (nm)	68	59	52	45	40	36	32
Low frequency LWR: (nm, 3σ) <8% of CD	4.3	3.7	3.2	2.8	2.5	2.2	2.0

Tableau V-1: Extrait de l'ITRS 2008.

La feuille de route préconise un contrôle de la rugosité basse fréquence LWR inférieur à 8% du CD de la grille, soit pour une grille de 45nm, un LWR à 2.8nm.

Nous avons vu dans le chapitre III que les résines 193nm utilisés en lithographie pour la définition de la grille 45nm ont une rugosité LER de 6nm environ. Le procédé de gravure en lui-même nous permet de diminuer cette rugosité de ligne d'environ 1nm. L'ajout d'un traitement de la résine par un plasma HBr en début de procédé d'ouverture du masque dur permet finalement d'atteindre une rugosité LER d'environ 3.6nm. Soit 1nm au dessus des préconisations de l'ITRS. Les études menées sur le procédé d'ouverture du masque dur et du polysilicium n'ont pas révélé d'autres paramètres permettant de faire évoluer la rugosité, il était donc important de savoir quel était l'impact de 1nm de dégradation sur les paramètres électriques tel que la tension seuil V_{th} ou le courant I_{on} et le courant de fuite I_{off} .

Pour cela des transistors n- et p-MOS de longueur de grille (L) variant de 40 à 200nm et de largeur (W) variant de 120 à 1μm, ont été testés électriquement sur des plaques présentant une rugosité standard de 3.6nm (référence) et une rugosité dégradée de 4.6nm pour un même CD moyen de 48.5nm (LWR dégradée).

Les résultats électriques, présentés dans la figure V-5 montre que la dégradation de 1nm en rugosité pour des dimensions de grille de 40nm et plus n'a pas ou peu

d'impact sur la tension de seuil V_{th} . En effet les populations avec un LWR de référence et dégradé se superposent.

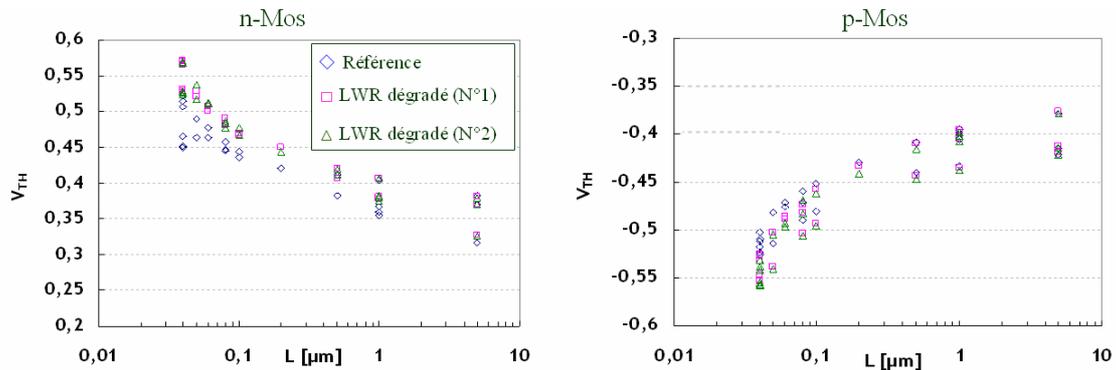


Figure V-5: Evolution de la tension seuil V_{th} en fonction de la longueur de grille (CD) pour différentes rugosité de ligne LWR sur des transistors n et p-Mos

Cette analyse est importante pour la technologie 45nm car elle nous a permis de montrer qu'une variation de 30% (1 nm) de la rugosité de bord de ligne n'avait pas d'impact au niveau des paramètres de commande de la grille de transistor.

V.4 La variabilité intraplaque

Les analyses de variance de la figure V-3, montraient que la variabilité intraplaque était essentiellement due aux procédés de gravure. Lorsque ce travail d'amélioration de la dispersion CD a été entrepris, la dispersion 3σ sur la plaque était de 2.4nm (mesurée sur 66points de mesure), avec des dimensions de grille plus importantes au centre de la plaque qu'au bord.

Cette signature centre/bord apparaît dès la gravure HM et est transférée lors de la gravure polysilicium comme nous le montre les cartographies des mesures CD des motifs après gravure HM et polysilicium de la figure V-6.

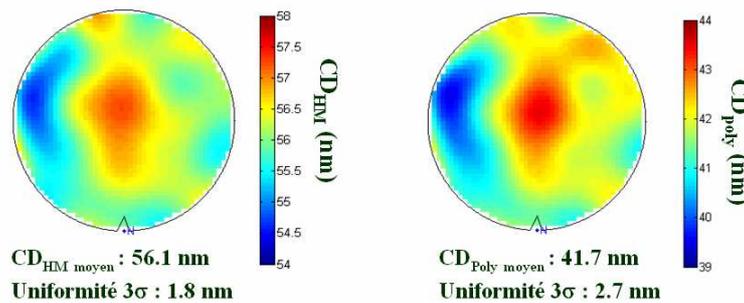


Figure V-6: Cartographie des CD_{HM} et CD_{Poly} sur une plaque ayant été gravée dans les conditions standards du procédé de gravure grille 45nm.

Comme nous l'avons vu dans le chapitre II, le réacteur de gravure Kiy045 présente plusieurs paramètres variables de façon indépendante en centre et en bord de plaque. Le fait que la dispersion des CD ait une signature centre/bord nous donne donc l'opportunité de pouvoir l'améliorer.

V.4.1 Injection des gaz centre/bord

L'injection des gaz est l'un des paramètres contrôlable de façon indépendante au centre et en bord de plaque. Nous avons évalué le changement de statut de l'injection des gaz lors des étapes d'ouverture Darc et TEOS pour la gravure HM. Comme nous l'avons vu dans le chapitre III, le changement des débits de gaz lors des étapes agissant sur la résine, tel que l'étape de cure, n'ont pas beaucoup d'influence sur les dimensions des grilles, le choix du changement de statut s'est porté donc sur les étapes d'ouverture du Darc et du TEOS, qui sont des étapes déterminantes pour la gravure HM. Sur les mesures CD_{HM} et d'uniformité obtenues en modifiant la répartition des gaz de « center » à « edge » lors de l'ouverture Darc et TEOS (cf. figure V-7) aucune amélioration n'a été observée.

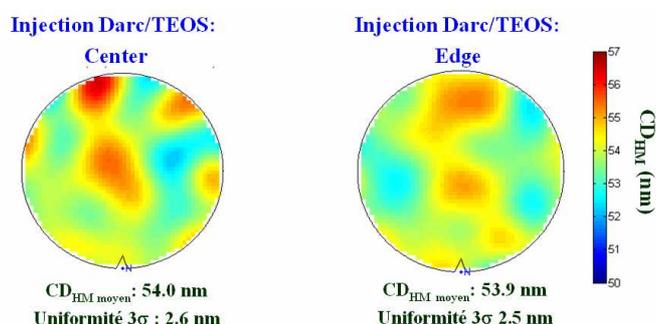


Figure V-7: Cartographie des CD_{HM} obtenus sur des plaques ayant été gravées dans les conditions d'injection de gaz à dominance en centre « Center » ou à dominance en bord de plaque « Edge » lors de l'ouverture du Darc et du TEOS.

Ne pouvant pas améliorer l'uniformité lors de la gravure HM, nous pouvons essayer de compenser cette signature centre/bord pendant la gravure polysilicium. De plus des études préliminaires, sur des plaques sans motifs, avaient montré une amélioration de l'uniformité des vitesses de gravure verticale par le changeant du statut de l'injection des gaz de « equal » à « center » lors de l'étape de surgravure du polysilicium. La figure V-8 présente les cartographies des vitesses de gravure sur ces plaques sans motifs ayant été gravées avec 60s d'OE pour des répartitions de gaz uniforme, « equal », et à dominante au centre de plaque, « center ».

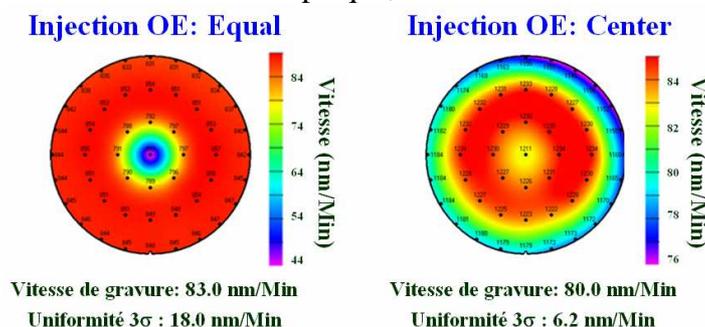


Figure V-8: Cartographies des vitesses de gravure verticale sur polysilicium obtenues pour 60s d'étape de surgravure OE dans les conditions d'injection de gaz uniforme « equal » ou à dominante centrale « center ».

Les résultats montrent une amélioration de la dispersion de vitesse de gravure verticale de 18nm/Min à 6nm/Min sur la plaque. Malgré ces résultats prometteurs, les études réalisées sur plaque avec motifs n'ont pas abouti à une amélioration de l'uniformité des vitesses latérales de gravure et donc de l'uniformité des dimensions de grilles, comme le montre la figure V-9.

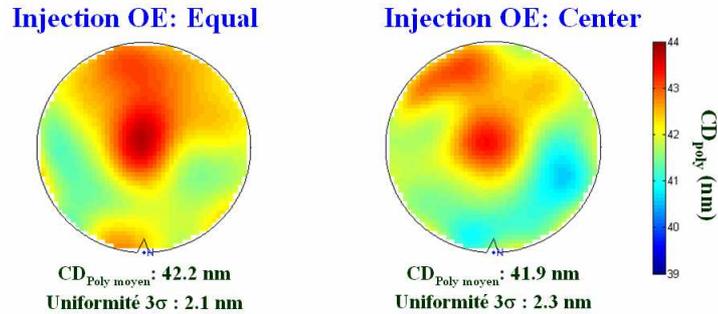


Figure V-9: Cartographies des CD_{Poly} obtenus sur des plaques ayant été gravées dans les conditions d'injection de gaz uniforme « equal » ou à dominante centrale « center » lors de la surgravure du polysilicium.

V.4.2 Température centre/bord

L'impact du changement de température sur le procédé de gravure grille a été décrit dans les paragraphes III.2.1 et III.3.1. Rappelons que l'impact du changement de température pendant l'ouverture du masque dur était de 0.5nm/°C et que le fait de modifier les températures uniquement au centre de la plaque avait eu un fort impact sur l'uniformité des dimensions.

Afin de prédire l'évolution des CD_{Poly} sur la plaque en fonction de la température appliquée en centre (T_{Centre}) lors de la gravure HM dans la gamme étudiée (de 40 à 50°C), les résultats ont été traduits sous forme de polynôme de second degré de type:

$$CD_{Poly}(d_i) = a(d_i) + b(d_i)T_{Centre} + c(d_i)T_{Centre}^2$$

Avec CD_{Poly} : dimension des motifs après gravure complète de la grille

T_{Centre} : température du centre de plaque lors de la gravure HM

d_i : distance du centre de la plaque

a, b, c : coefficients du polynôme dépendants de la distance au centre de la plaque d_i

Par exemple, pour une distance de 50mm du centre de la plaque, nous avons, à partir de la courbe des CD_{Poly} en fonction des températures du centre de la plaque (40, 45 et 50°C) présentés dans la figure V-10, obtenu pour les coefficients a, b et c les valeurs 55.6, -0.15 et -0.003 respectivement.

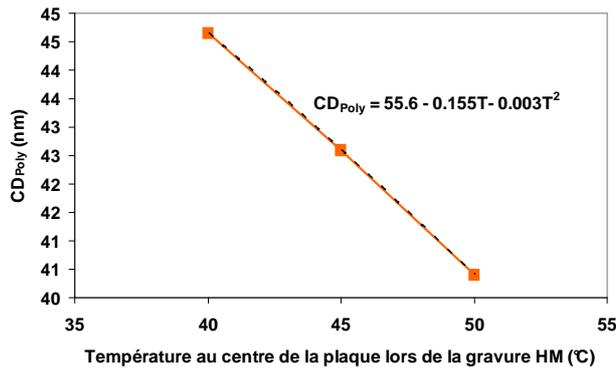


Figure V-10: Evolution du CD_{poly} mesuré sur un rayon à 50mm de distance du centre de plaque pour des température au centre de plaque lors de la gravure HM de 40, 50 et 60°C.

Ainsi pour chaque distance d_i nous pouvons simuler l'évolution des dimensions des grilles en fonction de la température appliquée au centre de la plaque lors de la gravure HM.

Rappelons que nous voulons pour améliorer l'uniformité, diminuer les dimensions de la grille au centre de la plaque. Selon les résultats obtenus lors du chapitre III, il faut donc augmenter la température au centre de la plaque afin de diminuer la polymérisation des couches de passivation. Nous avons donc simulé quelles seraient les dimensions CD obtenus après la gravure complète de la grille pour des températures au centre de la plaque lors de l'ouverture HM de 42, 44, 46 et 48°C. La figure V-11 présente ces simulations ainsi que les résultats obtenus avec le procédé d'ouverture HM standard à 40°C.

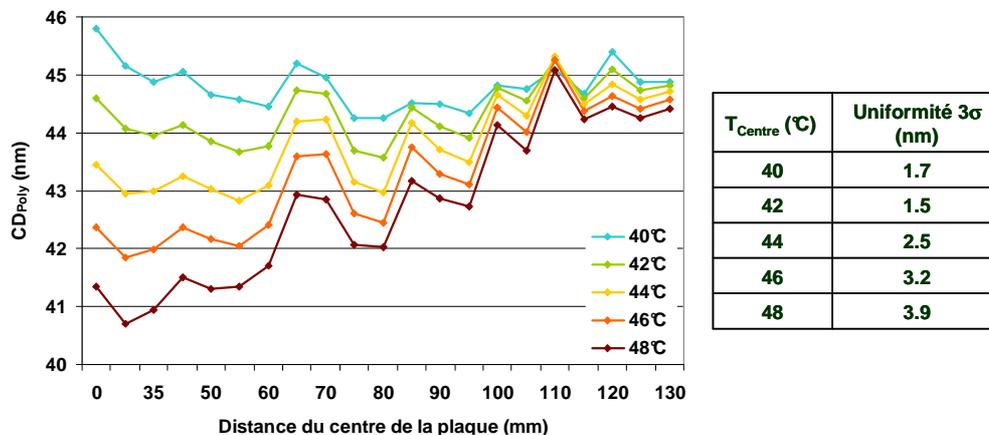


Figure V-11: Simulation de l'évolution des CD_{poly} en fonction de différentes températures au centre de plaque lors de la gravure HM selon la distance par rapport au centre de la plaque.

Pour une température de 42°C au centre de la plaque, il semblerait que la signature disparaisse et entraîne une légère amélioration de l'uniformité 3σ de 0.2nm.

Après modification dans la recette de production de la température au centre de la plaque de 40 à 42°C, nous avons vu que la signature centrale due à la gravure HM a bien été supprimée, comme nous le montre la figure V-12. L'uniformité n'a été que très peu améliorée (environ 0.2nm) car la suppression de la signature au centre de la plaque a révélé une autre signature (de même amplitude) située au nord de la plaque.

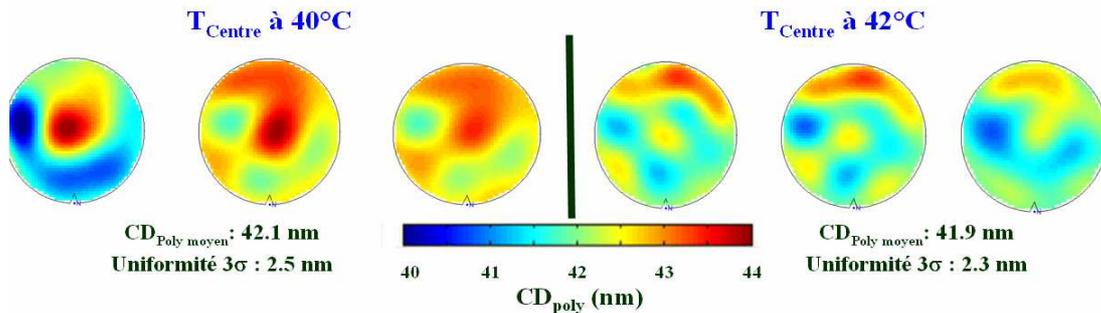


Figure V-12: Cartographies des CD_{Poly} obtenus sur des plaques ayant été gravées avant changement de température en HM (T_{Centre}=40°C) et après changement (T_{Centre}=42°C).

Afin de savoir si la nouvelle signature observée, que nous nommerons nord/sud, provenait exclusivement de la chambre de gravure nous avons fait tourner de 180° des plaques à leur entrée dans le réacteur de gravure avant la gravure du HM et du polysilicium. Les résultats CD obtenus sur les plaques tournées de 180° montrent que la signature s'est déplacée au sud de la plaque (cf. figure V-13) confirmant ainsi que la signature est due uniquement au réacteur de gravure et non au matériau à graver.

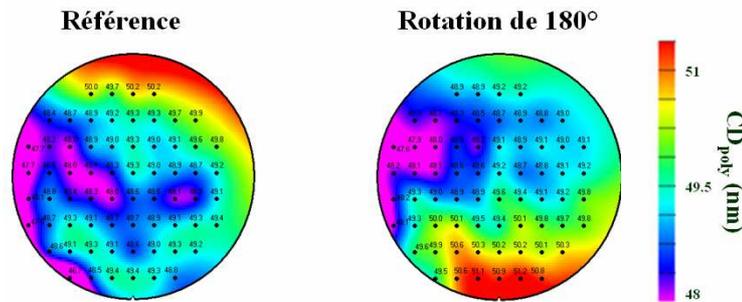


Figure V-13: Cartographies des CD_{Poly} obtenus pour une plaque ayant été gravée dans des conditions standard d'orientation et une autre ayant été tournée de 180° avant gravure HM et Polysilicium

La conception du réacteur de gravure ne permet pas de compenser cette nouvelle signature nord/sud. Il a donc fallu faire évoluer le porte substrat du réacteur de gravure Kiyō45 afin de passer à une génération plus aboutie supprimant cette signature nord/sud et diminuant la dispersion sur la plaque de 0.8nm pour atteindre 1.5nm.

V.4.3 Conditionnement de la chambre de gravure

Les études menées lors du chapitre IV sur les interactions plasma/parois du réacteur de gravure ont démontré que le conditionnement SiOCl préconisé par LAM était bien le conditionnement le plus adéquat en terme de profils de grille mais également en terme d'uniformité sur la plaque pour notre procédé de gravure. En effet rappelons que le conditionnement en parois SiOCl présentait la meilleure uniformité intraplaque avec gravure complète de la grille :

$$3\sigma_{\text{ParoisSiOCl}} = 1.5\text{nm} < 3\sigma_{\text{Paroispropores}} = 1.8\text{nm} \ll 3\sigma_{\text{ParoisCarbone}} = 3\text{nm}$$

Grâce au suivi SPC nous avons pu valider la stabilité du conditionnement SiOCl en terme de variabilité intraplaque.

V.5 La variabilité plaque à plaque et lot à lot

Les variabilités plaque à plaque et lot à lot sont fortement liées. Les actions correctives que nous développerons dans cette section ont été mises en place pour corriger les effets lot à lot mais notons qu'elles pourraient très bien être appliquées pour diminuer d'éventuels effets plaque à plaque si l'échantillonnage des mesures était plus important (25 plaques pour chaque lot de tous les lots)

V.5.1 Conditionnement de la chambre

Les stratégies de conditionnement de la chambre (cf. chapitre IV) ont été mises en place afin d'assurer la reproductibilité des procédés de gravure de plaque à plaque mais aussi lot à lot. Comme pour la variabilité intraplaque nous avons également pu valider la stabilité des procédés de gravure avec un conditionnement SiOCl d'une plaque à une autre et d'un lot à un autre grâce au suivi FDC et SPC.

V.5.2 Les boucles de régulation

Un important travail, en lithographie et en gravure, a été fait sur le procédé de définition de la grille 45nm afin de minimiser la dispersion CD venant du lot à lot. Ceci passe par la mise en place de boucle de régulation. On distingue deux types de boucles de régulation :

- Les boucles proactives dites « Feedforward » en anglais. Ces boucles ont pour objectif de diminuer la variabilité d'une réponse (ici les dimensions des motifs) observée à une étape N en modifiant les paramètres de la recette de l'étape N+1.

- Les boucles rétroactives dites « Feedback » en anglais. Ces boucles sont utilisées pour réajuster la valeur d'un paramètre (ici la dimension des motifs) sur un lot (i+1), en modifiant les paramètres de la recette de l'étape N grâce aux mesures faites sur un précédent lot (i). Cette boucle peut aussi permettre de corriger une dérive de l'équipement liée au temps. A partir d'un modèle prédéfini, l'écart entre la valeur cible et la valeur mesurée au niveau de plaques d'un lot (i), permet de calculer la correction à effectuer sur les paramètres de la recette pour que les plaques du lot (i + 1) atteignent cette valeur cible. Ces deux types de boucles sont schématisés dans la figure V-14.

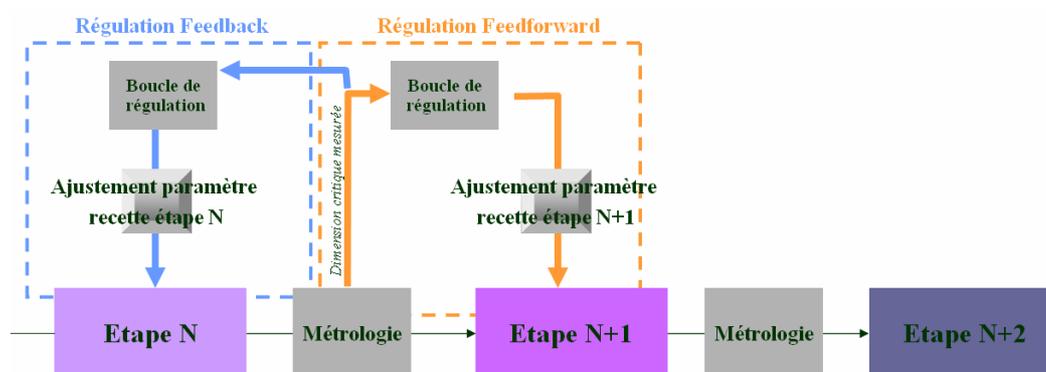


Figure V-14: Représentation schématique des systèmes de boucle de régulation feedback et feedforward.

V.5.3 Les boucles de régulation dans le procédé du nœud technologique 45nm

Deux boucles, déjà implantées dans les technologies précédentes, ont été mises en place pour la technologie 45nm afin de faire diminuer la variabilité CD du à l'effet lot à lot. La première boucle est une boucle feedback en lithographie. En fonction des mesures CD obtenues pour un lot (i), une correction de dose est appliquée au lot suivant pour obtenir une valeur plus proche de la valeur cible. Elle permet de corriger l'effet réticule et les dérives de procédé au cours du temps⁸¹.

La seconde boucle est une boucle feedforward entre la lithographie et la gravure du masque dur. Cette boucle propose donc d'ajuster la recette de la gravure du masque dur afin de contrôler la dimension critique des grilles après gravure. Le paramètre d'ajustement choisi est le temps de l'étape de réduction de cote résine, dit temps de trimming. En effet, comme nous l'avons vu dans le chapitre III, en modifiant plus ou moins le temps de cette étape on peut ajuster la dimension critique de grille après gravure comme nous le montre la figure V-15.

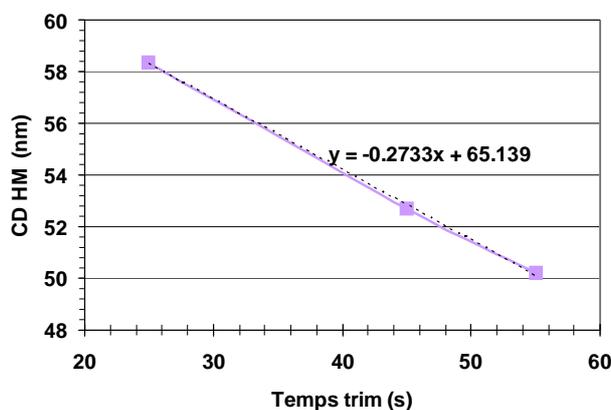


Figure V-15: Graphique représentant le CD_{HM} (à $\pm 0.4nm$) en fonction du temps de réduction de cote résine appliquée lors de la gravure HM. Estimation de la vitesse de réduction de cote de résine.

Ainsi l'étape de réduction de cote résine permet non seulement d'atteindre la dimension de grille souhaitée mais également de corriger d'éventuelles dérives perçues sur les mesures CD en sortie de lithographie.

Cette étape a été divisée en deux parties. Une première partie est dédiée à la correction des écarts observés après photolithographie : c'est le temps de trimming feedforward. Une seconde partie est liée à l'évolution de l'état des chambres de gravure et on parlera de temps de trimming feedback.

La boucle feedforward entre la gravure et la lithographie est gérée automatiquement par un outil informatique choisi par STMicroelectronics et fabriqué par Adventa : Process works. Ce logiciel va extraire du logiciel de traçabilité MES (Manufacturing Execution System ou interface graphique de gestion de lots) les mesures CD après lithographie. Grâce à la vitesse de trimming, process works va calculer le temps de trimming feedforward nécessaire à appliquer à l'étape de réduction de cote résine pour atteindre le CD_{PH} cible et supprimer l'éventuel dérive entre le CD_{PH} cible et le CD_{PH} réel. L'architecture de communication pour les boucles entre les étapes de lithographie et de gravure grille est représentée dans la figure V-16.

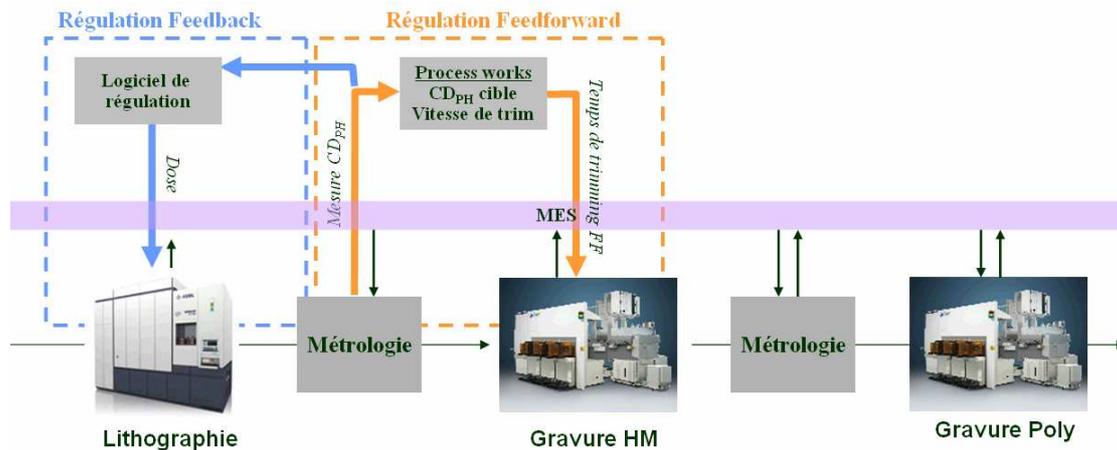


Figure V-16: Mise en place de la boucle de régulation feedback en lithographie et feedforward entre la lithographie et la gravure HM.

Ces boucles de régulation nous ont permis de diminuer la variabilité lot à lot 3σ du CD_{grille} de 3.8nm à 1.3nm. La figure V-17 présente la dispersion CD normalisée par rapport à la valeur cible, mesurée par scattérométrie sur 20 lots (17points de mesure sur 4 plaques par lot), après lithographie ($CD_{Cible}=66nm$) et gravure grille ($CD_{Cible}=46nm$) avant l'implantation des boucles de régulation et après stabilisation du procédé.

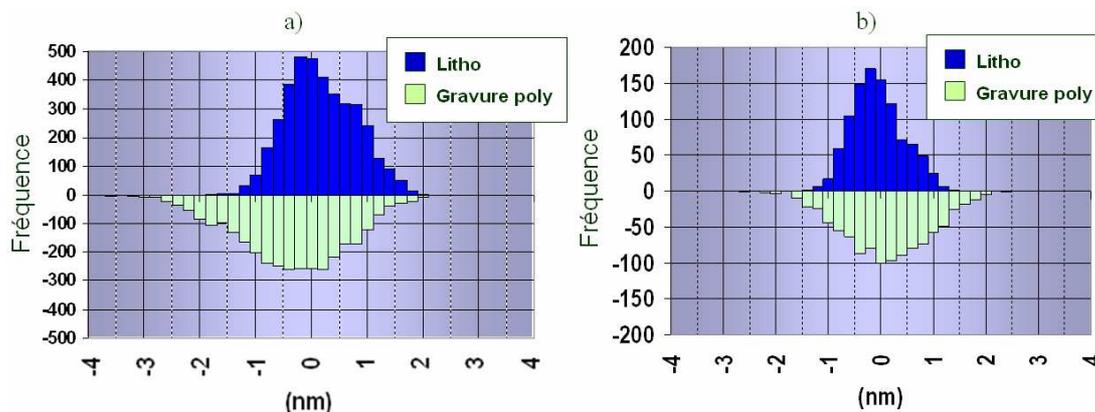


Figure V-17: Evolution de la dispersion CD mesurée en ligne après lithographie et gravure a) avant et b) après la mise en place des boucles de régulation.

On remarque que la dispersion CD observée après lithographie a été fortement diminuée par l'introduction de la boucle de régulation de feedback, de 2.2nm à 0.5nm. Pourtant bien que la lithographie soit très stable, on constate toujours une dispersion non négligeable après gravure. Cette dispersion est due au fait que de faibles variations, non détectées dans les étapes précédentes, tel que les variations de focus où l'épaisseur du masque dur TEOS peuvent être amplifiées en gravure et générer une variabilité lot à lot.

Le fait d'avoir ajouté le double patterning dans le procédé de définition des SRAM sur la technologie 45nm, nous offre l'opportunité d'ajouter une autre boucle de régulation entre la gravure HM et la gravure polysilicium.

V.5.4 Nouvelle boucle de régulation entre les gravures

Comme nous venons de le voir, la variabilité CD due à l'effet lot reste un point important pour l'amélioration de la dispersion, notamment en gravure. Mais la question est : avons-nous les moyens de compenser cette dispersion lors de la gravure polysilicium ?

Le procédé de gravure polysilicium consomme latéralement environ 7nm du motif HM initial, de ce fait on peut donc penser que l'on peut diminuer ou augmenter cette consommation latérale afin de compenser les dérives perceptibles après la gravure du masque dur. Le problème est que, pour la gravure polysilicium, il n'existe pas de paramètre simple tel qu'un temps de gravure (comme lors de la réduction de cote résine) ou comme une dose (dans le cas de la boucle feedback en lithographie) pour modifier les dimensions de grille sans avoir un impact sur le profil de gravure.

Une étude poussée sur l'impact des paramètres de la gravure polysilicium sur les profils de grille doit donc être faite. Rappelons que dans le paragraphe III.3.1, nous avons étudié cinq des principaux paramètres de l'étape de gravure principale (BT+ME1) du polysilicium afin de connaître leur impact sur les dimensions de grille, sur l'uniformité sur la plaque et sur la rugosité après gravure complète de la grille. Ce plan d'expérience étudiant l'impact de la pression (Facteur A), la puissance source (Facteur B), la tension de polarisation (Facteur C) et les débits de gaz CH_2F_2 (Facteur D) et N_2 (Facteur E) va servir de base pour l'étude approfondie des profils de grille.

a) Méthodologie d'évaluation de la réponse du profil

La difficulté de cette étude était de pouvoir, à partir du plan d'expérience de la gravure ME1, évaluer une réponse en profils de grille. A partir des différents essais réalisés (présenté dans la section III.3.1), nous avons effectué des coupes sur les motifs de grille au centre et au bord des plaques, soit au total 38 profils, après la gravure complète des grilles (BT+ME1+ME2+OE). L'analyse de ces profils au SEM HR, a montré que le plan d'expériences engendre un large panel de profils, allant de profils rogné (« notché » en anglais) à pentu comme le montre la figure V-18.



Figure V-18: Profils type notché, droit et pentu obtenus lors du plan d'expérience sur la gravure principale du polysilicium.

Par la suite, nous avons développé une méthodologie afin de pouvoir évaluer les variations de profils de gravure sur les différents essais. La méthode consiste, pour chaque condition expérimentale, à séquencer les profils de grille SEMHR en plusieurs parties. Ceci dans le but de connaître tous les 10nm, la distorsion du profil par rapport à une ligne de base, calculée à partir des profils réalisés dans les conditions standards. Combinée aux $\text{CD}_{\text{BiasPoly}}/2$ mesurés aux SEMCD sur les structures Mesdim pour chacun des essais, nous avons obtenu la réponse variation $\text{CD}_{\text{Bias}}/2$ pour chaque

hauteur de grille. Cette réponse est notée $CD_{Bias}^{Hauteur} / 2$, sa méthode d'obtention est présentée de façon schématique dans la figure V-19.

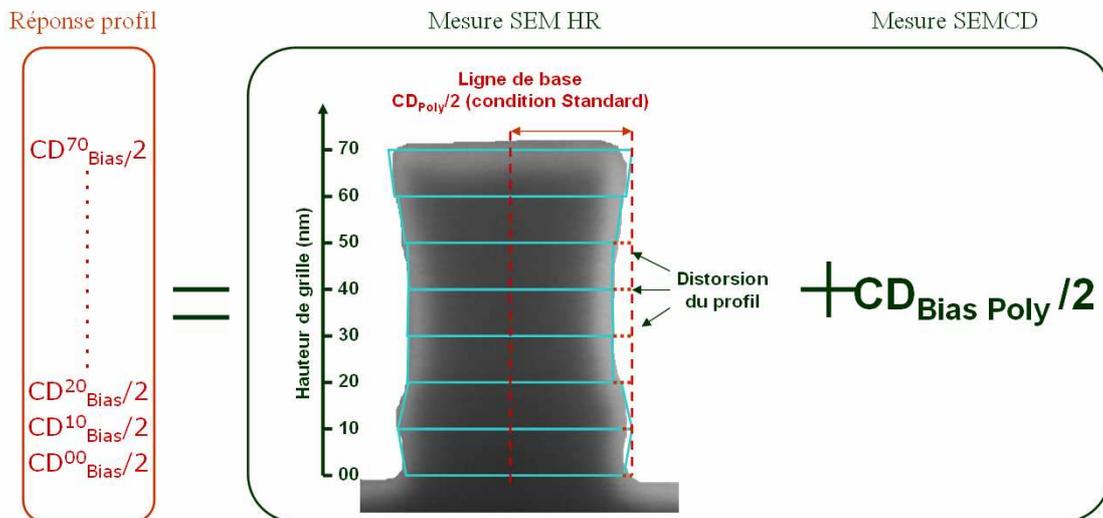


Figure V-19: Méthodologie pour évaluer les variations du profil sur toute la hauteur de grille.

b) Analyse de la réponse profil de grille

L'analyse des réponses $CD_{Bias}^{Hauteur} / 2$ (correspondant aux variations de profils) par le logiciel Statgraphics a été réalisée sur la partie concernant la gravure du ME1 (analyse des $CD_{Bias}^{70} / 2$ jusqu'au $CD_{Bias}^{10} / 2$) mais aussi sur la partie concernant la gravure du ME2 (analyse des $CD_{Bias}^{00} / 2$ et $CD_{Bias}^{10} / 2$), bien que le plan d'expérience ne concernait que la gravure principale du ME1.

La figure V-20 présente les diagrammes de Pareto de l'impact de la pression (facteur A), puissance source (facteur B), tension de polarisation (facteur C) et des débits de CH_2F_2 (facteur D) et N_2 (facteur E) et de leurs interactions (ex : CH_2F_2 avec N_2 pour le facteur DE) sur la variation du profil de grille. Le modèle décrit ici explique 90% des variations observées sur les profils de grille.

Bien que ces diagrammes soient complexes à analyser individuellement, on peut tout de même en extraire des tendances. Tout d'abord on retrouve celles observées dans le paragraphe III.3.1 pour l'analyse du $CD_{PolyBias}$, à savoir que les paramètres débit de CH_2F_2 (facteur D) et puissance source (facteur B) ont un fort impact sur les profils (leurs augmentations vont rendre les profils de grille plus larges et plus pentus). La tension de polarisation (facteur C) n'apparaît pas comme un effet significatif dans cette étude de profil, mais on observe toujours le fait que son augmentation entraîne des $CD_{Bias}^{Hauteur}$ plus grand (donc des profils de grille plus large). Le point important qui semble se dégager de cette analyse, est lié à l'interaction entre le CH_2F_2 et N_2 (facteur DE). Bien que la variation du débit de gaz N_2 (facteur E), pris seul, n'ait pas d'effet significatif sur les profils de grille lors du ME1, il semblerait que l'interaction des deux gaz ait lui une forte influence, ce qui est en accord avec l'analyse chimique des couches de passivation des flancs de grille qui présentait des liaisons de type CN (cf. paragraphe III.3.1). On notera tout de même le comportement différent de l'extrême haut du motif ($CD_{Bias}^{70} / 2$) où seule l'interaction CH_2F_2/N_2 est significative et le bas du motif ($CD_{Bias}^{00} / 2$) où la pression semble jouer un rôle dans la perte CD. On pourra être

critique sur la modélisation de l'extrême bas du motif qui bien qu'influencé par le ME1, est directement lié au ME2.

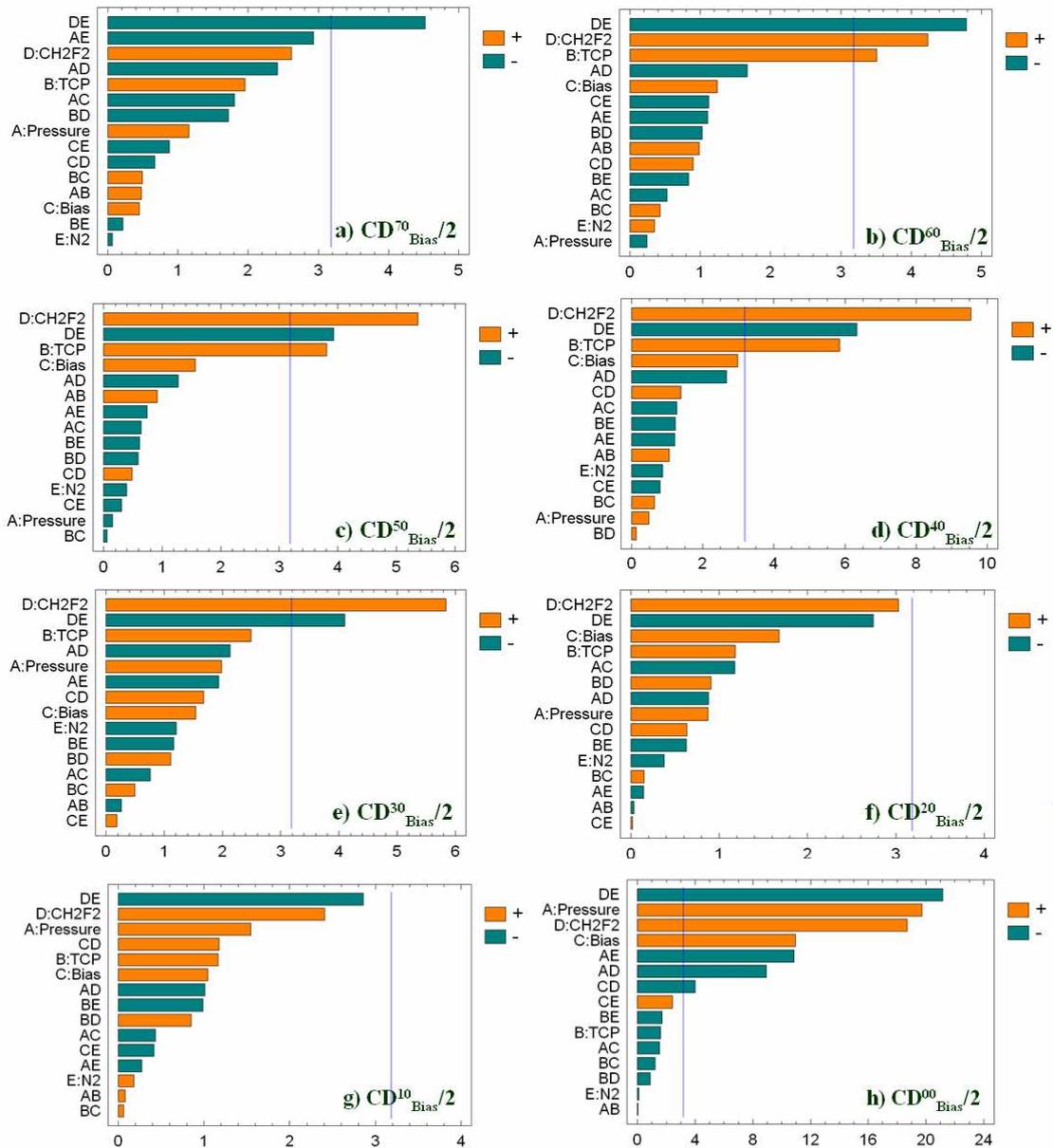


Figure V-20: Diagramme de Pareto présentant l'impact des paramètres pression, puissance source, tension bias et débit de CH_2F_2 et N_2 lors de la gravure ME1 sur les variations de profils en fonction de la hauteur considérée.

c) Reconstruction des profils

Comme nous l'avons dit dans le paragraphe II.4.3, les plans d'expériences nous donnent la possibilité de lier une réponse avec les paramètres étudiés par un polynôme. Pour l'analyse des variations de profil, le logiciel a donc généré 8 polynômes de second degré de type :

$$CD_{Bias}^{Hauteur} / 2 = a_0 + a_1A + a_2B + a_3C + a_4D + a_5E + a_6AB + a_7AC + a_8AD + a_9AE + a_{10}BC + a_{11}BD + a_{12}BE + a_{13}CD + a_{14}CE + a_{15}DE$$

Où A est la pression (en mTorr), B la puissance source (en watt), C la tension de polarisation (en Volt), D le débit de CH₂F₂ (en sccm) et E le débit de N₂ (en sccm). Les valeurs de coefficients (a₀, a₁...a₁₅) des différents polynômes obtenus sont présentées dans le tableau V-2.

Réponses	a ₀	Effets directs					Interactions (2nd ordre)									
		A	B	C	D	E	AB	AC	AD	AE	BC	BD	BE	CD	CE	
		a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇	a ₈	a ₉	a ₁₀	a ₁₁	a ₁₂	a ₁₃	a ₁₄	
CD ⁷⁰ _{Bias} /Z	-178.608	10.347	0.054	0.337	3.192	2.370	0.002	-0.030	-0.102	-0.099	0.000	-0.001	0.000	-0.003	-0.003	
CD ⁶⁰ _{Bias} /Z	-180.215	4.903	0.062	0.014	3.258	3.178	0.004	-0.012	-0.093	-0.049	0.000	-0.001	-0.001	0.005	-0.005	
CD ⁵⁰ _{Bias} /Z	-184.814	4.547	0.064	0.082	3.436	2.931	0.005	-0.018	-0.090	-0.042	0.000	-0.001	-0.001	0.003	-0.002	
CD ⁴⁰ _{Bias} /Z	-168.643	6.669	0.020	-0.065	2.970	3.038	0.004	-0.022	-0.115	-0.042	0.000	0.000	-0.001	0.006	-0.003	
CD ³⁰ _{Bias} /Z	-149.851	13.276	-0.005	-0.495	2.130	3.259	-0.001	-0.021	-0.143	-0.104	0.000	0.001	-0.001	0.011	0.001	
CD ²⁰ _{Bias} /Z	-145.517	8.848	-0.032	-0.024	2.172	3.088	0.000	-0.052	-0.098	-0.013	0.000	0.002	-0.001	0.007	0.000	
CD ¹⁰ _{Bias} /Z	-158.816	7.798	0.003	-0.275	2.000	4.006	0.001	-0.020	-0.116	-0.025	0.000	0.002	-0.002	0.014	-0.004	
CD ⁰⁰ _{Bias} /Z	-152.998	8.743	0.025	0.195	2.850	2.162	0.000	-0.006	-0.088	-0.085	0.000	0.000	0.000	-0.004	0.002	

Tableau V-2: Récapitulatif des polynômes de second degré reliant les réponses CD^{hauteur}_{Bias} avec les paramètres pression, puissance source, tension de polarisation, débit de CH₂F₂ et N₂ de la recette de gravure ME1.

Ainsi grâce à ces polynômes, on va pouvoir reconstruire le profil des grilles à partir des valeurs des paramètres de la recette de gravure ME1. Comme nous pouvons le voir dans la figure V-21, la reconstruction du profil à été superposé avec les images SEM du panel de profils du plan d'expérience de la figure V-19.

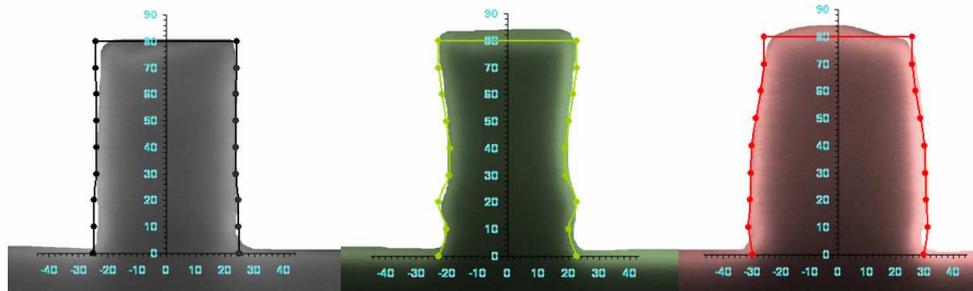


Figure V-21: Superposition du panel de profils obtenu par images SEM et de la reconstruction de ceux-ci à partir des polynômes de second degré.

L'intérêt de ces polynômes est qu'ils peuvent prédire la forme des profils de grille sur tout le domaine d'étude et inversement, c'est-à-dire qu'en entrant dans le modèle un profil de grille souhaité, le logiciel pourra calculer les valeurs de paramètres que nous devons mettre dans la recette de gravure pour obtenir ce profil. C'est cette dernière remarque qui sera la base de la compensation de la variabilité CD.

d) Compensation de la variabilité du CD_{HM}

Principe

Le but de la compensation de la dispersion des CD_{HM} par la gravure polysilicium est de pouvoir ajuster la gravure latérale sur toute la hauteur de la grille. Cela est possible grâce au modèle que nous venons de constituer. En effet, pour une dérive du CD_{HM} de x nm ($x \in [-2;2]$), il suffit de rentrer dans le modèle la moitié du CD_{BiasPoly} désiré (c'est-à-dire $(CD_{BiasPoly\ standard} - x) / 2$), ainsi le logiciel Statgraphics va calculer et nous donner les valeurs de pression, de puissance source, de tension de polarisation et de débit de CH₂F₂ et de N₂ (dans le domaine d'étude) s'approchant le plus des contraintes de CD_{BiasPoly} que nous lui avons imposées. La figure V-22 présente de façon schématique ce raisonnement.

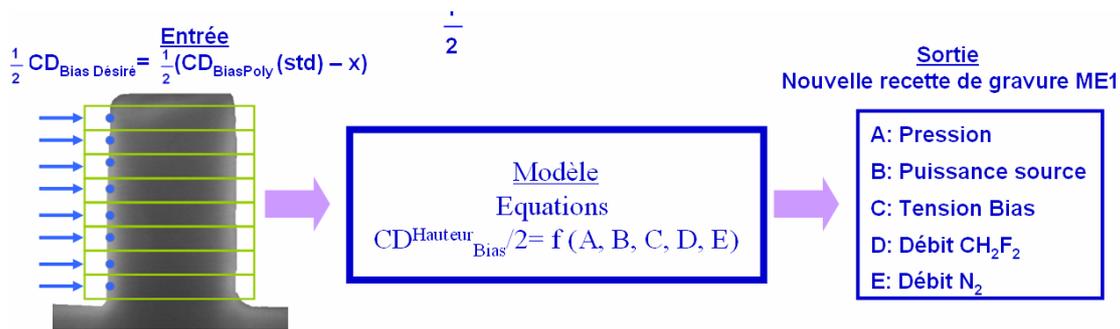


Figure V-22: Représentation schématique de la méthode de compensation des dérives du CD_{HM} .

Premier résultats

Afin de tester la capacité de la nouvelle méthode de compensation, nous avons voulu fortement dégrader la dispersion CD_{HM} d'un lot électrique. Pour cela, les 25 plaques d'un lot ont été divisées en 5, afin que chaque partie soit gravée avec un temps de réduction de cote de résine différent lors de la gravure HM (une partie servant de référence). De cette façon nous avons simulé une dégradation de la dispersion au niveau des CD_{HM} de 4.5nm. La figure V-23 présente les mesures SEM des CD_{HM} obtenues sur les 5 parties du lot, avec la partie référence dont le CD est centré sur le CD_{HM} cible, et 4 parties dont le CD_{HM} a été dégradé de -2, -1, +1 et +2 nm par rapport au CD_{HM} cible.

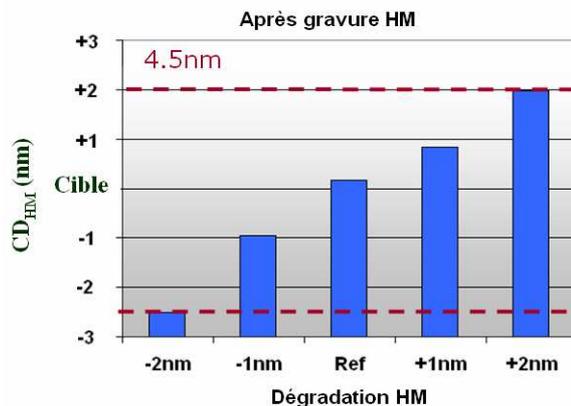


Figure V-23: Résultats CD obtenus pour 5 parties d'un lot ayant été gravées en HM avec des temps de réduction de cote résine différents, correspondant à des dérives de -2, -1, +1, +2nm par rapport au CD_{HM} cible.

Grâce à la méthode décrite dans la figure V-23, le logiciel a calculé les valeurs des paramètres (pression, puissance source, tension de polarisation, débit CH_2F_2 et N_2) constituant la nouvelle recette de gravure ME1 nécessaire pour la compensation des différentes dispersions.

Ainsi chaque partie du lot a été gravée en polysilicium avec des étapes de ME1 différentes pour compenser +2, +1, -1 et -2nm.

Les paramètres pression, puissance source, puissance de polarisation, débit de CH_2F_2 et N_2 utilisés pour les différentes recettes de compensation sont présentées dans le tableau V-3.

CD _{HM}	-2nm	-1nm	0nm (Ref)	+1nm	+2nm
Compensation ME1	ME1: +2nm	ME1: +1nm	ME1: std	ME1: -1nm	ME1: -2nm
Pression (mTorr)	a-1	a	a	a	a
Puissance Source (Watt)	b-50	b-29	b	b-36	b+30
Tension polarisation (Volt)	c+10	c+10	c	c+2	c+10
CH ₂ F ₂ (sccm)	d+3	d+1	d	d-3	d-4
N ₂ (sccm)	e+2	e+2	e	e	e-2

Tableau V-3: Récapitulatif des paramètres pression, puissance source, tension de polarisation, débit CH₂F₂ et N₂ constituant les recettes de compensation de +2, +1,-1 et -2nm, et la recette de référence.

Prenons l'exemple d'un CD_{HM} avec un décentrage par rapport au CD_{Cible} de -2nm, l'étape ME1 doit diminuer la gravure latérale de la grille polysilicium afin de compenser le CD de +2nm. La nouvelle recette de gravure ME1 sera ainsi constituée pour augmenter la passivation des flancs (augmentation entre autre du débit de CH₂F₂ de 3sccm).

Les mesures scattérométriques des CD_{Poly} obtenues après compensation, présentées dans la figure V-24, sont encourageantes puisqu'elles montrent la capacité de la méthode à diminuer la dispersion 3σ de 4.5nm à 1nm (ou de 4nm à 0.8 nm Min-Max).

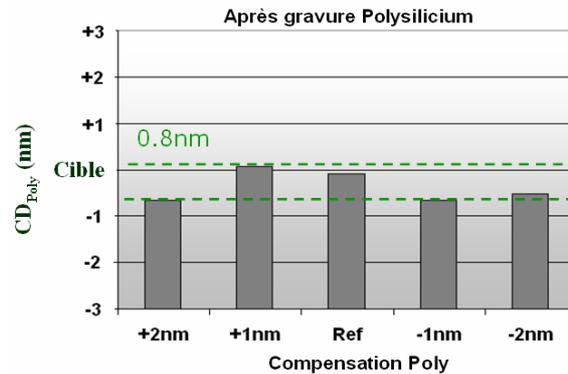


Figure V-24: Résultats CD obtenus après gravure complète des grille sur chaque partie du lot après la compensation de +2, +1, -1, -2nm lors de la gravure ME1.

De plus, les profils obtenus à partir de ces compensations semblent également corrects. La figure V-25 représente les profils de grille obtenus à partir des compensations extrêmes (c'est-à-dire de +2 et -2 nm) réalisées lors de la gravure polysilicium, ainsi que celui obtenu dans les conditions standards.

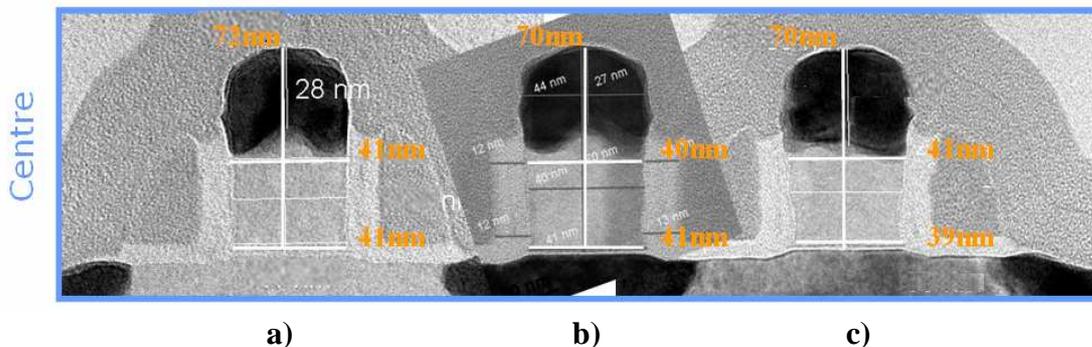


Figure V-25: Image SEM des profils de gravure obtenus à partir des compensations a) -2nm, c) +2nm et dans b) les conditions standards de la gravure polysilicium.

Des tests électriques ont également été entrepris sur ce lot. Les résultats (cf. figure V-26) montrent que les différentes parties présentent des CD électriques corrects. De plus la compensation n'a pas induit de perte de rendement.

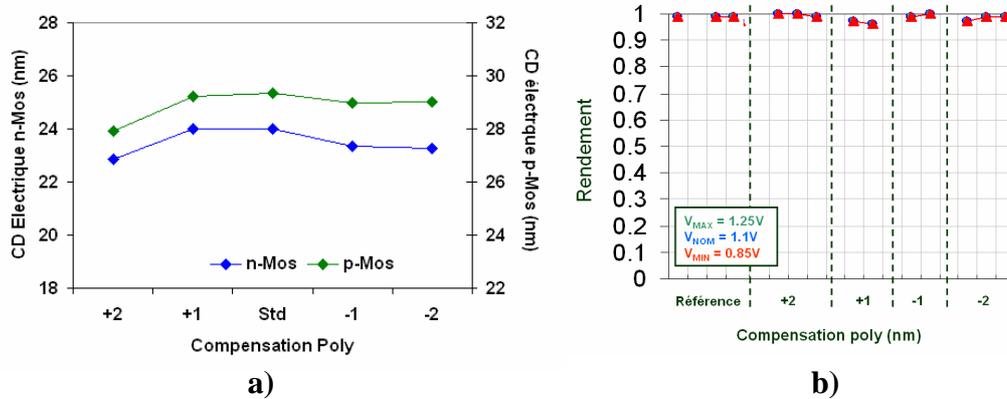


Figure 26: Résultats des a) CD électriques et des b) tests rendements sur les différentes parties du lot.

Sur le paramètre I_{on} (cf. figure V-27), on voit que la compensation n'a pas eu d'impact sur la dispersion I_{on} , ceci peut être expliqué par le fait que les dispersions liées aux autres étapes telles que la formation des espaceurs reste les sources prépondérantes. On note également un léger décentrage du courant I_{on} .

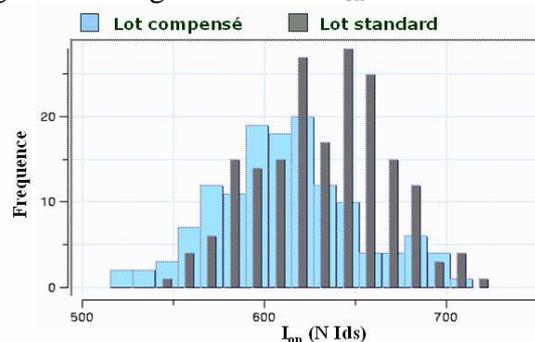


Figure V-27: Distribution du courant I_{on} mesuré sur les plaques ayant eu des compensations lors de la gravure polysilicium

En effet, il apparaît que le courant I_{on} est dépendant des différentes compensations appliquées lors de la gravure du polysilicium (cf. figure V-28). Comme nous l'avons vu dans le paragraphe III.3.2, le courant I_{on} est très sensible à la dimension du bas de grille (due au ME2), notamment au recouvrement du pied de la grille avec les extensions source drain. La comparaison avec les mesures de capacité de recouvrement, montre que pour des compensations positives (+2 et +1nm), le recouvrement grille/extension source-drain semble plus important et donc le I_{on} plus fort, et inversement dans le cas des compensations négatives (-2 et -1nm).

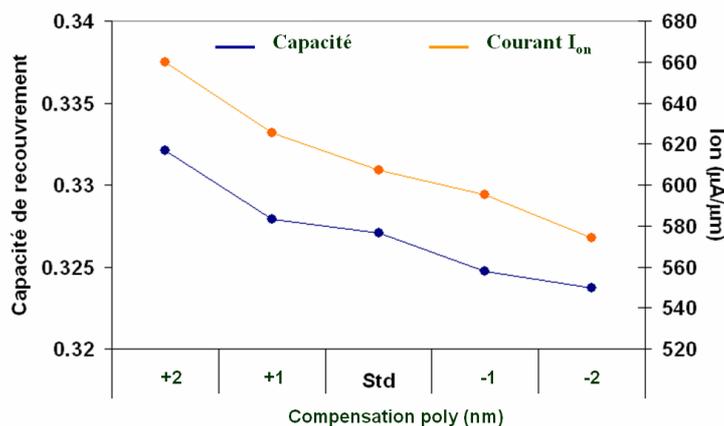


Figure V-28: Capacité de recouvrements et courant I_{on} en fonction des différentes compensations appliquées en gravure polysilicium.

Ce qui reviendrait à dire que pour les compensations positives un léger pied au bas de la grille serait présent et dans le cas des compensations négatives, le bas des grilles serait légèrement rogné. Cet effet ne peut pas être attribué au temps de gravure ME2 car dans le cas des compensations positives, le temps de gravure du ME2 est plus long, ce qui ne va pas dans le sens des études menées sur le ME2 (cf. le paragraphe III.3.2), qui montraient une diminution du I_{on} avec l'augmentation du temps de gravure ME2.

Lors de ces compensations, nous jouons plus ou moins sur les flancs de passivation lors de la gravure ME1 en modifiant principalement le débit de CH_2F_2 et de N_2 . Or nous avons vu que l'augmentation de la passivation se traduisait par une augmentation des espèces CF mais aussi CN (cf. figure III-30 et figure III-33). On peut donc penser que le fait de changer la passivation des flancs de grille va également modifier le taux d'azote présent lors du ME2 (azote présent au fond des motifs et sur les parois SiOCl du réacteur cf. paragraphe IV.4.3) et donc engendrer des modifications sur le bas des grilles.

Parallèlement à ces études, nous avons donc effectué des simulations de test de fuite de N_2 . Pour cela nous avons ajouté 5 et 10 sccm de gaz N_2 dans toutes les étapes de gravure polysilicium. Les résultats ont montré que le N_2 avait une forte influence lors de la gravure du ME2. En effet les profils obtenus sur les grilles ayant eu 5 et 10 sccm de N_2 en plus, présentaient un fort pied au bas des grilles (cf. figure V-29).

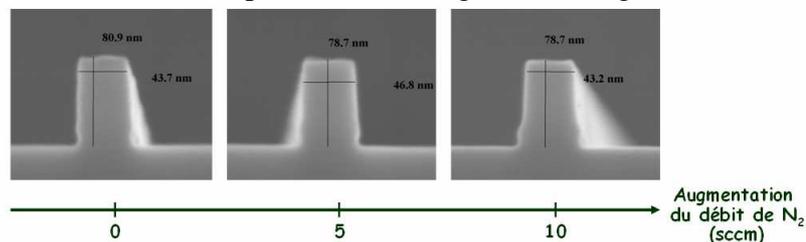


Figure 29: Evolution des profils de grille avec l'augmentation du débit de N_2 lors des étapes de la gravure polysilicium.

Les CN présents après la gravure du ME1 peuvent donc être la cause de la modification au bas de la grille et donc de la dérive du paramètre I_{on} observé, toutefois cette hypothèse doit être vérifiée.

Résumé

La grande nouveauté de cette boucle est que contrairement aux boucles implantées jusqu'alors, elle fait varier plusieurs paramètres en même temps. Ainsi le développement de l'automatisation est donc également un grand challenge pour pouvoir effectuer ces compensations de manière automatique. Bien que la méthode présente encore certains problèmes notamment de décentrage du courant I_{on} , elle semble très prometteuse pour réduire la variabilité lot à lot. Des améliorations sur l'évaluation du profil et sur la détection de fin d'attaque ont conduit à de nouveaux tests et devraient être rapidement disponibles. Ces études mettent en exergue la difficulté de contrôler les dimensions des grilles sans en impacter les profils.

V.6 Evolution des contributeurs de variabilité durant cette étude

Des analyses de variance ont été entreprises tout au long de ces trois années de thèse afin de voir l'évolution de la variabilité totale des dimensions CD_{grille} , ainsi que la proportion des différents contributeurs au fil des actions correctives entreprises. Ces analyses prennent en compte bien sûr l'effet lot à lot, plaque à plaque, intraplaque mais aussi l'effet intrapuce, qui est purement relié à la lithographie.

La figure V-30 présente cette évolution, le temps est exprimé en quart d'année Q.

D'une façon générale la mise en place de la mesure scattérométrie, outil de caractérisation plus fiable, a permis de diviser par deux la variabilité totale entre Q1 et Q4 2007 de 6nm à 3.7nm. Cette diminution correspond en réalité à une diminution de la variabilité de mesure (cf. figure III.4).

La mise en place des boucles de régulation a permis de minimiser la variabilité provenant de l'effet lot à lot. On a mesuré une diminution du 3σ lot à lot de 2.2nm à 1.1nm.

L'effet plaque à plaque a, lui, aussi diminué grâce à un bon contrôle des paramètres du procédé de lithographie et de gravure. On note une diminution du 3σ Plaque à plaque de 1.5 à 0.9nm.

Les actions correctives entreprises sur l'effet intraplaque décrits dans le paragraphe précédent, nous ont permises de diminuer le 3σ intraplaque de 2nm à 1.1nm. Enfin nous avons évalué l'effet intrapuce 3σ Intrapuce à 1.4nm.

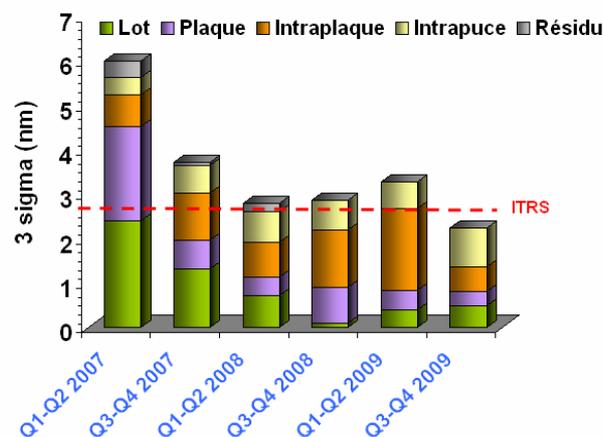


Figure V-30: Evolution de la variabilité CD_{Grille} 3σ de Q1 2007 à Q4 2009 et contribution des effets lot à lot, plaque à plaque, intraplaque et intrapuce.

Grâce aux efforts communs faits en lithographie et en gravure et grâce à la contribution du présent travail de cette thèse, la variabilité totale 3σ a donc été diminuée de 6nm à 2.3nm, ce qui est en deçà de la valeur préconisée par l'ITRS pour le bon fonctionnement du transistor pour le nœud technologique 45nm.

D'autres actions correctives doivent être mises en place dans les mois à venir notamment l'introduction en lithographie de la compensation « dose mapper », qui par l'ajustement de dose à l'intérieur de chaque puce sur une plaque va pouvoir compenser des signatures de variabilité CD intrapuce et intraplaque. La nouvelle méthodologie de boucle de régulation que nous avons développée lors de cette thèse doit également être implantée très prochainement.

Le développement de toutes ces actions correctives et la mise en œuvre de nouvelle stratégie de régulation sur la variabilité (compensation multivariée⁸²) sont nécessaires pour la production du 45nm mais elles seront également essentielles pour les futurs nœuds technologiques dont le contrôle dimensionnel sera plus agressif.

Conclusion générale

Le présent travail porte sur le développement et l'optimisation d'un procédé de gravure grille polysilicium pour le nœud technologique 45nm. Nous avons constaté que les procédés de fabrication d'un transistor sont sujets à des sources de variabilité diverses pouvant causer des disfonctionnements sur les circuits intégrés. La variabilité de la longueur de la grille L est l'une des sources majeures de variabilités. L'étude approfondie du procédé de gravure grille par plasma nous a permis de comprendre certains mécanismes fondamentaux et d'élaborer des solutions pour améliorer la reproductibilité des procédés plasma et donc les variabilités dimensionnelles de la grille.

Intéressons nous tout d'abord à l'étude du procédé de gravure en lui-même. Dans une première partie nous avons vu que la réduction en dimension des dispositifs microélectroniques a contraint les ingénieurs à définir de nouvelles stratégies et à utiliser des empilements de couches minces complexes. STMicroelectronics a fait le choix, dès la technologie 45nm, de définir les cellules mémoires SRAM, par une double exposition/gravure (« double patterning »). Les deux gravures constituant cette double définition, appelées gravure masque dur et gravure polysilicium sont au centre des études menées lors de cette thèse.

La caractérisation du procédé de gravure du masque dur a montré que l'étape de traitement de résine, par plasma HBr, est complexe et essentielle pour le procédé de gravure grille. Elle permet, en effet, de réduire la rugosité des lignes de 30% pour une grille de 45nm. De plus, s'il existe une différence de degré de compaction de la résine, lors des procédés de recuit en lithographie, on peut également penser que le traitement par plasma HBr sert à uniformiser le comportement des résines 193nm aux étapes de gravure suivantes. Notamment lors de l'étape de réduction de côte résine qui vient ajuster les dimensions des motifs. Ces dimensions de motifs sont par la suite transférées lors de la gravure du Darc, carbone amorphe et TEOS. Lors de ces études nous avons ciblé plusieurs paramètres pouvant impacter les dimensions des motifs du masque dur. Le changement de débit de CH_2F_2 permet de modifier, lors de la gravure

Darc, les couches CH_xF_y déposées sur la résine donc de conduire à une diminution ou une augmentation de la dimension des motifs du masque dur. Bien que la gravure du carbone amorphe ne joue aucun rôle dans la définition des dimensions de motifs, il a été montré que l'augmentation du temps de surgravure peut amener dans le cas du carbone amorphe à obtenir des dimensions de grille plus petites.

Ainsi le débit de CH_2F_2 lors de la gravure du Darc ou TEOS et le temps de surgravure du carbone amorphe peuvent ainsi constituer des « boutons » alternatifs en 45nm à la réduction de cote résine pour ajuster les dimensions CD des grilles.

Lors de la seconde étape de gravure, la dimension ainsi que le profil de gravure de la grille polysilicium résultent de l'érosion latérale du masque dur, de la vitesse de gravure verticale du polysilicium et du compromis entre la vitesse de gravure latérale du polysilicium par le fluor atomique et la vitesse de dépôt d'une couche fluorocarbonée protectrice.

L'étude du procédé a permis de montrer que la nature du masque dur contribuait fortement à la perte en dimension lors de la gravure polysilicium.

De plus nous avons pu mettre en évidence que les couches fluorocarbonées déposées lors de la gravure ME1 étaient fines (environ 1nm) et uniformes, ce qui laisse penser que ces couches se forment grâce à la pulvérisation d'espèces passivantes au fond des motifs. Des analyses XPS sur les flancs de grille, ont pu établir qu'elles étaient composées principalement de CC, CF, CN, SiS. Leurs compositions jouent un rôle important sur la vitesse de gravure latérale du polysilicium et sur la forme des profils. En effet ces couches permettent de ralentir l'attaque latérale des grilles par les neutres du plasma. Les conditions du plasma (débit de gaz CH_2F_2 , N_2 , puissance source), la nature du masque dur ainsi que le type de conditionnement des parois de la chambre vont moduler cette couche fluorocarbonée.

Lors de la gravure ME2 et OE, nous avons montré l'importance de contrôler les dimensions au pied de la grille. En effet l'augmentation du temps de gravure ME2 a conduit à des profils de grille rognés qui sont à l'origine de dérive du courant de saturation I_{on} .

L'évaluation de l'impact de la température sur tout le procédé de gravure de la grille nous a montré qu'il pouvait être un bon moyen pour améliorer l'uniformité des CD sur la plaque.

Dans un deuxième temps, des études liées à la reproductibilité des procédés plasma nous ont permis de statuer sur des mécanismes d'interactions entre le plasma et les parois du réacteur. Nous avons principalement étudié deux stratégies pour pallier à ce manque de reproductibilité des procédés plasma. La stratégie N°1 consistant à nettoyer les parois du réacteur avant chaque plaque gravée. Et la stratégie N°2 consistant à nettoyer les parois puis à déposer un film (SiOCl ou carboné).

D'une façon générale, la densité de grille polysilicium à graver par le fluor atomique est plus élevée au centre de la plaque qu'en bord. Cet effet conduit à des dimensions plus faibles en bord de plaque et donc des dispersions intraplaque importantes. Le fait d'utiliser une stratégie de conditionnement avec un dépôt sur les parois du réacteur tend à minimiser cet effet car le fluor atomique grave également le dépôt fait sur les parois. Dans le cas d'une stratégie de conditionnement en parois propres, la formation rapide d'une couche d' AlF_x protège les parois de toute attaque par le fluor et l'effet de surgravure des grilles en bord de plaque est observable. Le profil des grilles est lui aussi modifié par le conditionnement utilisé. Dans le cas d'un conditionnement avec un dépôt carboné, le retour dans la phase gazeuse d'espèces passivantes de type CF_x

dues à la réaction chimique entre radicaux et parois du réacteur, induit des profils de grille pentue.

Ainsi, l'analyse des différents contributeurs de variabilité du CD des grilles, conjuguée à la compréhension approfondie des mécanismes de gravure par plasma que nous venons de citer, ont permis de mettre en place des solutions pour un contrôle optimum de la dispersion CD totale.

L'analyse de l'impact des différents conditionnements en terme de variabilité intraplaque et plaque à plaque, l'optimisation des températures des procédés de gravure en centre et bord de plaque pour l'amélioration de la variabilité intraplaque, la mise en place de boucles de régulation pour l'amélioration des variabilités lot à lot sont autant de solutions qui ont permis d'abaisser la dispersion CD 3σ de 6 à 2.3nm pour un CD nominal de 46nm.

De plus cette thèse a permis de proposer une boucle de régulation innovante afin de minimiser l'effet lot à lot et plaque à plaque. Utilisant une approche multivariée, cette boucle va pouvoir ajuster la dimension de grille lors de la gravure polysilicium en jouant sur le compromis vitesse de gravure latérale du polysilicium et vitesse de dépôt d'espèces passivantes sur les flancs de grille.

A travers ce travail de thèse, nous avons vu toute la difficulté d'assurer et d'améliorer le contrôle dimensionnel pour des motifs de 45nm. La mise en place d'autres techniques de caractérisation en ligne, tel que la scattérométrie intégrée ou la microscopie électronique par transmission, ainsi que l'élaboration de boucles de régulation faisant intervenir plusieurs paramètres seront la clef pour le contrôle dimensionnel des nœuds technologiques en deça du 45nm.

Références

- ¹ **F. Gaffiot**, « De la microélectronique au nanomonde : 35 ans de recherche en électronique », École Centrale de Lyon, <http://histoire.ec-lyon.fr/index.php?id=641>
- ² « Le microprocesseur », Wikipedia l'encyclopédie libre, <http://fr.wikipedia.org/wiki/Microprocesseur>
- ³ **F. Fagin, T. Klein, and L. Vadasz**, « Insulated gate field effect transistor integarted circuits with silicon gates », IEEE Transactions on Electron Devices 16, 236 (1969)
- ⁴ « ITRS International Technology Roadmap for Semiconductor. Update 2008 » <http://www.itrs.net/Links/2008ITRS/Home2008.htm>
- ⁵ **T. Skotnicki, G. Merckel et T. Pedron**, The Voltage Doping Transformation, A new approach to the modelling of MOSFET Short Channel Effects, Electron Device Letters, vol. 9, n°3, 1988.
- ⁶ **T. Skotnicki**, Le transistor MOS, Technologie de fabrication, Encyclopédie des Techniques de l'ingénieur, 1999.
- ⁷ **Pascal Gouraud** "Plasma Etching course", 2007.
- ⁸ **Lewi Tonks and Irving Langmuir**, « A general theory of the plasma of an Arc », Physical review 34, 876
- ⁹ **J. W. Coburn and Harold Winters**, "Plasma etching-a discussion of mechanisms", Journal of vacuum Science and Technology 16, 391 (1979)
- ¹⁰ **J. W. Coburn and Harold Winters**, «Ion and electron-assisted Gas surface chemistry-An important effect in plasma etching», Journal of Applied Physics 50, 3189 (1979)
- ¹¹ **Peter Sigmund** "Mechanisms and theory of physical sputtering by particle impact" Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Volume 27, Issue 1, 2 June 1987, p.1-20
- ¹² **B. Chapman**, "Glow Discharge Processes: Sputtering and Plasma Etching" Wiley intersciences, p 317
- ¹³ **K.V. Guinn, C.C. Cheng, and V.M. Donnelly** "Quantitative chemical topography of polycrystalline Si anisotropically etched in Cl₂/O₂ high density plasmas" J. Vac. Sci. Technol. B (13) 214-226 (1995)
- ¹⁴ **F.H. Bell and O. Joubert** "Polysilicon gate etching in high density plasmas. V. Comparison between quantitative chemical analysis of photoresist and oxide masked

polysilicon gates etched in HBr/Cl₂/O₂ plasmas” J. Vac. Sci. Technol. B (15) 88-97 (1997)

¹⁵ **X. Detter, R. Palla, and I. Thomas-Boutherin, E. Pargon, G. Cunge, O. Joubert, and L. Vallier** “Impact of chemistry on profile control of resist masked silicon gates etched in high density halogen-based plasmas” J. Vac. Sci. Technol. B (21) 2174-2183 (2003)

¹⁶ **L. Vallier, J. Foucher, X. Detter, E. Pargon, O. Joubert, G. Cunge, and T. Lill** “Chemical topography analyses of silicon gates etched in HBr/Cl₂/O₂ and HBr/Cl₂/O₂/CF₄ high density plasmas” J. Vac. Sci. Technol. B (21) 904-911 (2003)

¹⁷ **B. Chapman** ,”Glow Discharge Processes: Sputtering and Plasma Etching”
Authors: Chapman, B.; Vossen, JL. Publication: Physics Today, vol. 34, issue 7, **62** (1961)

¹⁸ **E.S.G. Shaqfeh and C.W. Jurgensen**, “Simulation of reactive ion etching transfer” Journal of Applied Physics **66** ,4664-4675 (1989)

¹⁹ **C. Hedlund, H-O. Blom, and S. Berg**, “Microloading effect in reactive ion etching” Journal of Vacuum Sciences. Technology A **12**, 1962- 1965 (1994)

²⁰ **H. W. Kim, J.Y. Lee, J. Shin et al** “Experimental Investigation of the Impact of LWR on Sub-100-nm Device Performance”, IEEE Transactions On Electron Devices, Vol. 51, No. 12, December 2004.

²¹ **M. Martin, G. Gunge** “About the surface roughness generated by plasma Etching”, AVS 54th, proceeding p. 160 (PS-FrM3), Seattle, 2007.

²² **E. Pargon, M. Martin** “Impact of UV Plasma light on Photoresist Pattern Linewidth Roughness during Gate Etch process”, AVS 55th, proceeding p.122 (PS1-WeA10), Boston, 2008.

²³ « L'industrie de la microélectronique : reprendre l'offensive »<http://89.202.136.71/rap/r07-417/r07-4176.html>

²⁴ **Françoise Grosvalet**, Electronique International, 23/9/2009

²⁵ **H. Iwai**, IWJT, p.1, 2008

²⁶ **Chian Sin, Bing Chen, W. L. Loh et al.**, “Resist trimming in high-density CF₄/O₂ plasma for sub-0.1 μm device fabrication”, Journal of vacuum Science 1 Technology B; Microelectronics and Nanometer Structures **20**, 1974 (2002)

²⁷ **O. Joubert, E. Pargon, J. Foucher et al.**, « Nanometer scale linewidth control during etching of polysilicon gates in high-density plasmas », Proceedings of

symposium and Summer school on : Nano and Giga Challenges in Microelectronics
Research and opportunities in Russia **69**, 350 (2003)

²⁸ “First immersion lithography system-III-Vs Review”, Volume 17, Issue 1, February 2004, p. 29

²⁹ **K. J. Kuhn** “Reducing Variation in Advanced Logic Technologies: Approaches to Process and Design for Manufacturability of Nanoscale CMOS “ IEDM Tech. Dig. p.471 (2007)

³⁰ **T. Houston, R. Soper, T. Aton** “Double pattern and etch of poly with hard mask” US Patent App. 10/227,615, 2002

³¹ **R. A. Gottscho, K. Nojiri, J. Lacara**, “Challenge in etch: what’s new?”, Thin solid film 516 (2008), 3493-3496.

³² **E. Sungauer** « Étude et développement de procédés de gravure plasma de HfO₂ pour l’élaboration de transistors CMOS sub-45 nm », Thèse de doctorat de l’Université Joseph Fourier, Grenoble (2008)

³³ **T. Morel** « Développement de procédés de gravure grille métallique W, WN pour les nœuds technologique sub-45nm», Thèse de doctorat de l’Université Joseph Fourier, Grenoble (2009)

³⁴ **C. Forzan, D. Pandini**, “statistical static timing analysis: a survey”, Integration, the VLSI journal 42 (2009), 409-435.

³⁵ **D. Sylvester, K. Agarwal, S. Shah**, “Variability in nanometer CMOS: Impact, analysis, and minimization”, Integration, the VLSI journal 41 (2008), 319-339

³⁶ **A. M. Pointu et J. Perrin**, « Plasmas froids de décharge - Applications et diagnostic », Techniques de l’ingénieur, Référence D2835, (1997)

³⁷ **J. Hopwood**, « Review of inductively coupled plasma for plasma processing », Plasma Source Sciences and Technology, 1, 109 (1992)

³⁸ **R. B. Piejak, V. A. Godyak, et B. M. Alexandrovich**, « A simple analysis of inductive FR discharge », Plasma Source Sciences and Technology, 1, 179 (1992)

³⁹ **R. Patrick, S. Baldwin, N. Williams Lam Research Corp** “Etching: Closed-loop bias voltage control for plasma etching”, Solid State Technology, 43 (2000)

⁴⁰ **O. Renault**, Cours « Introduction à la Spectroscopie de photoélectrons par rayons X : Principe et application à la Nanoélectronique»

⁴¹ **E. Sokolowski, C. Nording, K. Siegbahn**, « Chemical shift Effect in inner Electronic Levels of Cu Due to Oxidation », Physical Review, 110, 776 (1958).

-
- ⁴² **A. Duval, A. Bouquillon** « La microscopie électronique à balayage », Laboratoire de recherche des musées de France,
<http://www.culture.gouv.fr/culture/conservation/fr/methodes/meb.htm>
- ⁴³ **S. Marquet**, « Maîtrise de la variabilité des procédés de fabrications par le développement de modèles de régulation », Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier de Grenoble, p84, chap II-1-b (2008).
- ⁴⁴ **F. Bernoux, J-P. Piel, B. Castillon, C. Defranoux, J-H. Lecat, P. Boher et J-L. Stehlé** "Ellipsométrie : théorie", Techniques de l'Ingénieur, Traité Mesures et Contrôle, R 6 490
- ⁴⁵ **F. Bernoux, J-P. Piel, B. Castillon, C. Defranoux, J-H. Lecat, P. Boher et J-L. Stehlé**, "Ellipsométrie : instrumentation et applications", Techniques de l'Ingénieur, Traité Mesures et Contrôle, R 6 491
- ⁴⁶ **S. Tuffery**, « Data Mining et statistique décisionnelle », Editions Technip, ISBN 2-7108-0867-6, 2005
- ⁴⁷ **P. Pages**, cours « Plans d'expériences », 2007.
- ⁴⁸ **J. Goupy** « Modélisation par les plan d'expériences », Techniques de l'ingénieur, traités mesures et contrôle, R 275
- ⁴⁹ **G. et M.C. Sado** « Les plans d'expériences De l'expérimentation à l'assurance qualité », AFNOR
- ⁵⁰ **J. Goupy**, « Introduction aux plans d'expériences », Dunod
- ⁵¹ **J.D. Chapon, and al.** "Comparison between Organic Spin-On BARC and Carbon-Containing CVD Stack for 65nm Gate Patterning", Proceeding SPIE 2006.
- ⁵² **A. Bazin, E. Pargon, X. Mellhaoui**, "Impact of HBr and Ar cure plasma treatments on 193nm photoresists", Proc. SPIE, Vol. 6923, 692337 (2008)
- ⁵³ **M.C. Kim, D. Shamiryan, Y. Jung, W. Boullart**, "Effects of various plasma pretreatments on 193 nm photoresist and linewidth roughness after etching", J. Vac. Sci. Technol. B Volume 24, Issue 6, pp. 2645-2652 (November 2006).
- ⁵⁴ **E. Pargon, O. Joubert** "Characterization of resist-trimming processes by quasi in situ x-ray photoelectron spectroscopy", J. Vac. Sci. Technol. B Volume 22, Issue 4, pp. 1869-1879 (July 2004)
- ⁵⁵ **T. F. Yen, C. M. Chiu, K. F. Chiu**, "Photoresist trimming for sub 0.1µm generation integrated circuit devices by Cl₂/O₂ transform coupled plasma, Microelectronic engineering 75 (2004) 201-209.
- ⁵⁶ **H. Singh, S. J. Ullal, S. Gangadharan**, "In-situ pre-coating of plasma etch chamber for improved productivity and chamber condition control", US Patent No.7,204,913 (April 17, 2007)

-
- ⁵⁷ **J. BAO**, “An Optical Metrology System for Lithography Process Monitoring and Control”, Ph. D, dissertation, EECS Department, University of California, Berkley, 2003.
- ⁵⁸ **S. Marquet**, « Maîtrise de la variabilité des procédés de fabrications par le développement de modèles de régulation », Thèse de doctorat de l’Université Joseph Fourier, Grenoble (2008), ChapIII-2
- ⁵⁹ **A.Pelissier**, « Développement de méthodes pour garantir la qualité des mesures », rapport de stage ST/INPG, Septembre 2004.
- ⁶⁰ **H. Biederman, Y. Osada**, “Influence of the substrate Temperature and bombardement from the Discharge”, Plasma Polymerization processes livre, Chap 4, paragraphe 3.1.3, 89
- ⁶¹ **S. Kanno, G. Miya, J. Tanaka et al**, « Controlling gate CD-uniformity by means of CD prediction model and wafer-temperature distribution control », Thin Solid Films 515 (2007) 4941-4944
- ⁶² **A. Bazin** « Analyse de procédés de traitement plasma des résines photosensibles à 193 nm pour le développement de technologies CMOS sub-65 nm » Thèse de doctorat de l’Université Joseph Fourier de Grenoble, (2009)
- ⁶³ **C.K. Park, H.T. Kim, C.H. Lee, N.E. Lee, H. Mok** “ Effects of CH₂F₂ and H₂ flow rates on process window for infinite etch selectivity of silicon nitride to ArF PR in dual-frequency CH₂F₂/H₂/Ar capacitively coupled plasmas”, Microelectronic Engineering 85 (2008) 375–387.
- ⁶⁴ **B. Chapman** « Glow discharge Process, sputtering and plasma etching », chapitre 7, Ed. John Wiley & Sons.
- ⁶⁵ **E. Kay, J. Coburn and A. Dilks** “Plasma Chemistry of Fluorocarbons as related to Plasma Etching and plasma Polymerization”, Topics in Current Chemistry, 1980, Springer.
- ⁶⁶ **E. Kay**, “Method and materials in microelectronics Technology”, Plenum Publishing corporation, in J. Bargon ed (1984), p.243.
- ⁶⁷ **A. Dilks and E. Kay**, “Macromolécules” 14 (1981) 855
- ⁶⁸ **J. W. Coburn, H. F. Winters and T. J. Chuang**, Journal of Applied Physics 48 (1977) 3532
- ⁶⁹ **O. Luere and al.** « Etch mechanisms of Silicon gate structures patterned in SF₆/CH₂F₂/Ar inductively Coupled plasma », JVST.
- ⁷⁰ **G. S. Oehrlein, Y Zhang, D. Vender, and O, Joubert**, “Fluorocarbon high density plasmas. II. Silicon dioxide and silicon etching using CF₄ and CHF₃”, J. Vac. Sci. Technol. A. 12(2), Mar/Apr 1994.

-
- ⁷¹ **Liudi Jiang , N.O.V. Plank, R. Cheung, R. Brown, A. Mount**, “Surface characterization of inductively coupled plasma etched SiC in SF₆ /O₂”, *Microelectronic Engineering* 67–68 (2003) 369–375
- ⁷² **Chao Ye, Yijun Xu, Xiaojiang Huang, Zhaoyuan Ning**, “Effect of high-frequency on etching of SiCOH films in CHF₃ dual-frequency capacitively coupled plasmas”, *Thin Solid Film*, 2009.
- ⁷³ **O. Luere**, « Analyse des différentes stratégies de procédé de gravure grille metal-high K pour les noeuds technologiques 45 et 32nm », Thèse de doctorat de l’Université Joseph Fourier de Grenoble, p65 (2009).
- ⁷⁴ **M. Rusop, T. Soga, T. Jimbo**, « X-Ray photoelectron spectroscopy studies on the bonding properties of oxygenated amorphous carbon nitride thin films synthesized by pulsed laser deposition at different substrate temperatures », *Journal of Non-Crystalline Solids* 351 (2005), 3738-3746.
- ⁷⁵ **R. Ramos** “Interactions entre les plasmas de gravure à couplage inductif et les parois du réacteur” Thèse de doctorat de l’Université Joseph Fourier, Grenoble (2008)
- ⁷⁶ **M.A. Sobolewski**, *J. Apply. Phy*, 97, 033301 (2005)
- ⁷⁷ **H. Singh, S. J. Ullal, S.Gangadharan**, “In-situ pre-coating of plasma etch chamber for improved productivity and chamber condition control”, US Patent No.7,204,913 (April 17, 2007)
- ⁷⁸ **S. Deshmukh and T. Lill**, *US Patent No 7,112,125* (October 17, 2006)
- ⁷⁹ **B. Parkinson, D. Prager, M. Funk, R. Sundararajan and al** « Increased Uniformity Control in 45nm Polysilicon Gate Etch Process », Proceeding SPIE, Vol. 7272, 72721J (2009)
- ⁸⁰ **S. Marquet** « Maîtrise de la variabilité des procédés de fabrications par le développement de modèles de régulation », Thèse de doctorat de l’Université Joseph Fourier de Grenoble, p16 chap I-2 (2008).
- ⁸¹ **J. De Caunes** “Design and Use of Multivariate Approach Error Analysis APC System”, 2006.
- ⁸² **H. Lee, A Ranjan, D. Prager, K. A Bandy and al.** “Advanced profile Control and the impact of Sidewall Angle at Gate Etch for Critical Nodes”, Proceeding SPIE, Vol. 6922, 69220T (2008)