



HAL
open science

Développement des techniques de scatterométrie en temps réel pour le suivi des procédés de gravure plasma

Mohamed El Kodadi

► **To cite this version:**

Mohamed El Kodadi. Développement des techniques de scatterométrie en temps réel pour le suivi des procédés de gravure plasma. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université de Grenoble, 2010. Français. NNT: . tel-00670095

HAL Id: tel-00670095

<https://theses.hal.science/tel-00670095>

Submitted on 14 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

Je souhaiterais avant de démarrer ce manuscrit remercier l'ensemble des personnes qui m'ont aidé et soutenu au cours de ces trois années de thèse.

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur Patrick Schiavone, mon directeur de thèse pour m'avoir suivi et soutenu tout au long de ces trois ans de thèse. Ses remarques pertinentes m'ont permis d'exploiter au mieux les problèmes rencontrés, grâce à l'originalité de ses idées. Son esprit pédagogique m'a remarquablement aidé pour la structuration du manuscrit ainsi que pour la préparation de la soutenance.

Je tiens également à remercier Monsieur Maxime Besacier, mon co-directeur de thèse. Sa rigueur a fait que les travaux présentés au cours de cette thèse ont été menés avec exactitude. Ses qualités tant scientifiques qu'humaines ont montré son excellence à mener un travail d'encadrement.

J'adresse également mes sincères remerciements à l'ensemble des personnes présentes dans le jury pour avoir accepté de juger ce travail :

-Monsieur Antonello Demartino Directeur de recherche CNRS au laboratoire LPICM de Paris, d'avoir présidé ce jury et également d'avoir accepté de rapporter sur mes travaux dans les délais imposés par l'école doctorale ainsi que ses remarques fructueuses dans le domaine.

-Monsieur Christophe Cardinaud Directeur de recherche CNRS au laboratoire IMN de Nantes, pour avoir accepté de rapporter sur mes travaux.

-Monsieur Christophe Dezauzier Manager de l'équipe caractérisation de STMicroelectronics pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail.

Je souhaiterais également remercier toutes les personnes du LTM, laboratoire où j'ai effectué ma thèse. Ce laboratoire est à mon sens unique au CNRS. Il y règne une ambiance de travail formidable et un esprit d'équipe remarquable. C'est que du bonheur! Alors merci à tous !

Un grand merci également à toutes les personnes du LETI CEA Grenoble, avec qui j'avais la chance de collaborer.

Et finalement, un grand merci à ma femme, mes parents et ma famille qui ont toujours été là pour me soutenir et m'encourager.

Table des matières

Remerciements	5
Table des matières	7
Introduction	9
I : Caractérisation scatterométrique	11
I.1 Les outils de métrologie optique utilisés en scatterométrie	13
I.1.1 Ellipsométrie spectroscopique.....	13
I.1.1.1. Principe de l'ellipsométrie	13
I.1.1.2. Ellipsométrie à annulation	15
I.1.1.3. Ellipsométrie à modulation par élément tournant	15
I.1.1.4. Ellipsométrie à modulation de phase.....	16
I.1.2 La réflectométrie spectroscopique.....	19
I.1.3 Autres instruments de mesure	19
I.2 Technique de résolution du problème direct	20
I.3 Technique de résolution du problème inverse	21
I.3.1 Méthode des moindres carrée.....	21
I.3.2 L'unicité de la solution	23
I.3.3 Méthode Levenberg-Marquardt.....	24
I.3.4 Méthode du simplex.....	24
I.3.5 Réseaux de neurones.....	24
I.3.6 Méthode des bibliothèques.....	25
I.4 Résolution du problème inverse en temps réel	26
I.4.1 Algorithme des k plus proches voisins	26
I.4.2 Régularisation de Tikhonov	27
I.4.3 Utilisation des processeurs graphiques GPUs.....	29
I.5 Conclusion	30
II : Incertitudes de mesure	31
II.1 Bruit de l'équipement	33
II.2 La sensibilité	34
II.3 Corrélation entre les paramètres	37
II.4 Méthode d'évaluation des incertitudes de mesure	38
II.4.1 Méthode de Monte Carlo	39
II.4.2 Méthode de propagation des variances.....	40
II.4.3 Incertitude élargie.....	41
II.5 Sources d'incertitude : étude de cas	41
II.5.1 Incertitudes de type A.....	41
II.5.2 Incertitude de type B : Influence de la période	42
II.5.3 Incertitude de type B : Indice optique des matériaux	42
II.5.4 Incertitudes de type B : Incertitude de l'instrument	44
II.5.4.1. Angle d'incidence	44

II.5.4.2. Longueur d'onde	45
II.5.5 Incertitude de type B : Simulation électromagnétique	45
II.6 Bilan	47
II.7 Conclusion	48
III : Contrôle en temps réel de la gravure plasma	49
III.1 Les étapes de fabrication en industrie microélectronique	51
III.1.1 La lithographie	51
III.1.1.1. Lithographie optique	51
III.1.1.2. La lithographie par faisceau d'électron	52
III.1.1.3. La lithographie par nano-impression	53
III.1.2 Gravure par plasma en microélectronique	53
III.1.3 Procédés de réduction de cote résine	54
III.2 Dispositif expérimental	55
III.2.1 La plate-forme de gravure 5200 d'Applied Materials	55
III.2.2 La chambre de gravure DPS	56
III.2.3 La microscopie à force atomique tridimensionnelle (CD AFM)	58
III.2.4 Ellipsomètre UVISEL MWL-16	60
III.3 Application de la scatterométrie en temps réel pour le suivi de procédé de réduction de cote résine.	61
III.3.1 Profils de ligne étudiés	61
III.3.2 Conditions expérimentales	62
III.3.3 Impact des plasmas sur les propriétés optiques des matériaux étudiés	62
III.3.3.1. La résine 248nm	63
III.3.3.2. La résine 193 nm	65
III.3.4 Protocole de validation par CD AFM	66
III.3.5 Résultats scatterométriques	67
III.3.5.1. Etude de la résine 248nm	67
III.3.5.2. Etude des résines 193nm	73
III.4 Conclusion	77
IV Scatterométrie porosimétrique	79
IV.1 Dispositif expérimental	81
IV.2 Scatterométrie porosimétrique	82
IV.3 Applications	85
IV.3.1 Structure étudiée	85
IV.3.2 Etude de la porosité du SiOCH	85
IV.3.3 Etude de la modification des flancs du SiOCH	88
IV.3.4 Impact du choix du modèle	91
IV.4 Conclusion	92
Conclusion	95
Bibliographie	97
Annexe	109
Mesure de l'indice optique des matériaux	109

Introduction

Au cours de ces cinquante dernières années, l'industrie de la microélectronique a connu un développement véritablement spectaculaire. Omniprésent dans notre vie de tous les jours (communication, médecine, transport, etc.), elle ne cesse d'améliorer notre quotidien. Son succès vient en grande partie des nombreux investissements en recherche et développement, dont l'objectif est la réduction de la taille de l'unité de base du circuit intégré, le transistor. Les dimensions du transistor sont réduites un peu plus à chaque nœud technologique selon l'incontournable loi de Moore. Cette course vers la miniaturisation entraîne le monde de la micro et nanoélectronique vers de nouveaux défis technologiques. Des défis liés en grande partie aux méthodes de fabrication.

Les méthodes de caractérisation doivent également accompagner ces avancées pour assurer un contrôle fiable des futurs nœuds technologiques, si possible à moindre coût, tout en étant rapides et non destructives.

Actuellement, parmi les outils de caractérisations dimensionnelles les plus utilisés dans l'industrie de la microélectronique, on trouve les méthodes dites microscopiques. Parmi ces méthodes, on note le microscope électronique à balayage (CDSEM pour Critical Dimension Scanning Electron Microscope) et le microscope à force atomique (CD AFM pour Critical Dimension Atomic Force Microscope). Les deux permettent une mesure de la dimension critique (ou CD, Critical Dimension) avec une précision nanométrique. Toutefois, le CDSEM ne permet pas d'obtenir le profil de la structure mesurée et seule des mesures en coupe, destructives, permettent de réaliser ces mesures.

Le microscope à force atomique utilise une pointe évasée pour imager la surface de l'échantillon et ainsi remonter au profil de ligne et même à la rugosité de la surface. Cette technique se heurte à un problème majeur lié en grande partie à la difficulté de fabriquer des pointes de petites tailles.

Finalement, ces deux techniques sont longues non compatibles pour une application en temps réel. En raison de ces limites, le besoin de développement des nouvelles techniques s'est accru.

La méthode de mesure optique appelée scatterométrie est considérée par les acteurs du domaine comme étant une technique très prometteuse pour la caractérisation des futurs nœuds technologiques 22-16nm [6]. Cette technique appartient à la famille des méthodes dites indirectes. Elle associe une mesure du spectre de diffraction de l'objet à mesurer à la résolution d'un problème inverse. Le spectre de diffraction (ou la signature optique) peut être mesuré par différents instruments (ellipsomètre, réflectomètre, etc.), donc la technique de scatterométrie ne nécessite pas le développement de nouveaux instruments. Cette technique est non destructive et non invasive. Elle est également candidate pour être la future technique de caractérisation *in situ* et en temps réel. Le but de cette thèse est d'étudier la capacité de la scatterométrie, à suivre en temps réel, l'évolution du profil des lignes durant les étapes de fabrication en microélectronique.

Ce travail de thèse a été mené dans le cadre d'une collaboration entre un industriel de la microélectronique, la société STMicroelectronics et un laboratoire de recherche académique, le Laboratoire des Technologies de la Microélectronique LTM. Depuis 2006 l'équipe Lithographie du laboratoire cherche à développer des algorithmes de résolution du problème inverse en temps réel [78]. Ces travaux constituent la base de ce travail de thèse. En vue de poursuivre les activités de recherche dans ce domaine, cette équipe vise à développer un outil de métrologie optique capable d'être utilisé pour le contrôle *in situ* et en temps réel du procédé de fabrication. L'ambition étant de développer un outil fiable, rapide et précis capable de satisfaire les exigences des fabricants.

Les travaux menés ici s'articulent autour de quatre chapitres :

Le premier chapitre, présentent les principaux outils de métrologie optique permettant de réaliser la mesure de la signature de diffraction. Ensuite nous exposerons la méthode retenue pour le calcul théorique permettant de simuler les quantités mesurées par l'outil de métrologie optique (problème direct). Nous présenterons également les méthodes habituellement utilisées pour résoudre le problème inverse. En scatterométrie, celui-ci à pour but d'extraire les paramètres recherchés d'une structure (la géométrie et/ou les propriétés optiques) à partir d'une mesure expérimentale. Nous exposerons ensuite, la méthode proposée pour la résolution du problème inverse en temps réel.

Le chapitre II sera consacré à l'étude des incertitudes de mesure. Quelles sont les principales sources d'incertitudes ? Comment peut on les estimer ?

Le chapitre III sera dédié à la validation concrète de l'outil de scatterométrie en temps réel. Deux types de procédés de réduction de cote résine seront étudiés. La technique est elle fiable pour être utilisée pour le contrôle en temps réel ?

Le dernier chapitre sera dédié à la présentation d'une nouvelle application : la scatterométrie porosimétrique. Quels sont les champs d'application de cette technique ? Quels sont ces avantages par rapport à d'autres techniques ?

I : Caractérisation scatterométrique

La scatterométrie est une technique de métrologie optique non destructive. Cette technique appartient à la famille des techniques qualifiées indirectes. Cette méthode nécessite deux étapes : la mesure et le traitement. La première étape consiste en une mesure optique du spectre de diffraction d'un réseau périodique. La deuxième étape consiste à remonter aux paramètres du réseau à partir de la signature mesurée par résolution d'un problème inverse.

Le présent chapitre est scindé en trois parties. La première présente les principaux instruments de mesure de la réponse optique d'une structure. La seconde présente la méthode retenue pour résoudre le problème direct. Ce problème consiste à déterminer de la signature scatterométrique théorique d'un réseau périodique, à partir d'outils de simulation électromagnétique. La troisième partie résume l'ensemble des méthodes numériques d'optimisation potentiellement utilisable dans le problème inverse et permettant d'extraire l'information recherchée. Ces informations sont le plus souvent les paramètres géométriques des profils de lignes diffractantes ou les propriétés optiques d'un matériau. Nous détaillerons également les algorithmes développés pour la résolution du problème inverse en temps réel.

I.1 Les outils de métrologie optique utilisés en scatterométrie

Historiquement, les premières techniques de scatterométrie utilisent de la lumière monochromatique [21, 20]. Cette lumière diffractée est mesurée en fonction de l'angle d'incidence (2θ scatterométrie). La complexité mécanique du système et la diminution de la taille des objets à mesurer (diminution du nombre d'ordre diffractée) ont conduit à l'utilisation d'autres techniques : les deux méthodes les plus largement utilisées sont l'ellipsométrie spectroscopique et la réflectométrie

I.1.1 Ellipsométrie spectroscopique

Bien que les études sur l'ellipsométrie reportées dans la littérature sont nombreuses et datent de plus d'un siècle [71], son utilisation ne s'est largement répandue que depuis une vingtaine d'années grâce à la présence des ordinateurs qui ont permis le traitement numérique de données de plus en plus complexes, permettant l'automatisation et l'optimisation des mesures et de leurs traitements.

Depuis, l'ellipsométrie est devenue une technique de métrologie usuelle, aussi bien dans les laboratoires de recherche que dans le milieu industriel. Ses points forts sont son caractère non destructif, sa large gamme d'application (mesure d'épaisseur, indices optiques des matériaux, etc.) et sa possibilité de contrôle *in situ* et en temps réel.

Il existe différentes configurations d'ellipsomètres: ellipsomètre à annulation, ellipsomètre à élément tournant et ellipsomètre à modulation de phase, etc.... Ces différentes configurations utilisent le même principe découvert il y a plus d'un siècle par Paul Drude [71], ce principe sera décrit ci-dessous.

I.1.1.1 Principe de l'ellipsométrie

L'ellipsométrie est une technique de métrologie optique, basée sur la mesure de changement de la polarisation de la lumière dû à la réflexion ou à la transmission.

Comme illustré sur la *Figure 1*, une lumière incidente polarisée linéairement sur une surface est polarisée elliptiquement après réflexion. Si l'on désigne par p et s les composantes du champ électrique parallèle et perpendiculaire au plan d'incidence. La modification du champ électrique après réflexion est représentée par les deux coefficients de réflexion complexes r_p et r_s . Dans le cas, d'une interface plane entre deux milieux d'indices N_0 et N_1 , ces coefficients, nommés coefficients de Fresnel sont donnés par :

$$r_p = |r_p| \exp(j\delta_p) = \frac{N_1 \cos \theta_0 - N_0 \cos \theta_1}{N_1 \cos \theta_0 + N_0 \cos \theta_1} \quad 1$$

$$r_s = |r_s| \exp(j\delta_s) = \frac{N_0 \cos \theta_0 - N_1 \cos \theta_1}{N_0 \cos \theta_0 + N_1 \cos \theta_1} \quad 2$$

Les coefficients de Fresnel sont complexes, leurs modules $|r_p|$ et $|r_s|$ représentent la modification apportée en amplitude à la composante p et s du champ incident, et δ_p et δ_s représentent le retard de phase introduit par la réflexion.

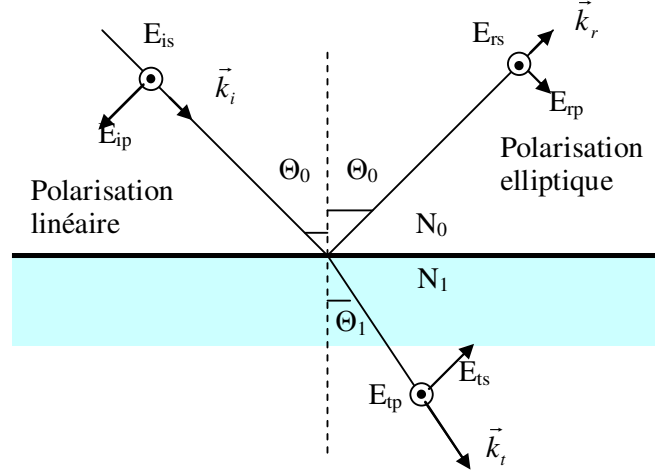


Figure 1 : Réflexion et transmission d'une onde plane incidente, avec un angle θ_0 , sur une surface plane séparant deux milieux 0 et 1 d'indices complexes respectif N_0 et N_1 . On montre sur la figure les composantes s et p du champ électrique des ondes incidente (E_i), réfléchie (E_r) et transmise (E_t) ainsi que les vecteurs d'ondes associés ($\vec{k}_i, \vec{k}_r, \vec{k}_t$).

N_0 et N_1 sont les indices optiques complexes du milieu ambiant et du matériau. Dans le cas général le milieu ambiant est l'air ($N_0=1$) et l'indice de milieu 1 (matériau) est complexe, il peut être écrit sous la forme complexe :

$$N_1 = n_1 - jk_1 \quad 3$$

n_1 est l'indice de réfraction et k_1 le coefficient d'extinction du milieu.

En pratique, la quantité mesurée par l'ellipsomètre est le rapport des deux coefficients de réflexion. Elle est définie comme étant l'équation fondamentale de l'ellipsométrie et s'exprime sous la forme :

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \tan(\psi) \exp(j\Delta) \quad 4$$

Avec :

$$\psi = \arctan \left| \frac{r_p}{r_s} \right| \quad \text{et} \quad \Delta = \delta_p - \delta_s \quad 5$$

Ces angles sont nommés les angles ellipsométriques.

Pour le calcul théorique de ces angles, il est nécessaire de connaître les coefficients de réflexion complexes r_p et r_s . Ces coefficients dépendent à la fois de l'angle d'incidence, de la

longueur d'onde et de l'indice optique des matériaux. Nous allons voir maintenant les techniques les plus largement employées pour la mesure des angles ellipsométriques.

I.1.1.2. Ellipsométrie à annulation

Le premier ellipsomètre dit à annulation correspond au schéma de la Figure 2. Il est constitué d'une source de lumière, puis successivement, d'un polariseur (P), d'un compensateur (C), d'un analyseur (A) et d'un détecteur.

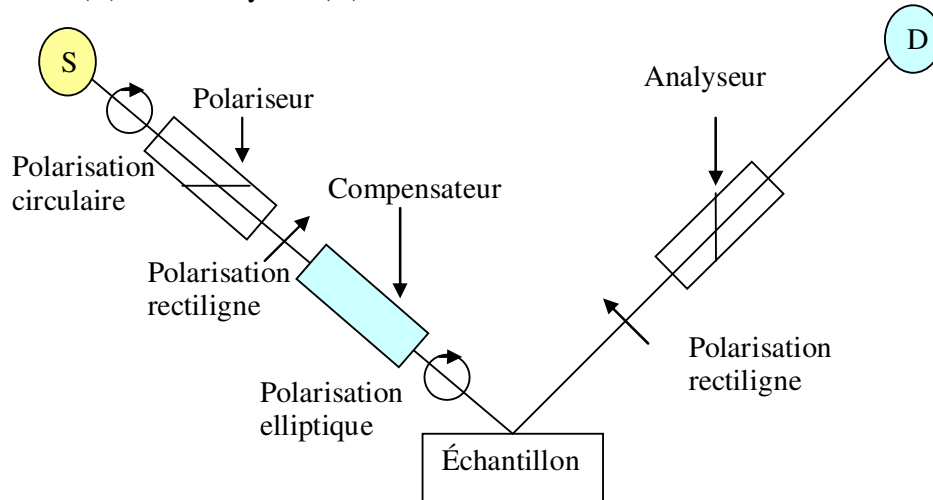


Figure 2 : Schéma de l'ellipsomètre à annulation

La mesure sur un tel système, se fait par un ajustement de l'orientation du polariseur et de l'analyseur de façon à ne plus détecter aucun signal, d'où le terme annulation. Lorsque le zéro de l'intensité est obtenu, les angles du polariseur (P), du compensateur (C) et de l'analyseur (A) sont directement reliés aux angles ellipsométriques suivant la relation :

$$\tan(\psi)\exp(j\Delta) = -\tan(A) \frac{\tan(C) - \tan(P - C)}{1 + j \tan(C)\tan(P - C)} \quad 6$$

Cette méthode permet le calcul direct de ψ et Δ . Cependant, ce type d'ellipsomètre est lent, car la mesure nécessite la recherche du zéro d'intensité. De plus, sa précision dépend du bruit du détecteur car on travaille toujours au minimum du signal.

I.1.1.3. Ellipsométrie à modulation par élément tournant

L'automatisation des ellipsomètres a permis la mise en place de la seconde famille d'ellipsomètres incorporant une modulation dite à élément tournant. Cette modulation peut être produite par :

- La rotation du polariseur (en anglais RPE pour Rotating Polarizer Element) on parle d'ellipsomètre à polariseur tournant.
- La rotation de l'analyseur (RAE pour Rotating Analyzer Element) on parle d'ellipsomètre à analyseur tournant.
- La rotation du compensateur (RCE pour Rotating Compensator Element) on parle d'ellipsomètre à compensateur tournant.

Le schéma de principe est le même que le schéma de la Figure 2, hormis pour les deux premiers ellipsomètres cités qui ont été envisagés à la base sans compensateur. Pour chaque configuration un élément (polariseur, analyseur ou compensateur) est soumis à une rotation uniforme lorsque les autres sont maintenus à un angle fixe. L'effet de cette rotation est de moduler en polarisation le faisceau lumineux. Le signal détecté est mesuré en fonction du

temps, une analyse mathématique (la plupart du temps par l'utilisation de transformée de Fourier) permet de remonter aux angles ellipsométriques ψ et Δ .

Par exemple, dans le cas d'un RPE l'intensité détectée à la sortie du système prend la forme suivante (le traitement est identique dans les deux autres cas) :

$$I = I_N (\alpha \cos 2P + \beta \sin 2P + 1) \quad 7$$

Avec :

$$\alpha = \frac{\tan^2 \psi - \tan^2 A}{\tan^2 \psi + \tan^2 A} \quad 8$$

$$\beta = 2 \cos \Delta \frac{\tan \psi \tan A}{\tan^2 \psi + \tan^2 A} \quad 9$$

Error! Objects cannot be created from editing field codes.
Error! Objects cannot be created from editing field codes. 10

Où I_0 est l'intensité du faisceau incident.

Ce sont les ellipsomètres à analyseur et à polariseur tournant [88, 15] qui ont reçu le plus d'intérêt. Néanmoins notons que l'erreur expérimentale est proportionnelle à $1/\sin \Delta$ [24]. Cela conduit à une mauvaise précision lorsque la valeur de l'angle ellipsométrique Δ est proche de 0 ou 180°. Les montages à compensateur tournant [40] ont permis de s'affranchir de cette limitation en introduisant un compensateur dans le montage ellipsométrique. Ceci permet une modification artificielle de la valeur de Δ pour sortir de cette zone critique. Toutefois ce type d'ellipsomètre nécessite l'utilisation d'un étalonnage spectral du compensateur produisant des erreurs systématiques préjudiciables pour la mesure.

Les montages RPE et RAE ont l'avantage d'être entièrement achromatiques, ce qui permet un gain de précision pour l'utilisation en spectroscopie. De même la vitesse d'acquisition de l'ordre de quelques secondes rend l'utilisation de ce type d'ellipsomètre incompatible avec une application en temps réel.

Finalement, nous dirons que l'ellipsomètre à élément tournant en particulier l'ellipsomètre à polariseur tournant, constitue un appareil idéal pour les analyses spectroscopiques de haute précision en *ex situ*. La plupart des ellipsomètres spectroscopiques disponibles actuellement sur le marché sont de ce type.

1.1.1.4. Ellipsométrie à modulation de phase

Le troisième type, l'ellipsomètre à modulation de phase [80] (cf. Figure 4) ou PME (de l'anglais Phase Modulation Ellipsometry) a été introduit en 1969 par Jaspersen et Schnatterley [44]. Le principe est d'introduire un modulateur photoélastique permettant de moduler la polarisation du signal tout en gardant le polariseur et l'analyseur fixes. Le modulateur photoélastique est un barreau de verre de silice parallépipédique d'indice N_0 soumis par l'intermédiaire d'un élément piézoélectrique à une contrainte uniaxiale. Sous l'action de cette contrainte le barreau devient alors biréfringent avec deux axes principaux, N_1 étant l'indice du barreau selon l'axe principal de la contrainte (cf. Figure 3). Cette biréfringence génère alors un déphasage périodique entre les deux composantes du champ E de la forme :

$$\delta(t) = \delta_0 \sin(\omega t) \quad 11$$

Avec :
 δ_0 : l'amplitude de modulation, en général sa valeur reste constante quelle que soit la longueur d'onde.
 ω : pulsation angulaire du modulateur.

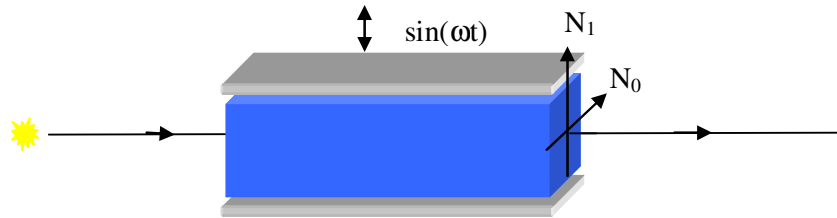


Figure 3 : Modulation de l'indice optique par la contrainte piézoélectrique

Le modulateur est souvent placé après le polariseur (à la place du compensateur dans la Figure 2). Le polariseur et le modulateur ou l'analyseur et le modulateur sont rendus solidaires de telle sorte que :

$(P-M=\pm 45^\circ)$ ou $(A-M=\pm 45^\circ)$. P , A et M étant respectivement les angles du polariseur de l'analyseur et du modulateur.

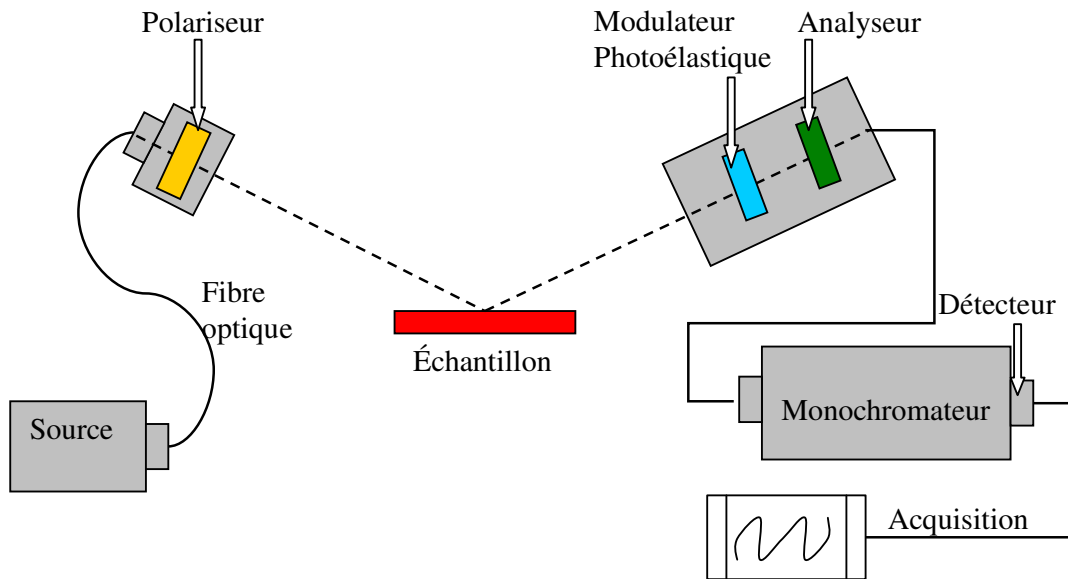


Figure 4 : Représentation schématique de l'ellipsomètre spectroscopique à modulation de phase

Ce type d'appareil, combine les atouts d'une large gamme spectrale UV-IR et de la rapidité (grâce à la présence d'un modulateur photoélastique), la fréquence de modulation est typiquement de l'ordre de 50KHz. Cela permet des vitesses d'acquisition 100 fois plus rapides que le polariseur tournant. De plus, on s'affranchit des perturbations basses fréquences dues aux mouvements mécaniques des éléments optiques.

Ce type d'ellipsomètre nécessite d'une part, la calibration du modulateur en fonction de la longueur d'onde et de la température, et d'autre part, d'ajuster la modulation à chaque longueur d'onde dans le but d'obtenir un maximum de sensibilité. Cela est rendu possible grâce à l'utilisation d'un système d'étalonnage, de régulation de la température, et d'une électronique performante capable d'acquérir et de traiter le signal à une fréquence compatible avec celle de modulation.

L'appareil utilisé dans cette thèse est un ellipsomètre à modulation de phase (UVISEL de Jobin Yvon), représenté schématiquement sur la Figure 4.

Il faut noter que sur cet appareil le modulateur se situe sur le bras de détection, entre l'analyseur et l'échantillon. La gamme spectrale assurée par cet ellipsomètre s'étend de l'ultraviolet au proche infrarouge (220-830nm).

L'intensité du champ électrique au niveau de détecteur s'écrit sous la forme :

$$\text{Error! Objects cannot be created from editing field codes.} \quad 12$$

Avec :

$$\text{Error! Objects cannot be created from editing field codes.} \quad 13$$

$$I_s = \sin 2(A - M) \sin 2P \sin 2\psi \sin \Delta \quad 14$$

$$I_c = \sin 2(A - M)[(\cos 2\psi - \cos 2P) \sin 2M + \sin 2P \cos 2M \sin 2\psi \cos \Delta] \quad 15$$

$$\text{Error! Objects cannot be created from editing field codes.} \quad 16$$

Avec I_0 est l'intensité initiale du faisceau incident.

Les fonctions $\sin \delta(t)$ et $\cos \delta(t)$ peuvent être développées en série de Fourier à l'aide des fonctions de Bessel de première espèce avec comme argument l'amplitude de modulation δ_0 (équation 11):

$$\sin \delta(t) = 2 \sum_{m=0}^{\infty} J_{2m+1}(\delta_0) \sin[(2m+1)\omega t] \quad 17$$

$$\cos \delta(t) = J_0(\delta_0) + 2 \sum_{m=0}^{\infty} J_{2m}(\delta_0) \cos(2m\omega t) \quad 18$$

Dans l'analyse du signal, seules les harmoniques $m=0, 1$ et 2 sont utilisées. Les autres harmoniques n'apportent que peu d'information supplémentaire.

D'après les équations (14 et 15) I_0 , I_s et I_c dépendent des orientations respectives du polariseur, de l'analyseur et de l'angle entre l'analyseur et le modulateur. Pour l'acquisition spectroscopique on définit deux configurations de mesure; la première, notée *configuration I* par l'équipementier, est telle que $M=0^\circ$ et $P=45^\circ$ ($A-M=45^\circ$). Cette configuration permet d'exprimer simplement I_s et I_c en fonction des angles ellipsométriques ψ et Δ à partir des équations 14 et 15 par :

$$I_s = \sin 2\psi \sin \Delta \quad 19$$

$$I_c = \sin 2\psi \cos \Delta \quad 20$$

Dans la deuxième configuration, notée *configuration II*, on fixe $M=45^\circ$ et $P=45^\circ$ ($A-M=45^\circ$). Les expressions de I_s et I_c deviennent :

$$I_s = \sin 2\psi \sin \Delta \quad 21$$

$$\text{Error! Objects cannot be created from editing field codes.} \quad 22$$

Notons que les intensités I_s et I_c varient entre les valeurs -1 et 1 . L'utilisation de l'une ou de l'autre de ces deux configurations comporte des ambiguïtés sur la détermination de ψ et Δ pour certaines valeurs :

- Dans la *Configuration I* on ne détermine que $\sin 2\psi$, par conséquent, la valeur de ψ est indéterminée entre ψ et $(90^\circ - \psi)$, avec un point critique à 45° .
- Dans la *Configuration II*, on ne détermine que $\sin \Delta$, par conséquent, la valeur de Δ est indéterminée entre Δ et $(180^\circ - \Delta)$, avec un point critique à 90° .

La mesure dans les deux configurations permet d'étalonner l'instrument. Dans ce travail, nous avons effectué les mesures dans la configuration I ;

I.1.2 La réflectométrie spectroscopique

La réflectométrie spectroscopique est une technique de métrologie optique qui mesure les coefficients de réflexion en fonction de la longueur d'onde. Le schéma de principe d'un réflectomètre est donné sur la *Figure 5*, il s'agit d'un réflectomètre à incidence normale [39]. Ce type de réflectomètre est largement utilisé pour la mesure de l'épaisseur des couches minces. Ce système ne fournit que les modules des coefficients de réflexion R_p et R_s pour les deux polarisations p et s respectivement. Cela en fait a priori une technique moins précise que l'ellipsométrie pour la mesure de l'indice optique des matériaux.

Grâce à la simplicité de ses optiques, le réflectomètre peut être rendu compact, idéal pour la métrologie *in situ* dans l'industrie microélectronique et facilement intégrable sur des équipements. Toutefois, la vitesse d'acquisition de ce type d'appareil de l'ordre de quelque second le rend incompatible avec une application de contrôle en temps réel.

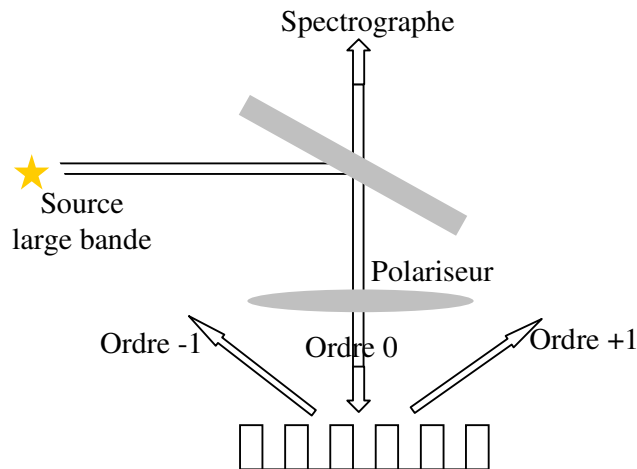


Figure 5 : Principe d'un réflectomètre à incidence normale

I.1.3 Autres instruments de mesure

Il existe d'autres instruments de mesure de la réponse optique utilisable pour la scatterométrie. On peut citer :

Le ϕ -ellipsomètre [13] est un ellipsomètre permettant la mesure de la réponse optique azimutale d'un échantillon. Il permet d'obtenir la réponse d'un réseau en une seule mesure avec une vitesse d'acquisition de l'ordre d'une mesure par minute. Les grandeurs physiques mesurées sont les modules des coefficients de réflexion R_p et R_s pour les deux polarisations.

La goniométrie ou 2θ -scatterométrie [21, 20] est un outil de métrologie optique qui consiste à faire varier l'angle d'incidence, en général, à longueur d'onde fixe. Elle figure parmi les premières méthodes employées en scatterométrie. Cette technique comme la réflectométrie mesure les deux coefficients R_p et R_s à longueur d'onde fixe. Les dernières générations de ce type d'équipement développées par Accent technologies (Nanometrics) utilisent un système de lentille avec une grande ouverture numérique ce qui évite tout

mouvement mécanique, donc un gain en précision. La goniométrie peut être vue comme un cas particulier d'OFT décrite ci-dessous.

L'OFT (Optical Fourier Transform) est une méthode optique permettant de mesurer le diagramme angulaire de la réponse optique d'un échantillon [42]. Toute la lumière émise angulairement par la surface de l'échantillon est focalisée simplement et rapidement sur le plan de Fourier sans mouvement mécanique. Une caméra placée dans le plan conjugué du plan de Fourier permet de capter en une seule acquisition tous les vecteurs d'onde. L'instrument OFT est une combinaison achromatique des différentes lentilles qui peuvent mesurer les champs diffractés avec de très grandes ouvertures angulaires ($\theta \in [-80^\circ, 80^\circ]$ et $\varphi \in [0, 360^\circ]$, avec θ et φ l'angle polaire et azimutal respectivement). Les paramètres mesurés sont toujours les modules des coefficients de réflexion R_p et R_s .

L'ellipsométrie de Mueller [26] est une technique qui permet également la mesure de la dépolarisation de la lumière. Toutefois, ce type d'ellipsomètre est encore utilisé essentiellement en laboratoire et il doit montrer son efficacité et ses performances pour espérer conquérir l'industrie et remplacer les instruments actuels.

Nous avons présenté ici le principe de l'ellipsométrie ainsi que les principaux outils de métrologie optique permettant la mesure de la réponse optique d'une structure. Ces instruments sont largement utilisés pour la caractérisation des matériaux. On peut citer parmi leurs nombreuses applications : la caractérisation des constantes optiques des matériaux, la mesure de l'épaisseur de couche mince, le suivi en temps réel de la croissance d'une couche et la mesure par scatterométrie des propriétés optiques et géométriques d'un profil de ligne périodique etc.... Nous nous décrirons dans la suite une des principales applications qui est la mesure par scatterométrie des paramètres géométriques d'une structure.

I.2 Technique de résolution du problème direct

La détermination de la signature scatterométrique théorique d'un réseau périodique, à partir d'outils de simulation électromagnétique, est appelée **problème direct**. Ce problème possède une solution unique (cf. Figure 6).

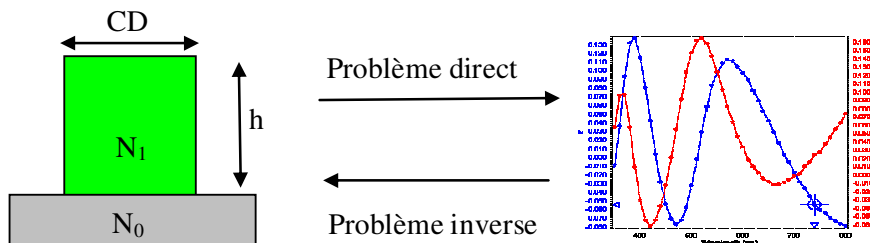


Figure 6 : Problème direct et problème inverse en scatterométrie

Dans cette thèse nous avons utilisé la méthode modale de Fourier MMFE [50, 59] (de l'anglais Modal Method by Fourier Expansion) pour la résolution du problème direct. Cette dernière a été très largement utilisée pour l'analyse du problème de diffraction par une structure périodique. Elle conduit à une solution rigoureuse des équations de Maxwell et elle a l'avantage d'être relativement simple à programmer. Les codes de calcul utilisés ont été développés par l'équipe lithographie du laboratoire. Le formalisme mathématique de la méthode MMFE ne sera pas présenté dans cette thèse, le lecteur trouvera une description détaillée aux références [72, 78]. Voici le résumé en quelques lignes du principe de cette méthode.

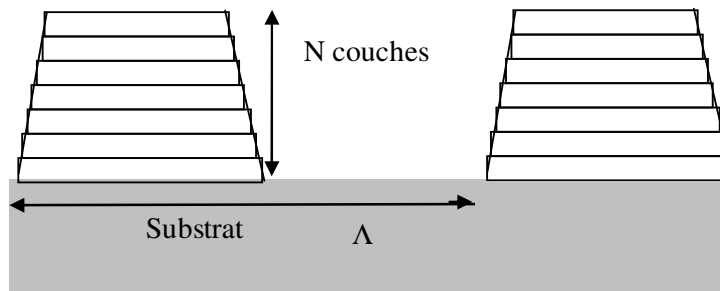


Figure 7: Découpage du profil géométrique quelconque d'un réseau en tranches localement verticales. La précision du calcul est liée au nombre de tranches.

La méthode de la MMFE exprime les solutions des équations de Maxwell sous la forme de modes de propagation dans la structure [50]. Le profil géométrique de la structure est approché par un empilement de couches (cf. Figure 7). Le champ électromagnétique global est donné par une combinaison linéaire de tous les modes de chaque couche. Les amplitudes de ces modes sont déterminées par l'écriture des relations de continuité.

L'origine de cette méthode remonte au début des années 80, lorsque Moharam et Gaylord ont publié la première version connue sous le nom de la théorie rigoureuse des ondes couplées [59] (en anglais RCWA pour Rigorous Coupled Wave Analysis).

Cette méthode a bénéficié de plusieurs travaux la rendant applicable pour les études de différents types de structures. Au début elle a été utilisée pour résoudre le problème de diffraction dans un réseau quelconque, d'abord diélectrique puis absorbant et métallique [60, 61, 63]. Elle s'est ensuite adaptée à la diffraction conique [62] ainsi qu'aux réseaux à deux dimensions [58]. Elle a également traité les réseaux de diffraction anisotropes [74].

En 1996, Li [49] a donné les bases mathématiques connues sous le nom de règles de factorisation pour améliorer la convergence de la méthode dans le cas de la polarisation TM [47, 34].

Les principales limitations de cette méthode sont liées au fait que le profil réel doit être approché par un empilement de couches. Toutefois, elle est assez robuste, assez simple à programmer et largement utilisée pour le calcul des réseaux, notamment en scatterométrie.

I.3 Technique de résolution du problème inverse

I.3.1 Méthode des moindres carrés

Une fois le calcul électromagnétique terminé pour un ou plusieurs profils de ligne périodiques, se pose le problème de la comparaison aux signaux mesurés. Dans la majorité des cas, on utilise la méthode des moindres carrés, car elle est simple à mettre en œuvre. Notons qu'elle est associée au cas d'une statistique gaussienne [90].

Considérons le cas d'une mesure expérimentale représentée par un ensemble de données y_i qu'on appellera signature expérimentale, avec $i \in [1, n]$ où n est le nombre de points expérimentaux (par exemple, les longueurs d'onde dans le cas particulier de l'ellipsométrie spectroscopique).

Pour ces données expérimentales, nous considérons un modèle que l'on souhaite ajuster à ces mesures et qui est défini, pour un jeu de paramètres par:

$$\text{Error! Objects cannot be created from editing field codes.} \quad 23$$

Avec $\text{Error! Objects cannot be created from editing field codes.}$ une signature scatterométrique théorique de taille n calculée par un code électromagnétique MMFE. Le

vecteur **Error! Objects cannot be created from editing field codes.** représente les paramètres recherchés. On appellera ce type de paramètre les **paramètres de sortie** du modèle ou les **mesurables**. m est le nombre de paramètres de sortie. Le vecteur **Error! Objects cannot be created from editing field codes.** représente tous les autres paramètres fixes dans le modèle, tels que l'angle d'incidence, l'ordre de troncature de la MMFE, etc. Ces paramètres fixes seront également appelés **paramètres d'entrées** du modèle, k représente leur nombre.

Dans notre cas, on cherche à estimer les valeurs des paramètres optiques (indices optiques des matériaux) et/ ou géométriques les plus probables définissant une structure en minimisant une fonction de coût.

Minimiser la fonction de coût consiste à maximiser la probabilité d'avoir un ensemble « vrai » de paramètres du modèle \mathbf{p} . C'est-à-dire étant donné un vecteur de paramètres définissant un modèle, quelle est la probabilité pour que ces valeurs soient exactes avec une certaine tolérance? Le but devient donc de chercher **l'ensemble des valeurs des paramètres qui maximise cette probabilité**. La technique la plus utilisée pour résoudre ce problème est la méthode du maximum de vraisemblance [90]. Cette théorie se fonde sur l'intuition et n'a pas en toute rigueur de base mathématique. La fonction de vraisemblance, notée **Error! Objects cannot be created from editing field codes.**(de l'anglais Likelihood), peut être écrite par la relation suivante :

$$\text{Error! Objects cannot be created from editing field codes.} \quad 24$$

Où **Error! Objects cannot be created from editing field codes.** est la densité de probabilité de chaque mesure. On suppose que les mesures sont indépendantes les unes des autres et que leurs probabilités sont indépendantes. Considérons l'hypothèse la plus simple et la plus couramment utilisée en pratique :

La densité de probabilité correspondant à toutes les observations est gaussienne.

Chaque observation est affectée d'un bruit de mesure de moyenne nulle, et d'un écart type σ_i .

Dans ce cas, la densité de probabilité de chaque mesure peut s'écrire [90]:

$$l_{\mathbf{p}}(y_i) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{y_i - f_i(\mathbf{q}, \mathbf{p})}{\sigma_i}\right)^2\right) \Delta y_i \quad 25$$

Δy_i Représente la tolérance souhaitée en chaque point de mesure entre le modèle et les résultats expérimentaux et σ_i le bruit de mesure pour chaque longueur d'onde, l'équation (24) devient :

$$\text{Error! Objects cannot be created from editing field codes.} \quad 26$$

Souvent, les valeurs de σ_i sont supposées constantes et égales pour tous les points de mesure. On peut ainsi écrire:

$$\text{Error! Objects cannot be created from editing field codes.} \quad 27$$

Pour résoudre le problème de maximisation de la fonction de vraisemblance, on calcule le maximum du logarithme de la fonction ou le minimum de l'opposé du logarithme de la fonction. Le problème revient donc à rechercher l'ensemble des valeurs des paramètres \mathbf{p} qui minimise la fonction suivante :

$$\text{Error! Objects cannot be created from editing field codes.} \quad 28$$

Avec, n , σ_i , Δy_i des grandeurs constantes. La minimisation de cette fonction revient à minimiser la fonction suivante :

$$\text{Error! Objects cannot be created from editing field codes.} \quad 29$$

On parle alors de l'ajustement par la **méthode des moindres carrés pondérés**. La quantité **Error! Objects cannot be created from editing field codes.** est la **fonction de coût** qu'on cherche à minimiser, appelée aussi **norme 2 normalisée**. Les quantités **Error! Objects cannot be created from editing field codes.** sont appelées les résidus du modèle. Elles désignent l'écart entre les données de mesure et le modèle. Lorsque ces derniers sont divisés par σ_i , on parle de résidus normalisés.

Ainsi la résolution du problème inverse peut se ramener à une optimisation paramétrique nécessitant des méthodes mathématiques efficaces et robustes. On cherche les valeurs des paramètres **p** qui minimisent la fonction **Error! Objects cannot be created from editing field codes.**. Dans la littérature, de nombreuses techniques d'optimisation ont été développées. Nous en présenterons quelques unes classiquement utilisées.

I.3.2 L'unicité de la solution

La principale difficulté des problèmes d'optimisation est liée aux **problèmes des minima locaux** qui peuvent perturber la bonne solution qui est supposée être un **minimum global**. La question de l'unicité de la solution peut se poser sous deux aspects :

Deux structures différentes peuvent-elles conduire au même résultat expérimental ? A priori, oui. Cela dépend en particulier du nombre de mesures que l'on fait. En effet, si la signature expérimentale est obtenue avec un nombre de points limités, on peut s'attendre à ce que plusieurs structures différentes correspondent à cette même signature.

La résolution du problème inverse consiste à transformer l'information qui est présente dans la signature expérimentale, en information concernant la définition de la structure, mais en aucun cas on ne pourra créer de l'information qui n'est pas présente au départ. Donc si on veut éviter le problème de la multiplication des solutions, c'est-à-dire que plusieurs structures géométriques correspondent à une seule mesure, il faut augmenter le nombre de mesures (par exemple : faire varier l'angle d'incidence en plus de la longueur d'onde, etc.).

En pratique, pour s'affranchir de ce problème, la technique de scatterométrie ne considère pas une structure a priori totalement inconnue au départ. Un certain nombre de paramètres du modèle sont connus (comme la période, les indices optiques des matériaux, etc.).

Un autre aspect du problème de l'unicité est la présence d'éventuels minima locaux dans la fonction de coût. Une adéquation parfaite entre les calculs et les résultats expérimentaux conduiraient à une valeur nulle de la fonction de coût. En pratique, on recherche le minimum de la fonction de coût. Peu de méthodes d'optimisation sont capables de s'affranchir des minima locaux et celles qui peuvent le faire sont trop lentes pour être utilisées dans un contexte de scatterométrie en microélectronique. D'éventuels minima locaux peuvent être mis en évidence par une cartographie de la fonction de coût dans la zone de variation autorisée des paramètres. Une telle étude ne peut cependant pas être systématique, car elle peut être longue à réaliser.

I.3.3 Méthode Levenberg-Marquardt

L'algorithme de Levenberg-Marquardt (*LM*) [57, 48] est devenue une technique standard, employée dans divers disciplines scientifiques, pour la résolution des problèmes de minimisation.

Cet algorithme comme son nom l'indique a été proposé par Levenberg et Marquardt. Il permet de combiner la méthode du Gradient et la méthode de Gauss-Newton [9] suivant que la fonction de coût se rapproche d'une forme quadratique ou non. En effet, la méthode de *LM*

se comporte comme une méthode Gauss-Newton au voisinage de la solution, alors que loin de la solution elle devient une méthode du Gradient.

Cette méthode fait appel au calcul de dérivées partielles et nécessite de donner une valeur initiale aux paramètres inconnus du modèle. Le choix du point de départ est crucial car l'algorithme peut converger vers un minimum local. Toutefois, dans de bonnes conditions de départ, la méthode converge très rapidement. En plus cette méthode fournit la matrice de covariance entre les paramètres (les variables du modèle), ce qui permet d'estimer la précision sur les paramètres de sortie.

I.3.4 Méthode du simplex

Cette méthode a été développée par G. B Dantzig en 1947 et elle a été présentée et améliorée par Nelder et Mead en 1965 [65]. Cette méthode contrairement à la méthode de *LM* ne fait pas appel à des calculs de dérivées partielles. Si n est le nombre total d'inconnues, la méthode demande initialement un polyèdre à $n+1$ côtés dans un espace à n dimensions. Le polyèdre formé est appelé simplex. La méthode évalue la fonction de coût en chacun des sommets. Le sommet à la plus forte évaluation est supprimé et un nouveau sommet est défini par des transformations géométriques. Ainsi la fonction de coût diminue jusqu'à atteindre un critère d'arrêt (nombre d'itérations, volume minimum du polyèdre...).

Cette méthode est facile à mettre en œuvre, elle n'est pas gourmande en terme d'espace mémoire. Elle a l'avantage d'être moins dépendante du point de départ. Ce point est appréciable, en particulier lorsqu'on ne connaît rien sur les variables. Elle est malheureusement aveugle à la proximité du minimum global recherché. Le temps de calcul est non négligeable puisqu'elle nécessite parfois un grand nombre d'évaluation de la fonction à optimiser.

Cette méthode comme la méthode de *LM* a l'inconvénient d'être peu compatible pour une application en temps réel car le temps de la résolution du problème inverse n'est pas borné et ne peut pas être connu d'avance.

I.3.5 Réseaux de neurones

Le réseau de neurones peut être défini mathématiquement comme une fonction algébrique, a priori non linéaire, qui nécessite une étape d'apprentissage pour améliorer son efficacité et définir son champ d'action. Les travaux de Gereige [33] ont montré que le réseau de neurones peut être utilisé pour la détermination de propriétés optiques et géométriques (indice de réfraction et épaisseur) d'une couche mince. Il a également montré l'apport du réseau de neurones dans le domaine de la scatterométrie pour la caractérisation des réseaux de diffraction possédant différents profils géométriques. Des travaux futurs menés au LTM et au Le Laboratoire Dispositifs et Instrumentation Optoélectroniques et Micro-ondes DIOM vont étudier l'efficacité et les performances des réseaux de neurones pour la scatterométrie en temps réel.

I.3.6 Méthode des bibliothèques

La résolution du problème inverse par la recherche des solutions dans une bibliothèque est la méthode la plus utilisée par de nombreux équipementiers. La bibliothèque est une base de données de signatures simulées. Chaque signature correspond à un jeu de paramètre géométrique unique. Son principe est résumé dans la *Figure 8*.

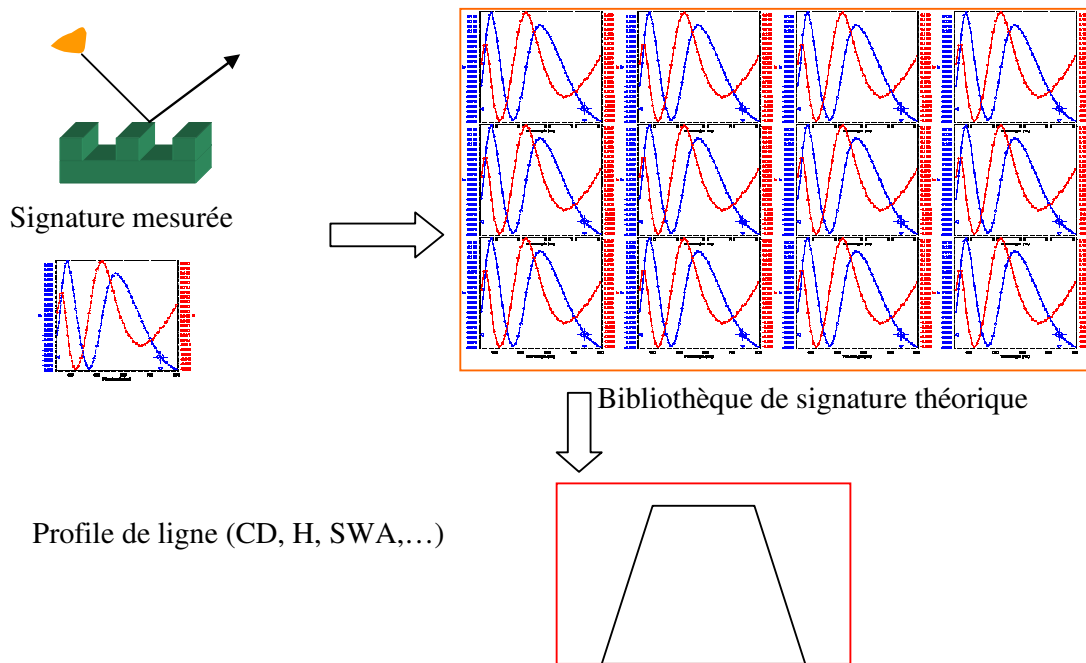


Figure 8 : Résolution du problème inverse par utilisation d'une bibliothèque de signature de diffraction

Dans son principe, cette méthode est identique à celle de la régression excepté que dans ce cas de figure l'ensemble des signatures a été précédemment généré. Cela rend plus aisé le calcul de la fonction de coût dans l'espace des paramètres. Les paramètres géométriques correspondant à la signature expérimentale sont déterminés en comparant la signature expérimentale à l'ensemble des signatures contenues dans la bibliothèque et en minimisant la fonction coût.

La méthode requiert la génération d'un très grand nombre de signatures pour une structure donnée. Le temps de génération d'une bibliothèque de plusieurs centaines de milliers de signatures est très long. A titre d'exemple, le temps de calcul total d'une bibliothèque pour 3 à 4 paramètres du modèle se chiffre en jours (voire en semaines selon la complexité du modèle) si on utilise un seul processeur.

Au sein de notre laboratoire nous avons développé une programmation parallèle des processeurs pour calculer les signatures par le code MMFE avec une efficacité maximale. Les calculs des bibliothèques réalisés au cours de ces travaux, ont lieu sur une machine à 8 cœurs, ce qui nous permet de générer les bibliothèques 8 fois plus rapidement.

L'inconvénient majeur de cette méthode est que si l'utilisateur désire rajouter ou retirer un paramètre au modèle géométrique utilisé, une nouvelle bibliothèque doit être générée. Cette méthode est néanmoins très bien adaptée pour le contrôle dimensionnel en production car les structures et le nombre de paramètres sont connus et fixés au préalable.

Cette méthode a l'avantage d'être compatible avec les contraintes du contrôle dimensionnel en temps réel. En effet, le temps de traitement du problème inverse pour une bibliothèque donnée est connu d'avance. Si le temps d'acquisition d'un équipement de métrologie optique est borné alors le temps de traitement du problème inverse doit être inférieur au temps d'acquisition. Actuellement seule la méthode des bibliothèques permet de répondre à cette contrainte.

Dans la suite nous allons présenter les développements effectués dans notre laboratoire pour rendre cette méthode applicable au contrôle de procédé en temps réel.

I.4 Résolution du problème inverse en temps réel

Le contrôle en temps réel des procédés de fabrication en microélectronique nécessite d'un côté, un équipement métrologique optique rapide (plusieurs acquisitions par seconde). Et d'un autre côté, un outil informatique puissant. Ce dernier, doit permettre un temps de traitement du problème inverse inférieur à la période de mesure.

L'utilisation d'un ellipsomètre en configuration temps réel, nécessite une bonne fréquence d'acquisition. Cela s'obtient au détriment de la résolution en longueur d'onde. Ceci est une limitation matérielle. Par exemple, les mesures rapportées dans cette thèse sont effectuées avec 16 longueurs d'ondes avec l'ellipsomètre UVISEL de JOBIN YVON.

La faible résolution en terme de longueur d'onde de notre ellipsomètre nuit à la qualité de la recherche dans la bibliothèque, car le nombre de points de comparaison est réduit. Nous avons développé un algorithme de reconstruction en temps réel qui compense cela. Le principe de cet algorithme de reconstruction est le suivant :

Avant de débiter le suivi du procédé en temps réel ($t=0s$), le profil de ligne est mesuré par une technique de métrologie classique : (scatterométrie statique, CD AFM).

Durant le procédé de fabrication (à chaque instant suivant) :

La recherche du meilleur voisin de la signature expérimentale est faite dans la bibliothèque en utilisant l'algorithme des k plus proches voisins.

Ensuite une régularisation temporelle (lissage) de Tikhonov est opérée sur chaque paramètre.

I.4.1 Algorithme des k plus proches voisins

L'algorithme de k plus proche voisin (k-P.P.V) consiste à trouver dans une bibliothèque les k signatures théoriques qui minimisent « le plus » la fonction de coût par rapport à une signature expérimentale.

La recherche des plus proches voisins est effectuée pour chaque signature expérimentale collectée en temps réel. Cette recherche permet d'obtenir plusieurs jeux de paramètres correspondant à une signature expérimentale (cf. *Figure 9*).

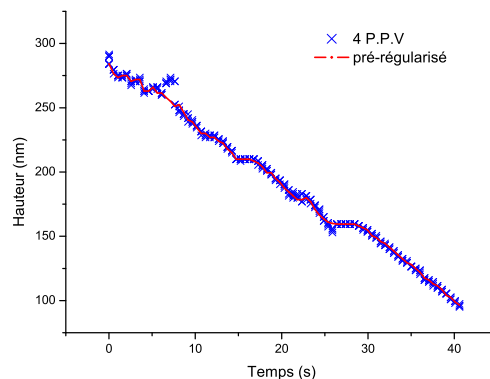


Figure 9 : exemple d'application de l'algorithme de k plus proche voisin

Ensuite une fonction régularisante permet de valoriser la régularité des paramètres durant le procédé. Cette fonction a pour but de choisir le meilleur voisin en favorisant la régularité de l'évolution des paramètres durant le procédé. Elle prend en compte les paramètres du profil de ligne aux instants précédents **Error! Objects cannot be created from editing**

field codes. pour influencer sur le choix de la signature théorique dans le problème de minimisation suivant:

Error! Objects cannot be created from editing field codes. 30

Ψ est la fonction régularisante. Cette fonction prend en compte les paramètres aux instants précédents pour influencer sur le choix des paramètres \mathbf{p}^t parmi les k plus proches voisins nous avons choisi ici une fonction régularisante simple donnée par l'équation suivante:

Error! Objects cannot be created from editing field codes. 31

Le vecteur β_1 est un paramètre de régularisation. La détermination des éléments de ce vecteur est délicate, en particulier du fait que tous les paramètres du profil n'ont pas forcément le même poids. Donc la taille du vecteur de régularisation dépend de la taille du vecteur de paramètre de sortie. Toutefois, le choix de ce vecteur peut être guidé par quelques considérations :

Les variations brutales au cours du procédé sont improbables, en particulier pour un procédé bien maîtrisé, on peut donc supposer que l'évolution des paramètres géométriques sera très régulière. On doit pouvoir donc choisir la force avec laquelle on doit contraindre chaque paramètre à être régulier.

A l'issue de l'étape précédente, nous avons obtenu une suite de vecteurs de paramètres \mathbf{p}^t indexés dans le temps. Chaque vecteur représente l'évolution du paramètre dans le temps. La taille du vecteur est égale à la taille de la fenêtre de régularisation (I.4.2). Ces vecteurs sont tous issus de l'espace discret formé par la bibliothèque. La variation de ces paramètres durant le procédé est généralement irrégulière, ainsi l'étape suivante dans notre procédé est une étape de lissage. Elle consiste à rendre plus régulier les paramètres extraits durant le procédé. Plusieurs méthodes existent dans la littérature. Parmi celles-ci nous avons choisi d'utiliser la régularisation de Tikhonov.

I.4.2 Régularisation de Tikhonov

L'étape de régularisation de Tikhonov [1] permet un lissage pour obtenir une variation régulière de chaque paramètre durant le suivi en temps réel du procédé.

Le problème de régularisation consiste à minimiser à l'intérieur d'une fenêtre de régularisation, la fonction suivante :

Error! Objects cannot be created from editing field codes. 32

Avec p un élément du vecteur du paramètre \mathbf{p} et \tilde{p} est le paramètre choisi à un instant t dans l'étape précédente (cette valeur fait donc partie de la bibliothèque). $\Omega(p)$ une fonction régularisante donnée par :

$$\Omega(p) = \beta_2 \sum_{i \in F_{T-N}} \left(\frac{p^{i-1} - p^i}{\Delta t} \right)^2 \quad 33$$

Avec : $F \subset \mathbb{N}$ est une fenêtre de régularisation, avec N la taille de la fenêtre (cf. Figure 10) et $F_{T-N} = [T - N, \dots, T - 1]$

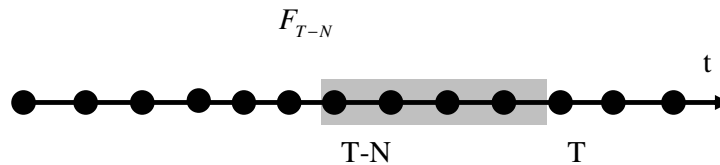


Figure 10 : Fenêtre de régularisation glissante au cours du temps

Le choix de l'utilisation d'une fenêtre de régularisation est imposé par la contrainte du temps réel. En effet, si la fonction de régularisation prend en compte à l'instant t toutes les valeurs des paramètres aux instants précédents, plus le nombre de paramètres sera grand et plus le temps de détermination du vecteur des paramètres, à un instant t sera important, ainsi la contrainte du temps réel ne sera pas respecté.

Le problème à résoudre revient à minimiser la fonction $K(p^t)(\forall t \in F_{T-N})$ telle que:

$$K(p^t) = (p^t - \tilde{p}^t)^2 + \beta_2 \sum_{i \in F_{T-N}} \left(\frac{p^{i-1} - p^i}{\Delta t} \right)^2$$

$$\frac{\partial K(p^t)}{\partial p^t} = 2(p^t - \tilde{p}^t) + \frac{\beta_2 2}{\Delta t^2} [(p^t - p^{t+1}) - (p^{t-1} - p^t)]$$

$$0 = p^{t-1}(-\beta) + p^t(1 + 2\beta) + p^{t+1}(-\beta) - \tilde{p}^t \quad 34$$

Dans l'égalité (34) on a substitué $\frac{\beta_2}{\Delta t^2}$ par β pour simplifier l'écriture. Ce qui revient au système matriciel suivant :

$$\begin{bmatrix} 1+2\beta & -\beta & & & \\ -\beta & 1+2\beta & -\beta & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & & -\beta & 1+2\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p^{T-N} \\ \vdots \\ \vdots \\ p^{T-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{p}^{T-N} + \beta p^{T-N-1} \\ \tilde{p}^{T-N-1} \\ \vdots \\ \tilde{p}^{T-1} + \beta p^T \end{bmatrix} \quad 35$$

On note que dans cet algorithme les éléments du vecteur des paramètres initiaux \tilde{p}^0 ne seront jamais changés. Ce vecteur constitue un véritable pilier sur lequel s'appuie la régularisation pour ne pas plonger dans de mauvais minima locaux dès le début du suivi du procédé [78].

Dans la *Figure 11*, nous présentons une application de cet algorithme qui sera utilisé lors de contrôle du procédé en temps réel (cf. chapitre III). Cet exemple montre l'évolution de la hauteur de la résine d'un motif en cours de gravure obtenue directement par la minimisation de la fonction de coût (données brutes en noire), ainsi que la valeur de la hauteur obtenue après régularisation (en rouge). On constate que le lissage permet d'avoir une variation régulière des paramètres durant le procédé.

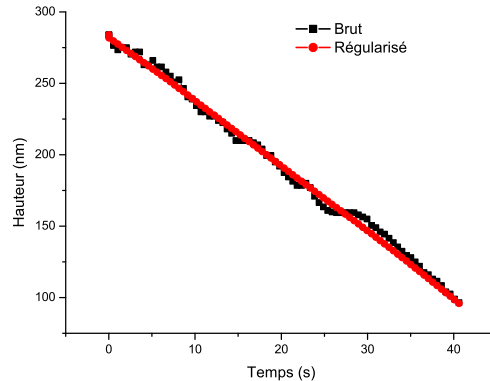


Figure 11 : Reconstruction dynamique de la hauteur d'un profil de ligne d'une résine 193nm étudiée dans le chapitre IV, en noir le résultat de la recherche du minimum dans la bibliothèque, en rouge le résultat après régularisation.

L'algorithme présenté dans cette partie permet de suivre l'évolution de la variation des paramètres durant le procédé. Toutefois, pour le contrôle en temps réel de procédé de

fabrication, le temps de la recherche des k.P.P.V dans la bibliothèque dépend fortement de la taille de la bibliothèque. Pour une application temps réel il faut que le temps de résolution du problème inverse soit inférieur au temps d'acquisition de l'équipement métrologique quelle que soit la taille de la bibliothèque. Malheureusement pour les grosses bibliothèques cette contrainte ne peut pas être respectée par simple utilisation d'un CPU (Central Processing Unit). Nous avons opté pour l'utilisation des GPUs (en anglais Graphics Processing Unit) pour accélérer la recherche de k.P.P.V dans la bibliothèque.

I.4.3 Utilisation des processeurs graphiques GPUs

Au cours de ces dernières années, les processeurs graphiques GPU ont bénéficié d'un écart de performance de plus en plus important comparés aux traditionnels CPU. Cette progression en puissance a permis aux GPU de fournir plus de 2.072 TFlops de performance (Tera Floating Point Operations per second) alors que la plus puissante carte CPU ne fournit que 48 GFlops. Cela a permis d'atteindre des vitesses de calcul allant de 20 à 120 fois la vitesse d'un CPU. Cette forte puissance a permis aux GPU de gagner en popularité et de devenir des outils de calcul puissants à faible coût.

Ces processeurs doivent leur puissance essentiellement à la quantité de sous unités logiques qui travaillent en parallèle et ne sont efficaces que pour certains types de calcul. Ils ne peuvent en aucun cas, dans leur configuration actuelle, remplacer les CPU. Par exemple, ils ne peuvent pas exécuter un système d'exploitation.

Cependant, les GPUs ont montré leur efficacité dans plusieurs domaines d'application. S'il n'est pas opportun de les citer tous ici, nous pouvons cependant en dégager quelques-uns particulièrement démonstratifs ou ayant un rapport avec nos travaux :

- Imagerie médicale : reconstruction topographique [91].
- Vision par ordinateur : suivi de forme [3] (utilisation des problèmes de K.P.P.V).
- Phénomènes physiques : problème à N corps, mécanique des fluides, etc.

Depuis 2006 le Laboratoire des Technologies de la Microélectronique développe un moyen pour résoudre en temps réel le problème inverse en scatterométrie. Ces travaux initialement menés par Soulan et al. [78] proposent l'utilisation des GPU pour la recherche des k.P.P.V dans une bibliothèque de signature. Cette méthode est basée sur le calcul de la distance entre les signatures expérimentales et simulées, basée sur la méthode de moindre carrée pondérée.

Ces travaux ont montré que les GPU permettent d'atteindre des vitesses supérieures de 10 fois à ce qu'on peut obtenir par utilisation d'un CPU. Toutefois, la limitation actuelle de l'utilisation de GPU est liée à la quantité mémoire disponible dans la carte graphique. Ceci a pour conséquence de rendre l'utilisation de GPU impossible pour les grandes bibliothèques (bibliothèques dont la taille est supérieure à la taille mémoire disponible sur carte graphique). Depuis 2010, NVIDIA a commencé à présenter des plateformes de programmation parallèle de GPUs, ce qui va permettre de s'affranchir de cette limitation, et de rendre utilisable les GPUs pour la recherche des P.P.V dans une bibliothèque de très grande taille.

I.5 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de présenter un ensemble de méthodes allant de la résolution du problème direct et du problème inverse en scatterométrie.

Nous avons présenté les principaux instruments de mesure de la réponse optique d'une structure. Dans ce travail seul l'ellipsomètre à modulation de phase et l'ellipsomètre à élément tournant ont été étudiés.

La méthode retenue pour la résolution du problème direct est celle de la MMFE, cette méthode nous a permis de nous doter d'un outil pour l'analyse de la lumière diffracté par une structure périodique.

La statistique retenue dans cette thèse est celle de la norme 2 normalisée: la méthode des moindres carrés pondérés. Elle permet d'avoir un cadre statistique pour les ajustements des données expérimentales avec celle obtenue par simulation. Le respect de la contrainte du temps réel pour la résolution du problème inverse nous a amené à utiliser la méthode des bibliothèques et l'algorithme de recherche de plus proche voisin accéléré par les GPU suivi d'une régularisation de Tikhonov. Ces développements nous ont permis d'avoir un outil informatique assez puissant pour la résolution du problème inverse en temps réel. Une application de cet outil sera présentée en détail au *chapitre III*.

II : Incertitudes de mesure

La miniaturisation des composants microélectroniques a atteint un niveau tel que les imperfections de fabrication ont de plus en plus d'impact sur les performances des dispositifs [6]. Dans ce contexte, les étapes de caractérisation qu'elles soient électriques ou dimensionnelles doivent être fiables et précises.

Dans ce chapitre, nous allons introduire le vocabulaire propre au domaine des incertitudes de mesure. Nous présenterons les éléments mathématiques servant à l'estimation des incertitudes de mesure sur les paramètres des réseaux de diffraction, ainsi que les principales sources d'incertitude pouvant contribuer à la dégradation de la mesure scatterométrique. Nous évaluerons l'impact de ces incertitudes sur les paramètres des profils de ligne.

L'étude de sensibilité de l'équipement métrologique nous permettra d'évaluer dans quelles limites les variations des paramètres des réseaux de diffraction sont détectables. Cette étude permet de mettre en évidence les paramètres géométriques de notre modèle qui sont mesurables.

II.1 Bruit de l'équipement

Tout équipement métrologique est caractérisé par un bruit de mesure qu'il lui est propre. Il est estimé par la détermination de l'écart type entre plusieurs mesures effectuées dans les mêmes conditions expérimentales. Nous avons effectué 100 mesures ellipsométriques sur une plaque de silicium, dans les conditions expérimentales suivantes : l'angle d'incidence de l'ellipsomètre UVISEL est fixé à 72.32° et la longueur d'onde varie dans l'intervalle ($190nm < \lambda < 826nm$). Les résultats de cette étude sont reportés dans la Figure 12. La courbe montre l'évolution des erreurs sur les variables ellipsométriques (I_s et I_c) (cf. chapitre I). On observe que l'erreur de mesure n'est pas constante et dépend de la longueur d'onde. Dans la gamme spectrale visible, le bruit est très faible, alors qu'aux extrémités du spectre (zone UV et IR), le bruit est plus important. Stchakovsky [80] a montré que cette augmentation est principalement due au bruit sur le détecteur Photo Multiplicateur (PM). Dans la suite de cette étude nous considérons que le bruit de notre équipement est égal au bruit présenté sur la Figure 12.

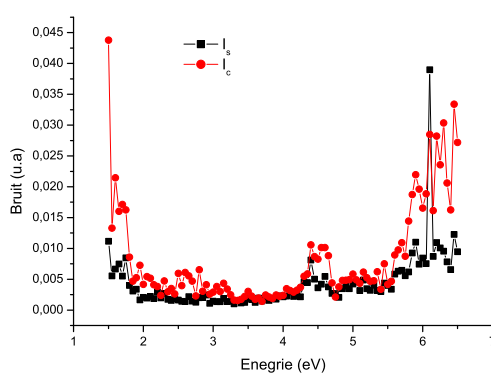


Figure 12 : Bruit de mesure sur les intensités I_s et I_c estimé à partir de 100 mesures expérimentales effectuées sur une plaque de silicium en rouge le bruit sur I_c et en noir le bruit sur I_s

II.2 La sensibilité

La sensibilité est représentative de la variation de la signature optique diffractée par une structure périodique par rapport aux paramètres de sorties. Cette sensibilité est définie comme étant une mesure de variation de la signature optique compte tenu d'un changement donné des paramètres de la structure (géométrie, propriétés optiques). Elle n'est autre que l'inverse de la variance du paramètre étudié, pour le bruit considéré dans les simulations. Elle est donnée par l'équation suivante [67, 66] :

$$S_j = \frac{1}{\sqrt{C_{jj}}} \quad \text{avec} \quad C(p) = (J^t J)^{-1} \quad 36$$

$C(p)$ Est la matrice de covariance des paramètres de sortie du modèle, et J est la matrice jacobienne des résidus **normalisés** défini par :

$$J_{ij} = \frac{1}{\sigma_i} \frac{\partial g_i}{\partial p_j} \quad 37$$

Avec :

σ_i le bruit de mesure de notre instrument de métrologie optique à la longueur d'onde λ_i , avec $i \in [1, \dots, n]$, n est le nombre de points expérimentaux.

$g_i = y_i - f_i(q, p)$ représente les résidus entre la signature expérimentale y_i et la signature modélisée $f_i(q, p)$ à la longueur d'onde λ_i .

Les vecteurs $\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_m)$ et $\mathbf{q} = (q_1, \dots, q_m)$ représentent respectivement **les paramètres de sortie** recherchés par la minimisation de la fonction coût et **les paramètres d'entrée** du modèle, avec m et k représentant leurs nombres.

Au cours de l'élaboration du modèle géométrique, l'analyse de la sensibilité est un outil précieux. En étudiant comment la réponse du modèle réagit aux variations de ses variables de sortie, l'analyse de sensibilité permet de déterminer :

Quelles sont les variables les plus influentes du modèle ? Cette étude est très importante en particulier lors de l'utilisation de la méthode des bibliothèques. Connaissant les paramètres les plus influents, il est possible de diminuer les erreurs de quantification sur ces paramètres en augmentant la précision dans la bibliothèque.

Quels sont au contraire les paramètres les moins influents ? Il sera possible de les considérer comme des paramètres fixes ou même de les supprimer. Cela permet d'obtenir un modèle plus léger avec moins de paramètres d'entrées et ainsi éviter le sur-paramétrage.

Les enjeux de l'analyse de la sensibilité sont alors multiples : validation d'un modèle, justification du choix du modèle et orientation des efforts de recherche de nouveaux modèles.

L'étude de sensibilité a été réalisée sur le nœud technologique 45nm actuellement utilisé dans l'industrie de la microélectronique [6, 68]. Le réseau de lignes étudié est celui présenté sur la Figure 13. Il est constitué d'une résine 193nm la JSR 1682 déposée sur BARC (Bottom Anti Reflective Coatings), le tout sur substrat de silicium. Les paramètres géométriques sont :

- CD : la largeur à mi hauteur de la ligne.
- h : la hauteur de la ligne.

- SWA : la pente du flanc de profil (SideWall Angle).
- r : l'arrondi de la ligne, nous avons choisi de le modéliser par un arrondi de forme circulaire.
- r_f : le pied de la ligne, nous avons choisi de le modéliser par un arrondi de forme circulaire.

Les caractéristiques du profil de ligne sont les suivants ($CD=45nm$, $h=130nm$, $SWA=88^\circ$, $t_{BARC}=82nm$, $r_f=2.5nm$, $r=2.5nm$), avec une période de $90nm$.

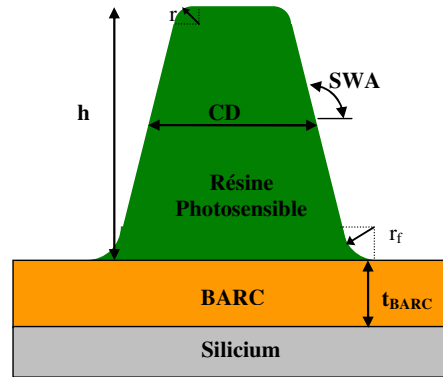


Figure 13 : Schéma de profil de ligne trapézoïdale avec arrondi haut et bas.

Nous allons étudier ici la sensibilité aux différents paramètres du profil de ligne présentés sur la Figure 13. Cette étude est faite pour les conditions de mesure dans lesquelles nous travaillons. L'angle d'incidence de l'ellipsomètre UVISEL est fixé à 72.32° . Le nombre de points retenus pour chaque spectre est de 110 (variation de la longueur d'onde par pas de $5nm$ avec $250 < \lambda < 800$).

	CD (nm^{-1})	SWA ($^\circ^{-1}$)	h (nm^{-1})	t_{BARC} (nm^{-1})	r (nm^{-1})	r_f (nm^{-1})
Sensibilité	120	89	118	182	5.2	1.1

Tableau 1 : La sensibilité globale des différents paramètres géométriques

Le Tableau 1 permet de comparer la sensibilité de chaque paramètre étudié. Des valeurs de l'ordre de l'unité indiquent que la variation induite par une variation de ces paramètres est de l'ordre du bruit de mesure. Car ces valeurs sont normalisées par rapport au bruit de mesure. On constate que les paramètres géométriques les plus influents sont l'épaisseur du BARC, la hauteur de la résine photosensible ainsi que le CD avec une sensibilité de 182, 118 et $120 (nm^{-1})$ respectivement. La pente du motif à une influence moins importante avec une sensibilité de l'ordre de $89 (^\circ^{-1})$. Les arrondis haut et bas ont une influence approximativement 100 fois plus faibles. Pour r_f , une valeur de sensibilité de 1,1 indique qu'il sera très difficile de le mesurer expérimentalement.

Cependant, ces résultats ne peuvent pas être généralisés. La sensibilité dépend de la structure étudiée (sa géométrie et ses propriétés optiques) et de leur valeur nominale. Par exemple, la sensibilité à l'arrondi dépend fortement de sa valeur nominale, même chose pour la pente.

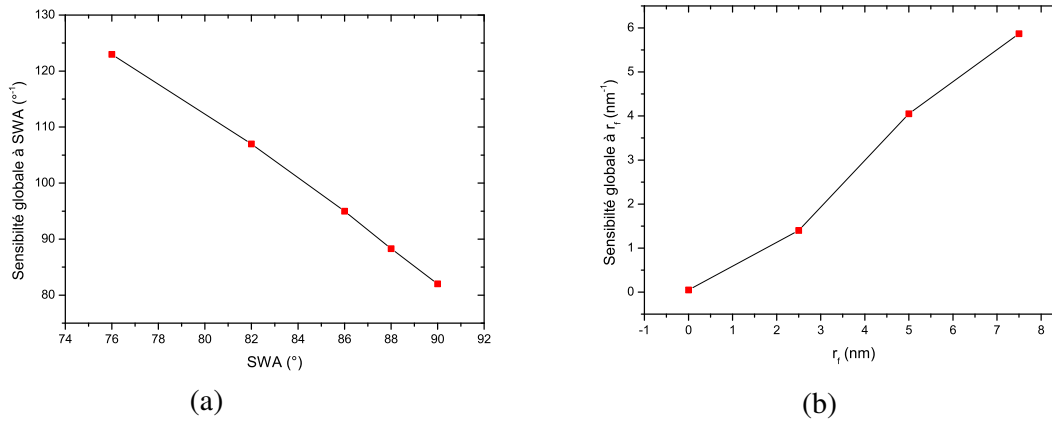


Figure 14 : L'influence de la valeur nominale des paramètres sur leurs sensibilités : (a) sensibilité globale à la pente de la ligne en fonction de sa valeur nominale. (b) sensibilité globale du pied de la ligne en fonction de sa valeur nominale.

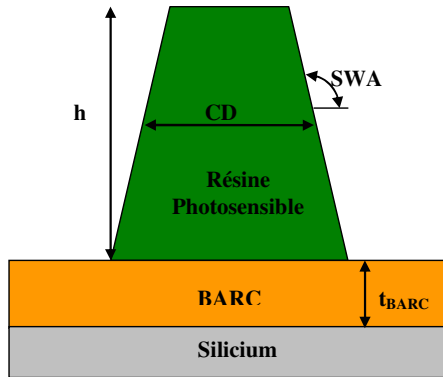
La Figure 14 montre la sensibilité à la pente du profil SWA (a) et au pied de la ligne (b) en fonction de leur valeur nominale. On remarque qu'on a une bonne sensibilité à la pente du profil quelle que soit sa valeur nominale. Ce qui montre qu'il est tout à fait possible de la mesurer avec précision. Toutefois, on constate que la sensibilité à la pente du profil est moins importante lorsque sa valeur est proche de 90°.

D'autre part, on constate que la sensibilité au pied de ligne croît lorsque le rayon de courbure du pied croît. Ce qui montre qu'il est tout à fait possible de détecter une variation du pied de la ligne lorsque son rayon de courbure est assez grand.

Farys et al. [12] ont mis en évidence que la détection du pied reste tout à fait envisageable à condition que l'angle d'incidence soit adapté. Logofătu et al. [52], ont observé que la sensibilité de la structure dépend de l'angle d'incidence et de la longueur d'onde utilisée. Ils ont constaté une forte sensibilité aux variations des paramètres dans la zone UV. La sensibilité dépend donc de la valeur nominale des paramètres de la structure, de la valeur nominale de l'angle d'incidence et de la gamme spectrale utilisée.

Cette étude, nous a permis d'estimer les paramètres les plus sensibles de notre structure. Nous avons remarqué que les arrondis haut et bas sont difficiles à mesurer avec précision, en particulier pour les faibles valeurs d'arrondi.

Par la suite, on utilisera par défaut le profil de ligne trapézoïdal présenté sur la Figure 15, avec comme paramètres géométriques (CD, SWA, h, t_{BARC}), cette structure est très largement utilisée dans l'industrie microélectronique pour représenter des profils de ligne avec pente [68, 45]. Le bruit de notre ellipsomètre est considéré comme dépendant de la longueur d'onde et il est égal au bruit présenté précédemment (cf. Figure 12.).



Les caractéristiques des réseaux sont :

$$CD=45nm$$

$$h=130nm$$

$$SWA=88^\circ$$

$$T_{BARC}=82nm$$

Figure 15 : Schéma de profil de ligne trapézoïdale

II.3 Corrélation entre les paramètres

Etudier la corrélation entre deux ou plusieurs paramètres, c'est étudier l'importance de la liaison qui existe entre ces variables. Dans notre cas, la corrélation est obtenue par le calcul de la matrice de covariance des paramètres de sortie. Les éléments de la matrice de corrélation sont donnés par la relation suivante :

$$\rho_{ij} = \frac{C_{ij}}{\sqrt{C_{ii}}\sqrt{C_{jj}}} \quad 38$$

Ce coefficient exprime la liaison qui existe entre les variables considérées. Il peut prendre des valeurs dans l'intervalle $[-1, +1]$. Si le coefficient de corrélation est nul, alors les variables sont considérées comme entièrement décorrélées. A l'inverse, si la valeur du coefficient de corrélation s'approche des valeurs extrêmes $+1$ et -1 , la corrélation entre les variables est entière. Les valeurs intermédiaires renseignent sur le degré de dépendance linéaire entre les deux variables considérées.

Nous allons étudier la corrélation des différents paramètres du profil de ligne. Il s'agit du CD (la largeur à mi-hauteur du motif), de la hauteur (h), de la pente du profil (SWA), et la hauteur du BARC (t_{BARC}). Cette corrélation est estimée par utilisation de la relation (38).

Le Tableau 2 illustre la corrélation entre les différents paramètres de sortie du modèle. On constate une forte corrélation entre plusieurs paramètres. Par exemple, entre l'épaisseur du BARC et la hauteur du motif ainsi que la pente du profil, avec une corrélation de l'ordre de 0.99 et 0.95 respectivement, et entre la hauteur du motif et la pente du profil avec une corrélation de l'ordre de 0.97.

Leray et al [68] ont montré que pour ce type de structure, la forte corrélation entre l'épaisseur du BARC et la pente ainsi que la hauteur du profil de ligne rendent la mesure de la pente difficile. Cependant, considérer l'épaisseur du BARC fixe dans le modèle permet de s'affranchir de cette contrainte. De ce fait, la corrélation entre les différents paramètres diminue, ce qui permet de mesurer la pente avec une précision plus grande.

	CD	SWA	H	t_{BARC}
CD	1	0.53	-0.51	0.42
SWA	0.53	1	-0.97	0.95
H	-0.51	-0.97	1	-0.99
t_{BARC}	0.42	0.95	-0.99	1

Tableau 2 : Corrélation entre les différents paramètres de sortie du modèle (CD, h , SWA, t_{BARC}) les valeurs nominales choisies sont : $CD=45\text{nm}$, $h=130\text{nm}$, $SWA=88^\circ$ et $t_{\text{BARC}}=82\text{nm}$. L'angle d'incidence de notre ellipsomètre est fixé à $72, 32^\circ$. Le nombre de points retenus par spectre est de 110 ($250 < \lambda < 800$ par pas de 5nm)

Considérons maintenant le cas où l'épaisseur du BARC est considérée comme fixe dans le modèle. La valeur de l'épaisseur du BARC peut être mesurée par ellipsomètre spectroscopique sur une plaque témoin avant le couchage de la résine photosensible.

	CD	SWA	H
CD	1	0.3	-0.75
SWA	0.3	1	-0.81
H	-0.75	-0.81	1

Tableau 3 La corrélation entre les différentes paramètres de sortie du modèle (CD, h et SWA), les valeurs nominales choisie sont : $CD=45\text{nm}$, $h=130\text{nm}$, $SWA=88^\circ$ et $t_{\text{BARC}}=82\text{nm}$. L'angle d'incidence de notre ellipsomètre est fixé à $72, 35^\circ$. Le nombre de point retenu par spectre est de 110 ($250 < \lambda < 800$ par pas de 5nm)

Le Tableau 3 montre la corrélation des différents paramètres géométriques de sortie du modèle, lorsque l'épaisseur du BARC a été fixée à 82 nm. On remarque d'une part que la corrélation entre la pente SWA et la hauteur a diminué de 0,16 par rapport au cas où l'épaisseur du BARC a été ajustée dans le modèle. La corrélation entre les deux paramètres passe de 0,97 à 0,81. D'autre part, la corrélation entre le CD et la pente diminue de 0,23, elle passe de 0,53 à 0,3. Considérer l'épaisseur du BARC comme fixe dans le modèle rend ce paramètre mieux décorrélié des autres. Ce qui permet d'éliminer l'impact de ce paramètre sur les autres.

Dans la suite on considère que l'épaisseur du BARC est fixée à 82 nm, et que les paramètres de sortie de notre modèle sont le CD, la hauteur et la pente de la ligne (SWA).

II.4 Méthode d'évaluation des incertitudes de mesure

Le mot incertitude est associé à une mesure, elle représente le doute qu'on a sur la validité d'un résultat. Ces dernières années, différents auteurs ont cherché à estimer de manière rigoureuse les incertitudes de mesure. Ces études ont fait l'objet de plusieurs

publications [36, 37, 70, 84, 14, 76]. Dans cette partie nous présenterons différentes méthodes utilisées pour estimer les incertitudes de mesure.

Le calcul d'incertitude de mesure permet d'évaluer les erreurs commises sur les différents paramètres de la structure qu'on cherche à mesurer. Elle dépend d'une part de la précision de l'outil métrologique utilisée pour la mesure de spectre de diffraction et d'autre part, du choix du modèle pour représenter la structure réelle.

L'incertitude de mesure sur les paramètres de sortie liée à l'instrument de mesure dépend du bruit de l'instrument. Ce dernier engendre une incertitude sur les spectres de diffraction. Dans le cas où on suppose qu'on a un modèle parfait, les incertitudes sur le spectre de diffraction engendrent une incertitude de mesure sur les paramètres de sortie. Cette dernière est estimée par le calcul de la matrice de covariance sur les paramètres de sortie [84]. Ce type d'incertitude est appelée incertitude de type A et elle est donnée par :

$$u_a(p_i) = \sqrt{C_{ii}} \quad 39$$

Où $u_a(p_i)$ est l'incertitude de type A sur un paramètre de sortie du profil

Les incertitudes liées au modèle sont la cause d'une déviation des valeurs d'entrée d'un modèle par rapport à leur valeur nominale, où d'un mauvais ajustement des grandeurs de sortie du modèle. Ce type d'incertitude est appelé incertitude de type B. Elles englobent plusieurs sources:

- Des incertitudes liées à l'équipement utilisé, en particulier celles liées aux éléments mécaniques, la plupart du temps ces incertitudes sont données par le constructeur. A titre d'exemple, dans notre cas l'incertitude sur l'angle de l'ellipsomètre spectroscopique utilisé dans cette thèse est estimée à 0.01° (donnée fabricant).
- Des incertitudes attribuées à des valeurs nominales dans le modèle, c'est-à-dire aux valeurs constantes. Par exemple :
 - Les incertitudes sur la période qui est considérée constante dans le modèle.
 - Les incertitudes sur les indices optiques qui sont considérés comme constants dans le modèle simulé, alors que ces valeurs sont mesurées avec une marge d'incertitude.

Ainsi pour une estimation des incertitudes de type B, toutes les informations disponibles à propos des variabilités possibles des paramètres considérés comme constants dans le modèle doivent être prises en considération.

Dans la suite nous allons présenter les deux principales méthodes utilisées pour estimer les incertitudes de type B : la **méthode de Monte Carlo** et la méthode des covariances appelée également **méthode de propagation des variances**.

II.4.1 Méthode de Monte Carlo

La méthode de Monte Carlo est largement utilisée pour évaluer les incertitudes de mesure de type A [90], mais aussi les incertitudes de mesure de type B. Le principe de cette méthode consiste à propager des incertitudes dans les paramètres d'entrée du modèle et de voir l'impact de cette variation sur les paramètres de sortie.

Cette méthode permet d'introduire une approche statistique de l'estimation de l'incertitude de mesure. Elle consiste à isoler les paramètres d'entrée des paramètres de sortie, et à leur affecter une distribution d'erreur (normale, rectangulaire, gaussienne, etc.). L'idée est de produire un échantillon (q_1, \dots, q_M) du paramètre d'entrée q , et de calculer l'échantillon (p_1, \dots, p_M) du paramètre de sortie p . avec M le nombre de tirages aléatoires. On obtient ainsi les distributions P_i sur les paramètres de sortie p_i due à la distribution d'erreur sur les paramètres d'entrée. A partir de cette distribution, on en déduit l'incertitude en calculant sa variance, voire l'intervalle de confiance à 3σ .

Cette méthode requiert un très grand nombre de réalisations, ce qui la rend très coûteuse en temps de calcul. Ce sera encore plus pénalisant dans le cas de réseaux bi périodiques.

II.4.2 Méthode de propagation des variances

L'estimation des incertitudes de type B par utilisation de la méthode de propagation des variances a été mise en place par Al Assaad et al. [14] et Germer et al. [84]. Cette méthode à l'avantage d'être rapide et plus facile à mettre en œuvre que la méthode de Monte Carlo. C'est une méthode qui ne requiert pas un grand nombre de tirages. Une comparaison entre la méthode de Monte Carlo et la méthode de propagation des variances a été réalisée par Gross et al [36]. Il a été constaté que les deux méthodes donnaient des résultats similaires. Nous utilisons cette approche, pour estimer les incertitudes de type B sur les paramètres de sortie quel que soit le type d'incertitude sur les variables d'entrée dans le modèle.

Considérons une erreur sur les paramètres d'entrée du modèle, cette erreur conduit à avoir des erreurs sur les paramètres de sortie :

$$\delta_b(p) = -J^+ K \Delta q \quad 40$$

Avec $\delta_b^k(p_i)$ l'incertitude sur le paramètre p_i , due à une incertitude sur le paramètre q_k .

K est la matrice jacobienne des paramètres d'entrée définie par :

$$K_{ik} = \left(\frac{1}{\sigma_i} \frac{\partial g_i}{\partial q_k} \right) \quad 41$$

La matrice K est l'équivalent dans l'espace des paramètres d'entrée de ce qu'est la matrice J dans l'espace des paramètres de sortie.

La matrice pseudo inverse J^+ de la matrice jacobienne des paramètres de sortie J est donnée par :

$$J^+ = (J^t J)^{-1} J^t \quad 42$$

Enfin Δq est l'erreur sur les paramètres fixes dans le modèle. La matrice de variance-covariance résultant des erreurs systématiques dans le système est donnée par :

$$C_b(p) = \delta_b(p) \delta_b(p)^t = J^+ K \sigma^2(q) K^t (J^+)^t \quad 43$$

Avec $\sigma^2(q) = \Delta q \Delta q^t$ la matrice de variance-covariance des paramètres fixes.

Finalement l'incertitude type B sur le paramètre p_i est l'élément de la diagonal de la matrice $C_b(p)$ et elle est donnée par la relation suivante :

$$u_b(p_i) = \sqrt{C_b(p)_{ii}} \quad 44$$

Nous avons donc ainsi les incertitudes de type B sur nos paramètres de sortie.

II.4.3 Incertitude élargie

La plupart du temps, l'incertitude composée $u_c(p)$ est obtenue en combinant toutes les sources d'incertitudes [2, 7], de type A comme de type B, ainsi la matrice variance-covariance résultante est donnée par :

$$C_c(p) = C(p) + C_b(p) \quad 45$$

Ainsi l'incertitude composée sur $i^{\text{ème}}$ paramètre est donnée par :

$$u_c(p_i) = \sqrt{C_{cii}} \quad 46$$

Bien que l'incertitude composée $u_c(p)$ représente l'incertitude d'un résultat. Il est pratiquement toujours nécessaire, pour certaines applications commerciales, réglementaires, ou dans l'industrie de la microélectronique, de donner la valeur de l'incertitude élargie notée U et définie par :

$$U = k u_c(p) \quad 47$$

Avec k le facteur d'élargissement, souvent choisi pour être égal à 1, 2 ou 3 selon l'intervalle de confiance désiré sur les paramètres de sortie du modèle.

Il est alors commode d'exprimer le résultat d'une mesure sous la forme de $P_i = p_i \pm U_i$, p_i est le résultat obtenu par la minimisation de la fonction de coût.

II.5 Sources d'incertitude : étude de cas

Considérons le cas simple de la structure illustrée sur la Figure 15 qui comprend une ligne de résine photosensible et du BARC. La hauteur du BARC sera considérée constante dans le modèle.

II.5.1 Incertitudes de type A

Nous avons estimé les incertitudes de mesure de type A sur les paramètres du profil de ligne illustré par la Figure 15. Ces dernières sont données par les éléments de la diagonale de la matrice de covariance sur les paramètres p (cf. équation (39)).

Le Tableau 4 illustre les incertitudes de mesure de type A sur les paramètres du profil. On constate que celles-ci sont très faibles avec une incertitude de l'ordre de 0.025nm sur le CD, de 0.04nm sur la hauteur et de 0.045° sur la pente.

Les incertitudes liées au bruit de l'instrument sont négligeables. Germer et al. [84] ont constaté que généralement, ce qui dégrade la précision de la mesure ce n'est pas le bruit de mesure, mais plutôt le choix du modèle. Il est donc primordial de choisir un profil de structure qui représente au mieux le profil réel. Toutes les variations possibles du profil doivent être incluses dans le modèle, en particulier les paramètres constants dans le modèle doivent être

connus avec précision. Une faible erreur sur ces paramètres sera source d'incertitude sur les paramètres de sortie du profil. Dans la suite nous allons évaluer toutes les sources potentielles d'incertitude de mesure type B. Cette évaluation est faite par l'utilisation de la méthode de propagation de variance.

	CD (nm)	H (nm)	SWA(°)
Incertitude type A	0.025	0.04	0.045

Tableau 4 : incertitude de mesure type A sur les paramètres sortie du modèle pour différentes valeurs de bruit définies ci-dessus (cf. équation (39))

II.5.2 Incertitude de type B : Influence de la période

Dans le cas de notre structure, plusieurs hypothèses qui ont été faites peuvent être une source d'incertitude sur les paramètres de sortie du motif. Par exemple la période est considérée constante dans le modèle. Quel serait l'impact d'une variation de la période sur le résultat des paramètres de sortie du modèle ?

En règle générale la période est considérée comme constante dans le modèle. Les procédés de fabrication en microélectronique, en particulier, en lithographie sont suffisamment sophistiqués pour contrôler ce paramètre de manière très précise. Jourlin et al. [92] estime que dans le cas d'une structure périodique de $1\mu\text{m}$, la période peut subir une légère déviation de sa valeur nominale de 20pm.

Il est intéressant de quantifier l'impact d'une faible variation de la période sur les paramètres de sortie du modèle. Nous allons considérer que notre période peut avoir une légère déviation de sa valeur nominale de 20pm. Les incertitudes de mesure sur les paramètres de sortie du modèle sont représentées sur le Tableau 5.

Paramètres	ΔCD (nm)	Δh (nm)	ΔSWA (°)
$\Delta\Lambda=20$ (pm)	0.021	-0.016	0.01

Tableau 5 : Incertitude sur les paramètres géométriques due à une incertitude de 0.1 nm sur la période

On constate que l'erreur sur les paramètres géométriques est de l'ordre de bruit de mesure. Un écart de 20pm sur la période (variation relative de 0.022%) produit une erreur de l'ordre de 0.021nm sur le CD (une variation relative de 0.046%). Le même écart conduit respectivement à une incertitude de mesure de $0,01^\circ$ et de 0.016nm sur la pente et la hauteur du profil. Les incertitudes sur les différents paramètres sont de l'ordre de l'incertitude de type A causées par le bruit de mesure, l'influence de la fluctuation de période peut être considéré comme négligeable.

II.5.3 Incertitude de type B : Indice optique des matériaux

Les indices optiques sont déterminés par ellipsométrie en utilisant généralement une loi de dispersion et la résolution d'un problème inverse. Les problématiques sont alors les mêmes qu'en scatterométrie (incertitude type A, incertitude de modèle, corrélation des

paramètres, etc.). Les indices optiques sont mesurés avec une incertitude sur l'indice de réfraction et sur le coefficient d'extinction.

La modélisation des signatures scatterométriques utilise un code électromagnétique qui prend en compte les indices optiques des matériaux utilisés. Nous allons propager des incertitudes de mesure sur les indices optiques et nous allons estimer l'impact de ces incertitudes sur les paramètres de sortie.

Les indices optiques du substrat de silicium sont tabulés. Nous supposons que l'indice est connu avec une précision suffisante pour qu'il ne propage pas d'erreur sur les paramètres géométriques recherchés.

Dans le cas de la résine photosensible et du BARC nous n'avons pas assez d'information sur ces matériaux. On peut supposer que les indices de ces matériaux peuvent subir une légère modification de la valeur nominale. Hazart et al [38] estiment que l'erreur absolue commise lors de la détermination de l'indice optique est de l'ordre de 0.005 sur l'indice de réfraction et de 0.01 sur le coefficient d'extinction. On peut supposer que l'indice de la résine est donné par :

$$N(x, y, \lambda) = (1 + x)n_1(\lambda) + (1 + y)k_1(\lambda) \quad 48$$

$n_1(\lambda)$ et $k_1(\lambda)$ représentent l'indice de réfraction et coefficient d'extinction du matériau déterminé par la technique d'ellipsométrie (cf. *annexe*). Les grandeurs x et y varient entre 0 et respectivement 0,005 et 0,01.

	ΔCD (nm)	Δh (nm)	ΔSWA (°)
Indice de réfraction (u (n)=0.005)	0.65	-0.29	0.44
Coefficient d'extinction (u (k)=0,01)	-0,007	0,076	-0,12

Tableau 6 L'incertitude de mesure sur les paramètres géométrique due à une incertitude de 0,005 sur l'indice de réfraction et de 0,01 sur le coefficient d'extinction de la résine 193nm.

Le Tableau 6 montre l'erreur commise sur les paramètres géométriques de sortie, pour une erreur de 0.005 sur l'indice de réfraction de la résine 193nm. On constate que pour une faible variation d'indice, l'incertitude de mesure de type B sur les paramètres géométriques est non négligeable devant l'incertitude liée au bruit de mesure (respectivement de l'ordre de 22 fois l'incertitude de mesure liée au bruit de mesure pour CD, et 7 fois pour la hauteur et la pente). Cela montre qu'il faut tenir compte ce type d'incertitude lors de l'estimation de l'incertitude totale de mesure.

On constate qu'une variation absolue de 0,01 du coefficient d'extinction de la résine photosensible induit une incertitude de mesure très faible sur les paramètres de sortie avec un impact plus important sur la pente (de l'ordre de 0.14% pour une variation de coefficient d'extinction de 0.01). Cela s'explique par le fait que le coefficient d'extinction de la résine 193nm est très faible et il est même nul sur une grande gamme spectrale.

Le Tableau 7 montre les incertitudes de mesure de type B sur les paramètres géométriques due à une incertitude sur le coefficient d'extinction et sur l'indice de réfraction du BARC. On constate que pour une faible variation de l'indice de réfraction du BARC, l'incertitude de mesure de type B sur les paramètres géométrique est non négligeable. Elle est

respectivement de l'ordre de 0,41 nm sur le CD, de 0,22nm sur la hauteur et de 0,2 (°) sur la pente du profil (SWA). On remarque aussi que l'incertitude de mesure de type B sur les paramètres géométriques due à l'incertitude sur le coefficient d'extinction est négligeable de l'ordre de bruit de mesure. On remarque également que l'impact d'une faible erreur de l'indice optique du BARC sur les paramètres géométriques est moins important que l'impact d'une erreur de l'indice de la résine 193nm sur les paramètres géométriques (cf. Tableau 6 et Tableau 7).

	ΔCD (nm)	Δh (nm)	ΔSWA (°)
Indice de réfraction ($u(x)=0.005$)	0.41	-0.22	0.2
Coefficient d'extinction ($u(y)=0,01$)	-0,05	-0,03	0,07

Tableau 7 L'incertitude de mesure sur les paramètres géométrique due à une incertitude de 0,005 sur l'indice de réfraction et de 0,01 sur le coefficient d'extinction du BARC

Cette étude montre qu'une mesure d'indice précise est nécessaire pour avoir des résultats scatterométriques fiables.

Toutefois d'autres problèmes liés aux changements d'indices peuvent exister en particulier dans le cas de structures complexes. Pour ce type de structure SEMATECH souligne dans son rapport de 2008 [11] une limitation de la technique de scatterométrie. Cette limitation est principalement due aux modifications des matériaux aux interfaces. Les indices optiques des matériaux aux interfaces peuvent être différents de ceux mesurés en pleine plaque par ellipsométrie, notamment, du fait des traitements qui leurs sont. SEMATECH propose de mesurer les indices optiques des matériaux par ellipsométrie spectroscopique sur des empilements de couche, afin de tenir compte des modifications aux interfaces ([11], p.50). Toutefois, cette mesure est difficile à réaliser du fait de la complexité du modèle et de la corrélation qui peut exister entre les épaisseurs des différentes couches.

Les études effectuées au NIST (National Institute of Standards and Technology) [84, 83] arrive à la même conclusion et montrent que la principale source d'incertitude en scatterométrie pour les structures de petites tailles reste les incertitudes sur les propriétés optiques des matériaux. Elles ont montré que dans le cas d'une structure 45/120nm (CD/période) les incertitudes sur les propriétés optiques contribuent à 0,5nm de l'incertitude totale sur le CD qui est 1.49 nm, ce qui correspond à une contribution de l'ordre de 33% de l'incertitude totale.

II.5.4 Incertitudes de type B : Incertitude de l'instrument

II.5.4.1 Angle d'incidence

En pratique la position des différents éléments constituant le dispositif de métrologie optique est connu avec une certaine précision. Elle est en général donnée par le constructeur. Rappelons que dans notre cas nous utilisons un ellipsomètre spectroscopique UVISEL présenté précédemment (cf. chapitre I). L'angle d'incidence nominal est de 72.32°. Pour cet équipement le fabricant estime que l'incertitude sur l'angle d'incidence est de l'ordre de 0.01°. Dans ce paragraphe nous allons étudier l'influence de l'angle d'incidence lorsque sa

valeur est légèrement biaisée de 0.01° de sa valeur théorique. Le réseau de diffraction étudié est celui décrit par la Figure 15. L'impact d'une légère incertitude de l'angle d'incidence sur les paramètres est reporté dans Tableau 8.

	ΔCD (nm)	Δh (nm)	ΔSWA ($^\circ$)
$\Delta\theta=0.01^\circ$	0.0183	-0.054	0.085

Tableau 8 : écart des paramètres par rapport à leurs valeurs initial pour un $\Delta\theta=0.01^\circ$

On remarque que l'écart entre les valeurs calculées des paramètres et leurs valeurs initiales reste négligeable de l'ordre du bruit de mesure. Ainsi une incertitude de 0.01° sur l'angle conduit à une incertitude de 0.01nm sur le CD. La même incertitude sur l'angle conduit respectivement à une incertitude de $0,05^\circ$ et 0.08 nm sur la pente et la hauteur du profil. Cette incertitude peut être considéré comme négligeable lors de l'estimation de la l'incertitude élargie.

II.5.4.2. Longueur d'onde

Dans cette étude, nous utilisons une gamme de longueurs d'onde comprise entre 250nm et 800nm. Une faible incertitude sur la longueur d'onde aura principalement pour effet de transférer cette incertitude dans la structure mesurée via les indices optiques des matériaux. Cette incertitude est d'autant plus importante que la dispersion d'indice est grande. Pour notre instrument de métrologie, le fabriquant estime que l'incertitude sur la longueur d'onde est de l'ordre de 0.3nm.

Dans cette partie, nous cherchons à évaluer l'influence d'une faible variation de la longueur d'onde sur nos paramètres géométriques, cette translation est modélisée par une variation uniforme de la longueur d'onde.

	ΔCD (nm)	ΔSWA ($^\circ$)	Δh (nm)
$\Delta\lambda=0.3\text{nm}$	0.12	0.014	-0.35

Tableau 9: incertitude sur les paramètres géométrique due à une incertitude de 0.3 sur la longueur d'onde

Le Tableau 9 montre l'incertitude sur les paramètres lorsque la longueur d'onde dévie légèrement de sa valeur réelle de 0.3nm. On remarque que l'incertitude sur la hauteur de ligne est notable de l'ordre de 0.35nm, alors que l'incertitude sur le CD est moins importante de l'ordre de 0.12nm. L'incertitude sur la pente est négligeable de l'ordre du bruit de mesure.

II.5.5 Incertitude de type B : Simulation électromagnétique

Comme nous l'avons décrit dans le *chapitre I*, la mesure scatterométrique s'appuie sur l'utilisation d'un code électromagnétique fondé dans notre cas sur la méthode MMFE. Cette méthode, bien qu'appelée « méthode rigoureuse » présente des approximations. Par exemple la sommation infinie permettant d'obtenir une représentation exacte des champs et nécessairement tronquée en pratique. Dans cette partie nous allons étudier les erreurs sur les

paramètres géométriques en fonction du nombre d'harmoniques retenues. Le nombre d'harmonique est fixe dans notre modèle, en général $M = 15$.

Pour estimer l'impact du nombre d'harmoniques retenues sur le résultat scatterométrique, nous comparons les résultats obtenus pour un nombre d'harmonique $M = 15$ à ceux obtenus pour différentes valeurs de M comprises entre 5 et 30.

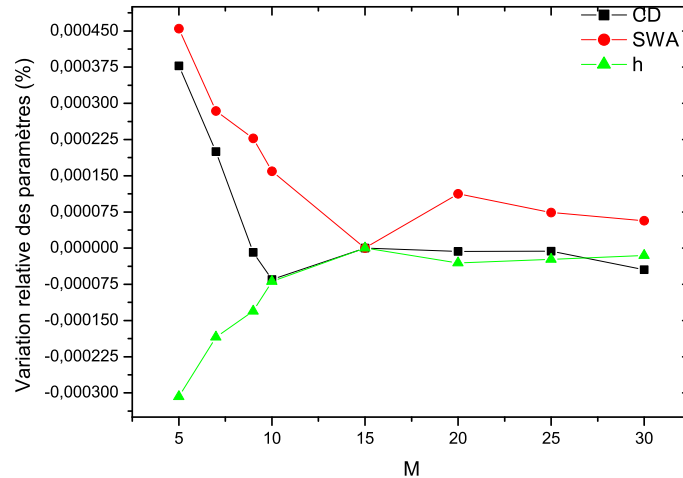


Figure 16 : Erreurs relatives estimées sur les paramètres géométriques CD, SWA, h en fonction de nombre d'harmoniques M

La Figure 16 illustre l'écart entre les valeurs attendues (SWA=88° CD=45nm, h=130nm) et celle obtenues pour différents valeurs de M . On constate que pour ce type de structure l'erreur introduite dans le modèle par la troncature est très faible. Cela revient à ne pas en tenir compte des erreurs de calcul dans la fonction de coût comme le font la plupart des équipementiers. Dans notre cas $M=5$ est suffisant pour que l'incertitude de simulation dû au nombre d'harmonique soit considérée négligeable.

Parmi les autres approximations faites dans la méthode MMFE, nous pouvons citer le faite qu'une structure non verticale (exemple d'un trapèze) doit être découpée en plusieurs tranches dites élémentaires. La Figure 17 montre la structure modélisée dans le cas d'une structure trapèze. Le découpage doit être le plus fin possible, pour reproduire au mieux la structure réelle.

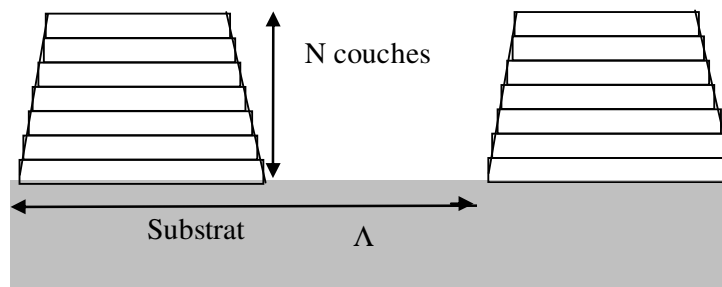


Figure 17 : Représentation d'un profil avec pente par un ensemble de couche verticale

Dans notre cas la couche résine photosensible avec pente (Figure 17) est découpée en 20 couches d'épaisseurs égales. Pour estimer les effets de la précision de la simulation sur la

mesure, nous allons comparer le résultat obtenu en divisant la couche de la résine photosensible en 10 couches d'épaisseurs égales, à celui obtenu pour 20 couches.

	CD (nm)	SWA(°)	h (nm)
Incertitude de mesure : Nombre de couche	0.002	-0.005	-0.004

Tableau 10 : Variation des paramètres géométrique extraits dans le cas où le nombre de couche est égale à 10 au lieu de 20

Le Tableau 10 présente les variations sur les paramètres extraits, dans le cas où on considère 10 couches au lieu de 20 considérées initialement dans le modèle. On constate que 10 couches sont suffisantes pour représenter la résine photosensible avec pente. L'erreur commise sur les paramètres est très faible de l'ordre de 0,002nm sur le CD, de 0,005 sur la pente SWA et de 0,004 sur la hauteur.

II.6 Bilan

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à l'étude des incertitudes de mesures pour un nœud de technologie 45nm. Nous avons étudié les principales sources d'incertitudes qui peuvent limiter la précision de mesure. L'incertitude résultante est reportée dans le Tableau 11.

	CD (nm)	SWA (°)	h(nm)
<u>Incertitude type A</u>			
Bruit de l'équipement	0.025	0.045	0.04
<u>Incertitude type B</u>			
Période (0.1nm)	0.0021	-0.01	0.0016
Indice de réfraction de la résine (0,005)	0.65	-0.29	0.44
Coefficient d'extinction de la résine (0,01)	-0,007	-0,12	0,076
Indice de réfraction du BARC (0,005)	0,41	0,2	-0,22
Coefficient d'extinction du BARC (0,01)	-0,05	0,07	-0,03
$\Delta\theta=0.01^\circ$	0.01	-0.05	0.08
$\Delta\lambda=0.3\text{nm}$	0.12	0.01	-0.35

Ordre de troncature (M=5)	0.000016	0.00004	0.000039
Nombre de couche (N=10)	0.002	-0.005	-0.004
Incertitude totale	0.78	0.37	0.62
Incertitude élargie 3σ	2,34	1,11	1,86

Tableau 11 : Incertitude totale de mesure déterminé par la méthode développée dans ce chapitre

On remarque que ces sources d'incertitudes peuvent contribuer à des incertitudes sur le CD de l'ordre de 2,34nm (erreur relative de 5,2%). Ces incertitudes sont dominées par les incertitudes sur l'indice optique des matériaux et l'incertitude sur la longueur d'onde très loin devant les autres sources. Par exemple l'incertitude sur l'indice optique des matériaux contribue à 87% de l'incertitude totale de mesure sur la hauteur. D'où l'importance de mesurer avec précision les indices de matériaux pour une bonne précision de mesure.

Dans la suite de cette thèse, l'intervalle de confiance sur les paramètres géométriques sera estimé en utilisant la relation suivante :

$$\Delta p_i = k \sqrt{C_{ii} \chi^2}$$

Cette relation dépend de la matrice covariance sur les paramètres, de la qualité d'ajustement entre la signature expérimentale et la signature modélisée χ^2 (cf. chapitre I) et de la probabilité de confiance choisie (3σ par exemple). Cette hypothèse malgré que ne soit pas totalement juste, elle est largement utilisée pour estimer les incertitudes de mesure sur les paramètres.

II.7 Conclusion

L'étude sur l'incertitude de mesure nous a permis de mettre en œuvre un outil d'estimation des incertitudes élargies appelée également incertitudes totales de mesure TMU. Nous avons présenté les éléments mathématiques qui permettent d'estimer ces incertitudes, la sensibilité et la corrélation de différents paramètres d'une structure.

L'étude de la sensibilité permet d'identifier les paramètres du profil les mieux adaptés pour représenter la structure.

L'étude de corrélation, nous a permis de constater la forte corrélation entre plusieurs paramètres du modèle. En particulier, la forte corrélation entre la pente du motif SWA et les autres paramètres rendent difficile la mesure de ce paramètre avec une bonne précision. Sachant qu'une mauvaise estimation de la pente du profil SWA induira une mauvaise estimation de CD_{top} et CD_{Bottom} (CD en haut et en bas de la ligne).

Dans le futur, nous envisageons d'utiliser des outils développés durant cette thèse afin d'étudier des structures plus complexes.

III : Contrôle en temps réel de la gravure plasma

Le contrôle de la dimension critique (CD) des composants est un point clé pour fabriquer des dispositifs performants. Les techniques de métrologie classiques, telles que le CD AFM (de l'anglais Atomique Force Microscope) et le CD SEM (de l'anglais Scanning Electron Microscope) sont les techniques les plus utilisées dans l'industrie de la microélectronique. Elles permettent la mesure du CD avec une précision nanométrique. Toutefois ces techniques sont coûteuses en temps, destructives et ne sont pas adaptées pour le contrôle *in situ* et en temps réel.

La scatterométrie, est une technique non destructive, parfaitement adaptée aux mesures *in situ*. Elle est depuis quelques années très largement utilisée dans le milieu industriel, pour des mesures métrologiques statiques avant et après une étape de fabrication. Cette technique est jugée parmi les plus prometteuses pour le contrôle en temps réel des procédés de fabrication.

Dans ce chapitre, nous allons étudier la capacité de la scatterométrie à suivre en temps réel un procédé de réduction de cote résine. Ce procédé est très largement utilisé dans l'industrie de la microélectronique. Il consiste à éroder latéralement et verticalement les motifs par gravure plasma. Il permet d'atteindre des tailles de motifs non réalisables par les étapes de lithographie. Deux types de résine sont étudiés : une résine utilisée pour une insolation à la longueur d'onde 248nm et une résine à 193nm.

III.1 Les étapes de fabrication en industrie microélectronique

III.1.1 La lithographie

L'augmentation continue de la densité d'intégration des composants en microélectronique exigée par le milieu industriel est essentiellement régie par les étapes de fabrication, en particulier, par l'étape de lithographie. Il existe différentes techniques de lithographie. Nous allons présenter ici celles qui sont principalement utilisées dans l'industrie microélectronique.

III.1.1.1. Lithographie optique

La lithographie optique est le facteur clef pour réduire la taille de motif. Elle bénéficie de nombreux travaux de recherche apparus ces dernières années. Elle consiste à déposer une couche de polymère photosensible (résine) sur la plaque. Cette résine est formée d'une matrice transparente à la longueur d'onde d'exposition et contient des composés photosensibles. Quand l'image des motifs présents sur un masque est projetée sur la résine par insolation, les zones insolées sont le lieu d'un processus photochimique qui va soit favoriser la dissolution de la résine dans ces zones (cas des résines positives) ou au contraire empêcher cette dissolution (cas des résines négatives). On obtient sur la plaque de silicium, des motifs qui sont l'image du masque à travers un système optique de réduction permettant de réduire la taille du motif d'un facteur en général égal à quatre (cf. Figure 18).

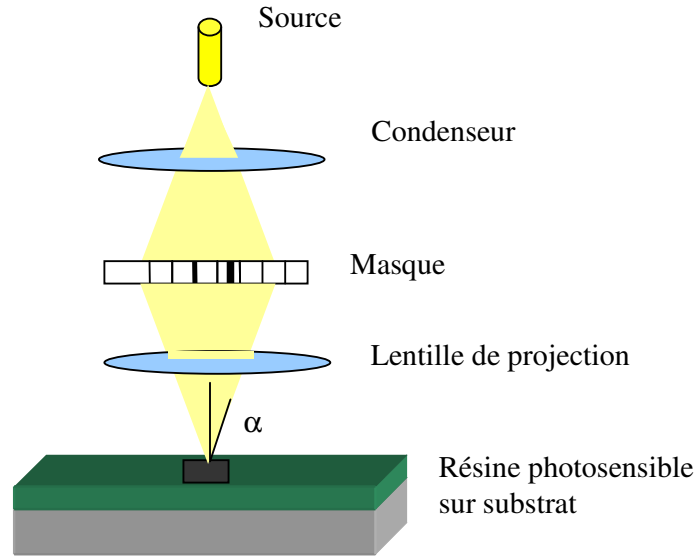


Figure 18 : Principe de la lithographie optique par projection

La résolution offerte par cette technique est donnée par l'équation Rayleigh :

$$R = \frac{k \cdot \lambda}{ON} \quad 49$$

Avec λ la longueur d'onde d'insolation (actuellement dans l'industrie microélectronique on utilise la longueur d'onde 193nm), k un facteur dépendant du procédé technologique utilisé. Sa valeur est comprise entre 0,6 et 0,8. Il permet de considérer la qualité de la résine, les éléments du système optique ainsi que le masque. ON est l'ouverture numérique de l'optique de projection. Elle est définie par l'équation suivante :

$$ON = n \sin(\alpha) \quad 50$$

où α est le demi angle maximum d'ouverture de l'objectif et n est l'indice de réfraction du milieu où se trouve le système optique.

Il existe d'autres variantes de lithographie optique :

La lithographie à immersion [51], permet de pousser la résolution en augmentant l'ouverture numérique par introduction d'un liquide entre le système optique de projection et l'échantillon.

La lithographie en ultraviolet extrême (ou EUV pour le terme anglais Extreme UltraViolet) [19], utilise la longueur d'onde 13,5nm. Malgré un effort énorme depuis quelques années cette technique butte toujours sur des problèmes majeurs de puissance de source et d'infrastructure industrielle permettant de réaliser des masques sans défauts.

III.1.1.2. La lithographie par faisceau d'électron

C'est une technique alternative établie de longue date [41]. Elle utilise un faisceau d'électrons pour balayer la surface de la résine. Les motifs sont formés sur une résine électrosensible. Cette technique ne souffre pas de limitation de longueur d'onde, ce qui la

rend très résolutive. L'absence de masque est un avantage supplémentaire en particulier avec l'augmentation du coût des masques, notamment pour des faibles volumes de production. Cependant, cette technique souffre de quelques défauts, en particulier de la lenteur d'écriture qui ne permet pas d'atteindre des débits élevés pour la production de volume. La rétrodiffusion des électrons secondaires par le substrat vers la résine crée un effet de proximité qui peut conduire à une insolation de zone de résine non souhaitée et ainsi élargir la dimension des motifs réalisés.

III.1.1.3. La lithographie par nano-impression

C'est une technique proche des techniques de fabrication des DVD à partir d'une matrice. Elle permet d'atteindre des résolutions nanométriques [82, 89]. Le principe consiste à dupliquer les motifs contenus sur un moule dans une couche de résine déposée sur un substrat. L'avantage de cette technique est qu'elle n'est pas limitée par la diffraction, la diffusion ou l'interférence du fait qu'elle n'utilise aucun faisceau d'énergie. La qualité des motifs dépend principalement de la qualité de moule utilisé.

Cependant, sa principale limitation réside dans la dégradation du moule ainsi que dans la difficulté à le nettoyer. En plus l'extension de cette technique à des empilements de dizaines de niveaux dans des circuits intégrés, reste à démontrer industriellement, notamment en termes de précision d'alignement et de densité de défaut. Ses domaines d'applications privilégiés sont ceux qui nécessitent à la fois résolution et bas coût à la fabrication.

III.1.2 Gravure par plasma en microélectronique

On appelle plasma, un milieu gazeux ionisé neutre, qui contient des électrons, des ions négatifs et positifs ainsi que des neutres (atomes, molécules, etc.) soumis à des interactions collectives. Depuis les années 70, les plasmas occupent une place très importante dans l'industrie de la microélectronique, car ils sont très largement utilisés dans l'étape gravure. Cette étape permet d'atteindre des dimensions sub microniques. Le procédé dit de « resist trimming » (réduction de cote résine) [85] permet même de s'affranchir des limites de la lithographie. Ce procédé consiste à réduire par gravure plasma la taille des motifs initialement définis par la lithographie puis de transférer ces motifs dans les couches actives des dispositifs (cf. Figure 19).

On peut distinguer trois types de gravure par plasma selon la nature de l'attaque :

- Une attaque dite IBE (Ion Beam Etching) [77, 8], cette attaque est de nature physique. Elle correspond au bombardement des matériaux par les ions du plasma. Lorsque les ions rentrent en contact avec les atomes de la surface des matériaux, ces derniers peuvent gagner assez d'énergie pour quitter la surface de matériau.
- Une attaque dite RIE (Reactive Ion Etching) [35], cette attaque est de nature chimique, elle ne dépend que de l'interaction entre le matériau à graver et les espèces réactives du plasma. Dans ce cas, le faisceau d'ions apporte l'énergie nécessaire au processus pour que la gravure puisse avoir lieu.
- Une attaque dite RIBE (Reactive Ion Beam Etching), cette attaque est de nature physico-chimique. Le bombardement ionique ainsi que la réaction chimique du plasma avec les matériaux conduisent à l'arrachement de la matière.

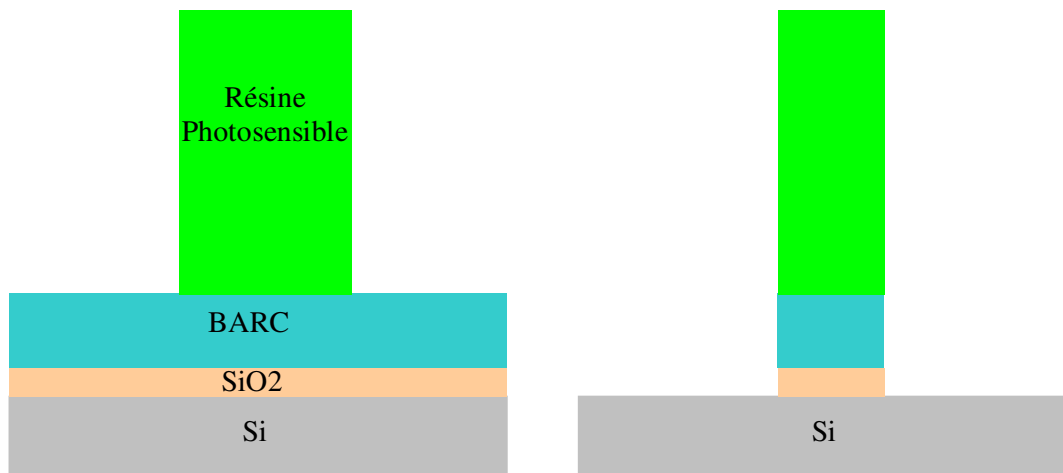


Figure 19: Schéma de principe de transfert par gravure plasma des motifs obtenus par lithographie

Il existe d'autres types de gravure, en particulier la gravure humide, elle consiste à tremper le substrat contenant les structures dans une solution chimique. Les zones non protégées des matériaux à graver subissent une réaction chimique et seront éliminées. L'inconvénient majeur de ce type de gravure est sa nature isotrope. La solution chimique a tendance à agir latéralement ce qui engendre une déformation des flancs du motif (cf. Figure 20)

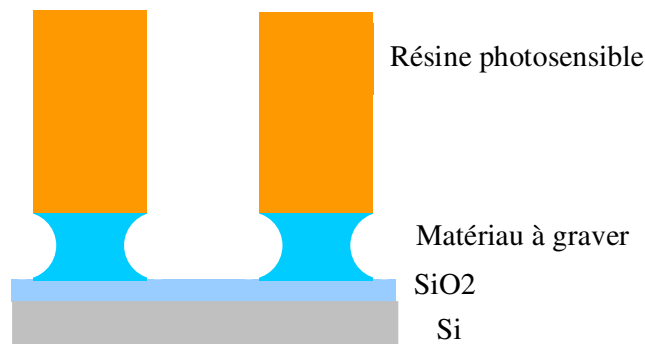


Figure 20: Influence de la gravure humide sur la forme du motif.

Parmi les applications de gravure plasma dans l'industrie, on peut citer la fabrication de structure très dense comme les mémoires DRAM (Dynamic Random Access Memory) et la fabrication des circuits logiques CMOS. Dans tous les cas, l'étape gravure par plasma doit résoudre le même problème à savoir la réduction de la taille du motif et son transfert dans les couches sous-jacentes [69, 81].

III.1.3 Procédés de réduction de cote résine

Afin de contourner les limitations de l'étape de lithographie pour la miniaturisation de la grille des transistors, une étape intermédiaire a été mise au point entre l'étape de lithographie et les étapes de transfert par gravure. Cette étape, appelée réduction de cote résine (resist trimming en anglais), consiste à éroder latéralement et verticalement les motifs

par gravure plasma pour atteindre une taille de motif non réalisable par l'étape de lithographie.

Si cette technique permet de réduire la taille des motifs, elle ne permet pas d'accroître la densité d'intégration. En effet, la réduction de la taille de motif s'accompagne d'une augmentation de l'espace entre ces mêmes motifs, et le pas reste constant. Pour cette raison, ce procédé n'est pas intéressant pour augmenter la densité des mémoires DRAMs [69]. Par contre il est intéressant pour la fabrication de circuits logiques CMOS [85], car il permet de réduire la taille de grille de transistor.

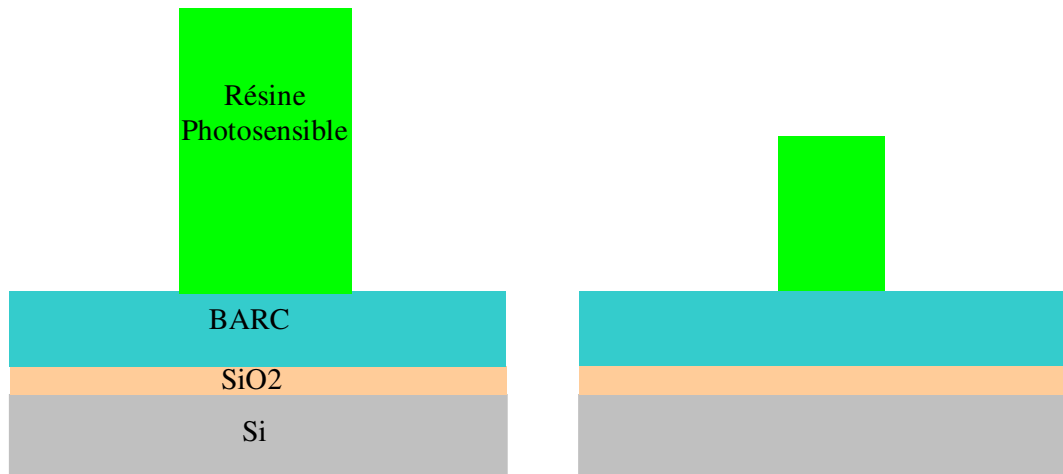


Figure 21 : Etape de réduction de cote résine pour réalisation de motif sub microniques

Durant cette thèse nous avons développé un outil de métrologie optique pour le contrôle en temps réel des étapes de fabrication en microélectronique. Cet outil a pour but de suivre l'évolution du profil des motifs de la structure. Dans la suite, nous allons étudier la capacité de la scatterométrie de suivre en temps réel le profil de ligne de deux types de résine durant le procédé de réduction de cote résine.

III.2 Dispositif expérimental

Les procédés de réduction de cote résine sont réalisés dans un réacteur haute densité qui est le mieux adapté pour réaliser des structures de petites tailles. Nous allons présenter cette chambre de gravure en détail ainsi que l'outil de diagnostic utilisé pour valider nos résultats scatterométriques en temps réel.

III.2.1 La plate-forme de gravure 5200 d'Applied Materials

La plate forme DPS 5200 d'Applied Materials est une plate-forme industrielle [69, 79] modifiée pour recevoir des outils de diagnostic *in situ* ou quasi *in situ* des procédés de gravure. Cette plate forme représentée sur la Figure 22 est constituée:

- de deux sas de chargement permettant de charger jusqu'à 50 plaquettes de silicium de 200mm (25 plaquettes par sas).
 - d'une chambre de transfert, constituée d'un bras robotisé permettant le transfert d'une plaquette d'une chambre à autre. Le vide dans la chambre de chargement et la chambre de transfert est assuré par une pompe primaire.
 - d'une chambre d'orientation du substrat, équipée d'un laser permettant le repérage de l'encoche des tranches de silicium. L'orientation des plaquettes se fait dans cette chambre pour avoir un plan d'incidence normal par rapport à notre réseau test.
 - d'une chambre de gravure DPS (Decoupled Plasma Source), équipée d'une source à couplage inductif.
 - d'un ellipsomètre Jobin-Yvon UVISEL MWL-16 pour les mesures *in situ*.
- Les autres éléments de la plate forme (XPS, les deux autres chambres de gravure DPS+ et EMax, etc.) ne sont pas utilisés dans cette thèse donc ils ne seront pas présentés ici.

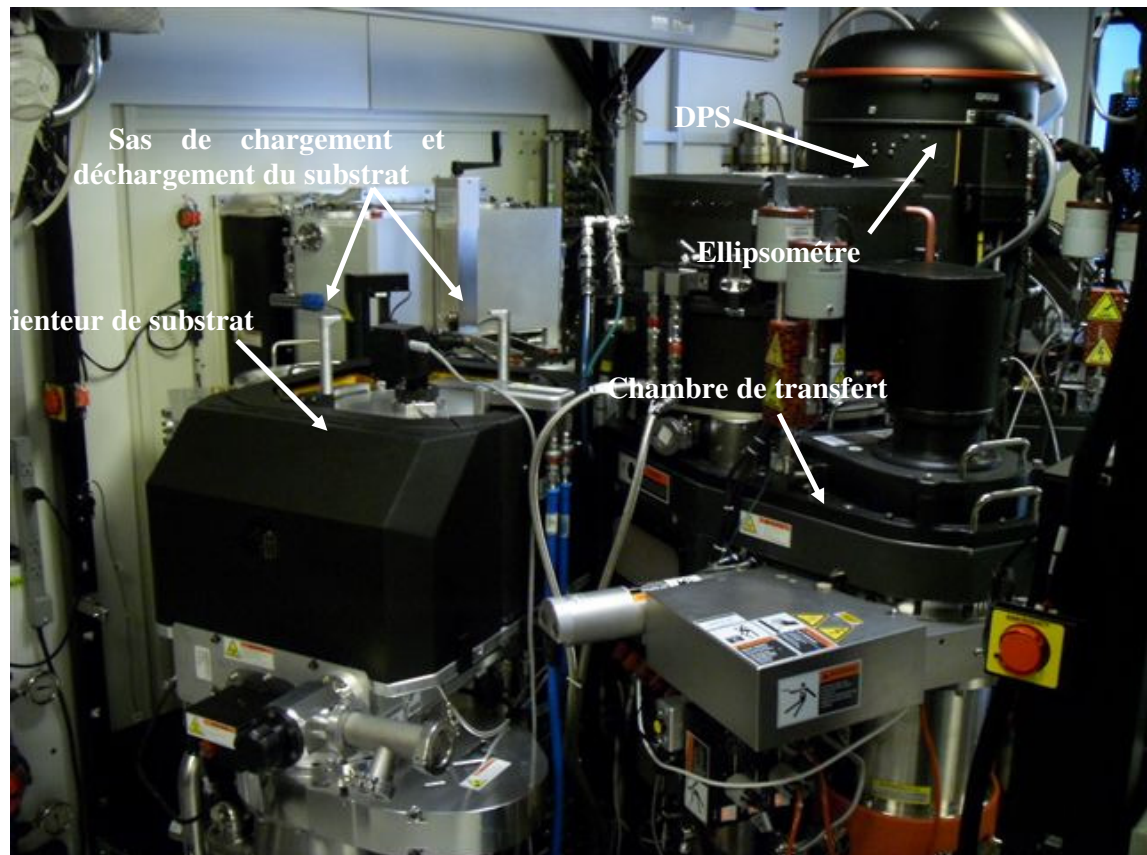


Figure 22: Vue d'ensemble de la plate forme gravure DPS 5200.

III.2.2La chambre de gravure DPS

Le réacteur plasma DPS représenté sur la Figure 23 est un réacteur haute densité ($10^{11} - 10^{12}$ ions cm^{-3}) qui permet de graver des substrats de 200mm de diamètre. Il fait partie des réacteurs dits ICP (Inductif Coupled Plasma) [25, 53]. Il est constitué :

- D'une source à couplage inductif à la fréquence de 12,56 MHz. Le principe de fonctionnement de ce type source est le suivant : une antenne séparée du plasma par une paroi diélectrique est alimentée en puissance radiofréquence (RF) via une boîte d'accord en impédance. Le courant RF circulant dans l'antenne induit un champ électromagnétique dans le plasma, ce qui induit un champ électrique (et par conséquent une densité de courant J) dans ce dernier à la manière d'un transformateur. Ce type de réacteur permet d'obtenir de forte densité à basse pression (1mTorr).
- D'une seconde source à la fréquence de 13,56 MHz, couplée de manière capacitive au substrat et qui permet de contrôler l'énergie des ions bombardant ce dernier. Les deux sources sont de fréquences différentes afin d'éviter tout phénomène d'interférence, car ces deux sources sont physiquement placées à une dizaine de centimètres l'une de l'autre.
- Deux boîtes d'accord automatiques, avec un système d'asservissement permettant de régler l'impédance vue par les deux génératrices radiofréquences du réacteur à 50Ω . Ceci a pour but d'éviter qu'une grande partie de l'énergie radiofréquence ne soit réfléchié plutôt que d'être absorbée par le plasma
- D'un système de pompage, qui assure le vide dans le réacteur. Il est constitué d'une pompe primaire et d'une pompe turbo-moléculaire (2000 l/s). Cette dernière qui fournit un vide secondaire limite de quelques 7.10^{-4} mTorr. La puissance de ces groupes de pompage permet de travailler avec des débits de gaz élevés (environ 200 sccm au total), ce qui augmente la vitesse de gravure tout en maintenant des pressions de travail adaptées à la gravure (quelques mTorr).

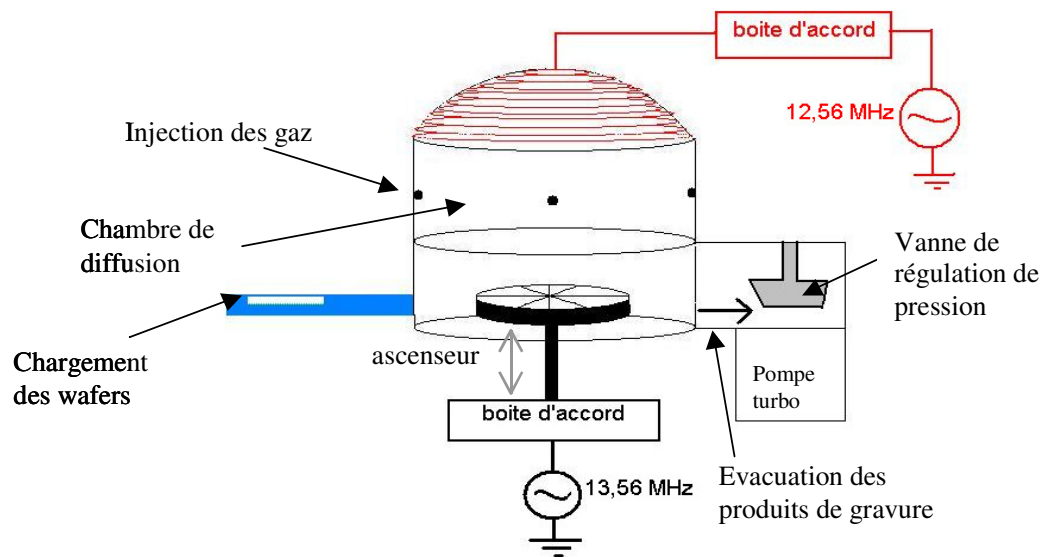


Figure 23: Schéma du réacteur de gravure DPS

III.2.3 La microscopie à force atomique tridimensionnelle (CD AFM)

Après l'étape de fabrication des composants, la dernière étape dans la chaîne de fabrication est l'étape de caractérisation. Il permet de valider la structure réalisée. Le CD AFM est un outil largement utilisé dans le cadre de la mesure dimensionnelle de structure. Il sera considéré comme outil de référence et permettra de valider nos mesures scatterométriques.

La microscopie à force atomique constitue une évolution dans la métrologie dite à champ proche. Elle a été développée par Binnig en 1985 [30]. Cette technique a connu un essor fulgurant et s'est imposée comme une technique incontournable pour la caractérisation de surface à l'échelle nanométrique. Elle utilise une pointe évasée, qui par le biais de force d'interaction avec la surface de l'échantillon permet d'imager la forme de celui-ci et ainsi remonter au profil de ligne. Cette pointe montée au bout d'un levier (appelée cantilever), est l'élément principal de la technique. Le cantilever doit avoir une grande fréquence de résonance et une faible raideur. Il se déplace autour de l'échantillon à l'aide d'un système de tubes piézo-électriques dans les trois directions de l'espace. Les forces attractives ou répulsives entre la surface et la pointe induisent la déflexion du levier. Cette déflexion est mesurée à l'aide d'un laser dirigé sur le bout du cantilever, de préférence directement au dessus de la pointe, puis réfléchi vers une photodiode détectrice. La formation de l'image est possible grâce au balayage du levier ligne par ligne sur la surface de l'échantillon [10] (cf. Figure 24).

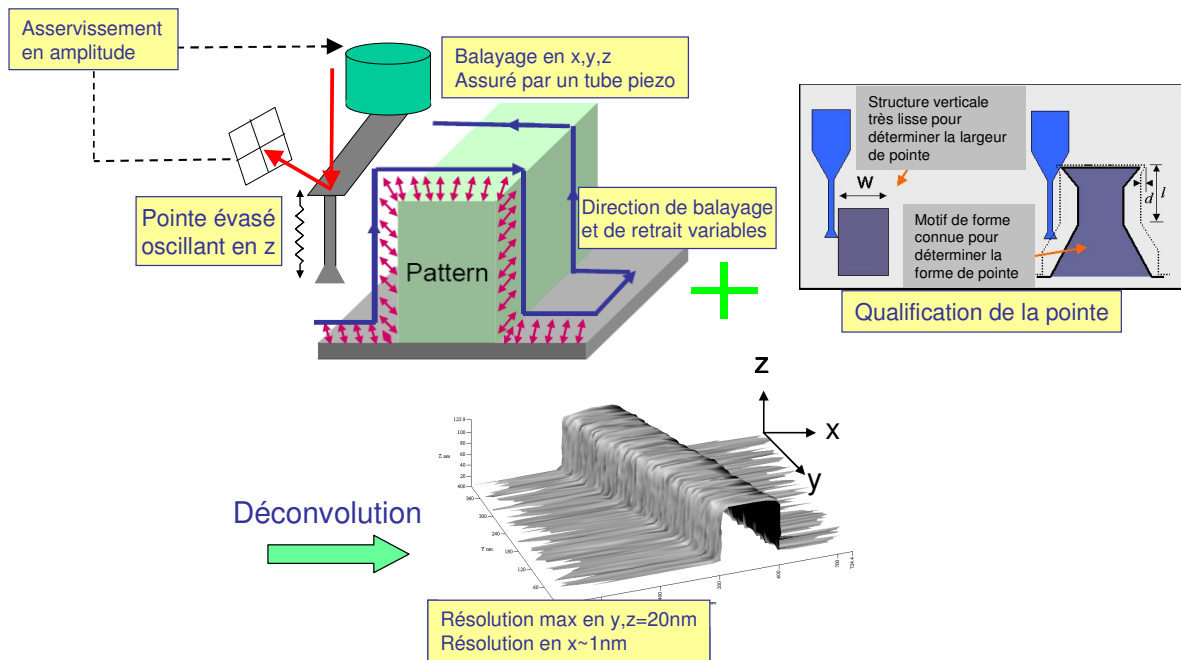


Figure 24 : Principe de mesure à l'AFM 3D

Le CD AFM utilisé dans cette thèse, est un outil développé par Veeco Instrument, cet outil permet de mesurer les dimensions de structures en 3 dimensions ainsi que les rugosités des flancs de motifs. Le principe est de venir balayer le profil de ligne avec une pointe de

forme évasée sensible aux flancs des motifs. Les profils de ligne réels sont obtenus après déconvolution de la forme de la pointe. En moyenne plusieurs lignes du profil sont mesurées. Cet outil permet d'obtenir des résolutions nanométriques.

Les pointes utilisées pour nos mesures sont des pointes CDR120 de Team Nanotech. Les trois caractéristiques de ces pointes sont (cf. Figure 25):

- Le diamètre ($D0$) de la pointe qui conditionne l'espace le plus petit dans lequel il est possible de faire la mesure.
- La longueur ($L1$) de la pointe qui fixe la hauteur maximale de motif qu'il est possible de mesurer.
- Le rayon de courbure (Rc) à gauche et à droite de la pointe qui fixe la zone d'ombre au pied des motifs qu'il est impossible de mesurer.

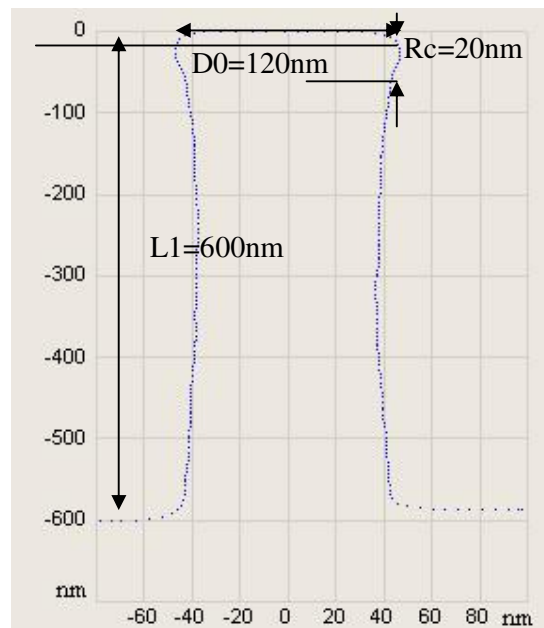


Figure 25: Dimensions caractéristiques des pointes de type CDR 120nm (Critical dimension re-entrant profile)

Après déconvolution de la forme de la pointe, la forme du profil géométrique est obtenue (cf. Figure 26 (a)). Toutefois cette technique reste une technique locale, qui s'étend juste sur quelques lignes. Elle devient très longue dans le cas d'analyse de grandes surfaces. Cette technique à l'avantage d'être non destructive comme la scatterométrie et elle est souvent utilisée comme référence.

Les mesures ont été faites sur 20 lignes dans la région du spot de l'ellipsomètre (2x3mm). Chaque ligne est scannée 100 fois sur une distance de 1 μ m (cf. Figure 26 (b)).

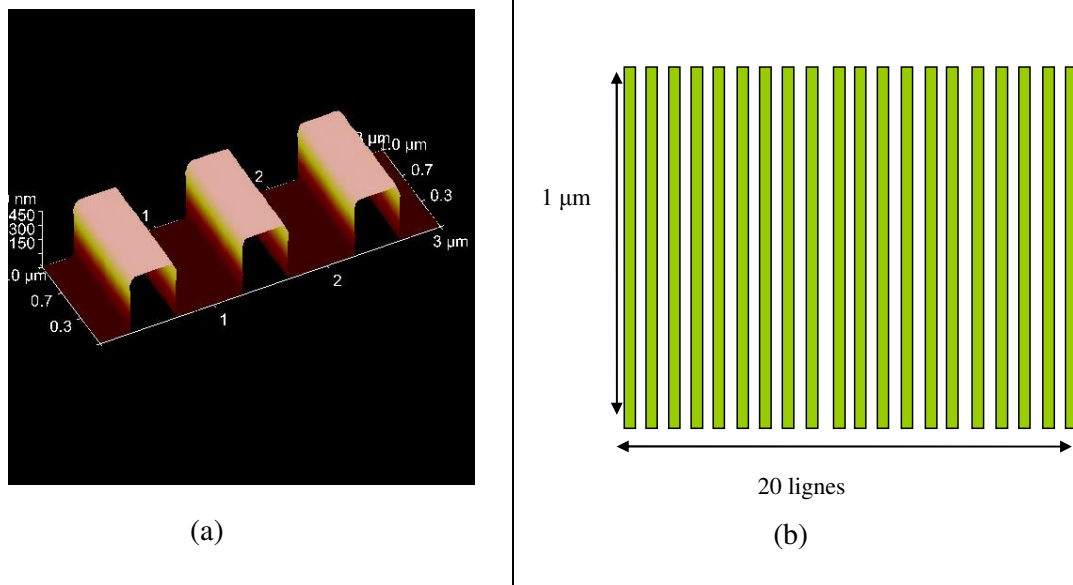


Figure 26: (a) Image 3D de profil de ligne mesurer par CD AFM de Veeco Instrument, (b) zone de scan par CD AFM

III.2.4 Ellipsomètre UVISEL MWL-16

Les mesures scatterométriques ont été effectuées avec un ellipsomètre UVISEL MWL-16 du groupe HORIBA Jobin Yvon. Cet ellipsomètre situé dans la chambre de gravure DPS 5200 permet d'effectuer des mesures *in situ* (cf. Figure 27). Cette caractéristique permet de suivre l'évolution du profil en temps réel durant le procédé de gravure. Il est constitué :

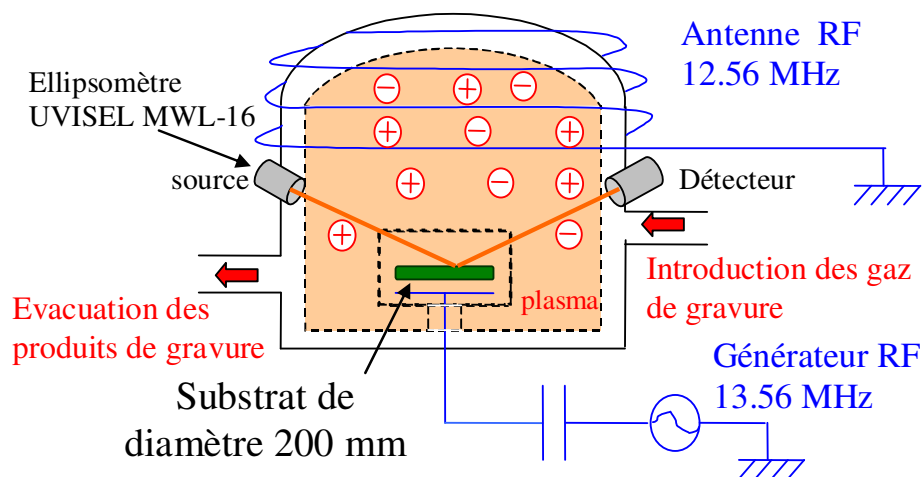


Figure 27 : La chambre de gravure DPS 5200 avec l'ellipsomètre *in situ* UVISEL MWL 16

- D'une source lumineuse à arc xénon 75W, la lumière arrive sur l'échantillon avec un angle d'incidence de 72.35° . La taille de spot est de l'ordre de $2\text{mm} \times 3\text{mm}$.
- D'un modulateur photoélastique (50KHz) stabilisé thermiquement.
- D'un système d'acquisition multi longueur d'onde MWL16 (16 longueurs d'onde en parallèle) dans la gamme de 250-826 nm avec une vitesse d'acquisition de 2 signatures

par seconde en mode dynamique. Cet outil peut également être utilisé en mode statique, ce mode permet de mesurer le spectre total dans la gamme (250-826nm) avec le pas en longueur d'onde souhaité par l'utilisateur.

Cet ellipsomètre est de type à modulation de phase. Comme décrit dans le *chapitre I*. Les grandeurs mesurées durant les procédés sont le couple de grandeur I_s et I_c .

III.3 Application de la scatterométrie en temps réel pour le suivi de procédé de réduction de cote résine.

III.3.1 Profils de ligne étudiés

Nous nous sommes intéressés au suivi en temps réel de l'évolution du profil de lignes lors de l'étape de réduction de cote résine. Les structures étudiées sont des réseaux périodiques de lignes de 250nm, avec une période de 500nm. Les empilements étudiés sont de deux types :

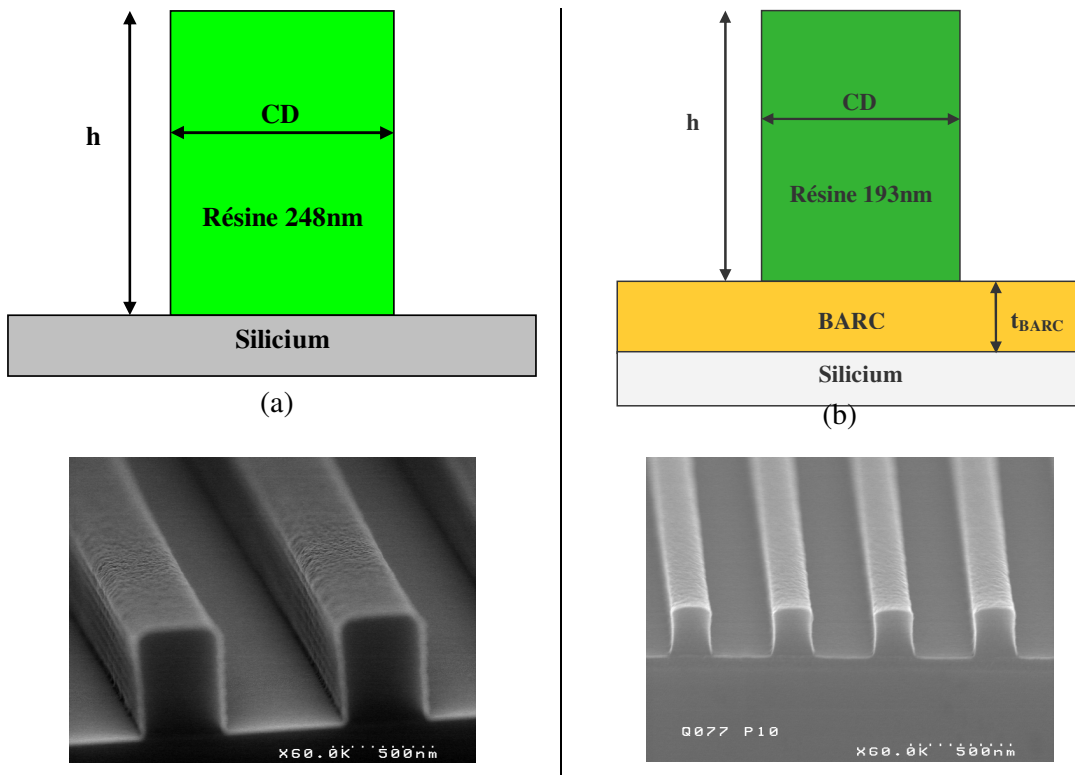


Figure 28 : Profils de ligne étudiés

- Un empilement composé de 550nm d'une résine 248nm sur substrat de silicium. La résine M78Y de JSR est exposée à l'aide d'un scanner ASML/300 (cf. Figure 28 (a)).
- Un empilement composé de 300nm de résine 193nm « JSR1682 », sur du BARC (Bottom Anti Reflection Coating) sur substrat de silicium. Le BARC est une couche polymère anti réfléchissante. Cette couche est déposée pour améliorer les profils des motifs de résine pendant l'insolation (cf. Figure 28 (b)).

Le choix d'étude de ces structures est dû à plusieurs raisons :

- Les études effectuées dans notre laboratoire sur les résines 248nm ont montré que les plasmas utilisés dans cette thèse ne modifient pas les propriétés optiques de ce type de résine. Donc l'indice optique de la résine peut être considéré fixe dans le modèle. Cette caractéristique est très importante pour les mesures scatterométriques en temps réel. En effet, Les études effectuées dans le *chapitre II* montrent que toute erreur sur l'indice optique induit une erreur sur les paramètres. Donc l'étude de la résine 248nm est un cas idéal pour valider notre outil.
- Les réseaux étudiés sont des réseaux avec une topographie bien connue et simples à modéliser, avec très peu de paramètres dans le profil.
- L'étude des résines 193nm, est un cas typique, pour comprendre l'impact du plasma sur la résine, et comment les modifications d'indices de la résine peuvent être prises en considération dans le modèle.

III.3.2 Conditions expérimentales

Les chimies utilisées pour la gravure des résines 193nm et 248nm sont des chimies à base d'oxygène. Au cours de nos travaux nous utiliserons les plasmas Ar/O₂ et HBr/O₂. Ces chimies sont largement utilisées dans les procédés de réduction de cote par plasma. En particulier le plasma HBr/O₂ [28, 29]. Les conditions expérimentales sont les suivantes:

- Un **plasma HBr/O₂** avec les conditions suivantes : HBr 70sccm/O₂ 30sccm/, P_s=500W, P_{bias} 0W, pression=4mTorr
- Un **plasma Ar/O₂** avec les conditions suivantes : Ar 70sccm/O₂ 30sccm/, P_s=500W, P_{bias}=0W, pression 4mTorr

P_s et P_{bias} représentent respectivement la puissance RF injectée dans l'antenne source et la puissance RF du générateur de polarisation de substrat. Dans toutes les expériences, la quantité des gaz (Hbr (ou Ar) +O₂) introduit dans la chambre est maintenue constante et égale à 100 sccm.

Les études faites dans la littérature [69] montrent que ces chimies modifient très peu la résine 248nm sur les flancs.

III.3.3 Impact des plasmas sur les propriétés optiques des matériaux étudiés

Lors de l'étape de modélisation, l'indice optique des différents matériaux est considéré comme fixe dans le modèle. Or, lors des étapes de gravure l'indice optique des matériaux peut subir des modifications. Dans ce chapitre nous allons étudier l'impact des chimies utilisées sur les indices optiques des résines 248nm et 193nm.

L'ellipsomètre spectroscopique est un outil qui permet de mesurer les propriétés optiques des matériaux (l'indice réfraction (*n*) et le coefficient d'extinction (*k*)). L'approche suivie ici consiste à mesurer les propriétés optiques des matériaux (résine 193nm et résine 248nm) avant et après différents temps de gravure. Ces études ont été réalisées en pleine plaque, c'est-à-dire sur des plaques dépourvues de motifs. Les résultats en termes de propriétés optiques des matériaux ont été obtenus en utilisant le modèle Tauc Lorentz,

présenté dans annexe. Ce modèle est très largement utilisé pour mesurer les propriétés optiques des polymères [55, 18].

III.3.3.1. La résine 248nm

Les indices de réfraction ainsi que le coefficient d'extinction de la résine 248nm ont été mesurés à différents temps de gravure, pour les deux types de plasma. Les résultats sont reportés sur la Figure 29 et la Figure 30.

La Figure 29 illustre l'évolution de l'indice de réfraction (cf. Figure 29 (a)) et le coefficient d'extinction (cf. Figure 29 (b)) de la résine 248nm « M78Y » en fonction du temps de gravure dans un plasma HBr/O₂. On remarque que l'indice de réfraction et le coefficient d'extinction de la résine 248nm subissent une très faible variation. La faible variation de l'indice peut être attribuée aux erreurs du modèle ainsi qu'à la corrélation entre l'épaisseur et l'indice optique du matériau. En effet, une erreur sur l'épaisseur induit une erreur quasiment proportionnelle sur l'indice optique.

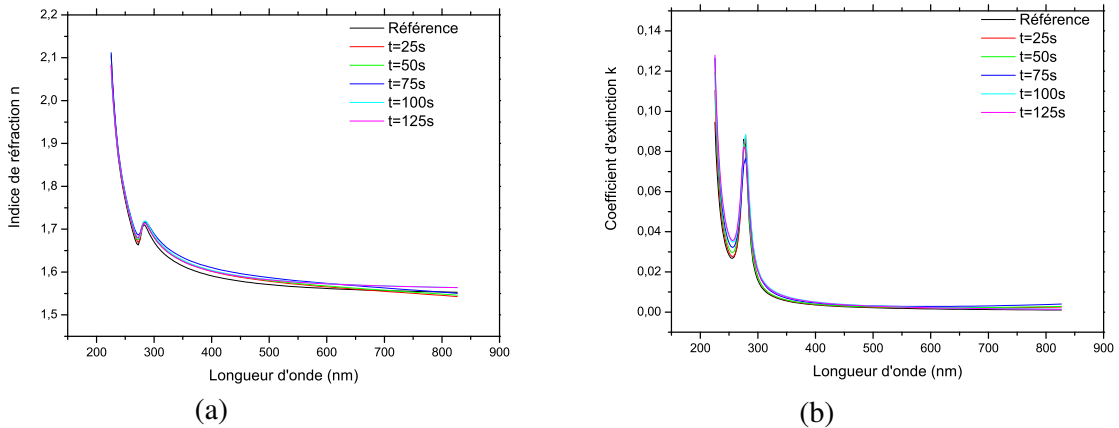


Figure 29 : Les propriétés optiques de la résine 248nm après différents temps d'exposition au plasma HBr/O₂ (a) indice de réfraction, (b) coefficient d'extinction

La Figure 30 illustre l'évolution de l'indice de réfraction (cf. Figure 30 (a)) et le coefficient d'extinction (cf. Figure 30 (b)) de la résine 248nm après gravure dans un plasma Ar/O₂. On constate que l'indice de réfraction de la résine reste peu perturbé par le plasma.

La Figure 30 (b) montre que le coefficient d'extinction reste inchangé dans la gamme visible et proche IR après exposition au plasma. Cependant on ne constate que le coefficient d'extinction a tendance à avoir légère augmentation dans la zone UV. Cette augmentation est régulière en fonction des temps d'exposition au plasma. Cela peut être attribué à l'UV du plasma [27].

Ces études montrent que pour les deux plasmas utilisés, les propriétés optiques des matériaux ne seront pas modifiées de manière significative. La variation sur l'indice de réfraction et le coefficient d'extinction est de l'ordre de l'erreur de mesure (0.005 pour l'indice de réfraction et de 0.01 pour le coefficient d'extinction). Ces erreurs sur les indices induiront des erreurs sur les paramètres des modèles qui sont inférieures à la précision dans la

bibliothèque des signatures modélisées, qui est de l'ordre de 1nm. Ces erreurs peuvent être considérées comme négligeables.

L'utilisation des résine 248nm nous permettra de valider les algorithmes développés pour le contrôle en temps réel de procédé de réduction de cote résine en considérant les indices des matériaux comme des paramètres fixes dans le modèle.

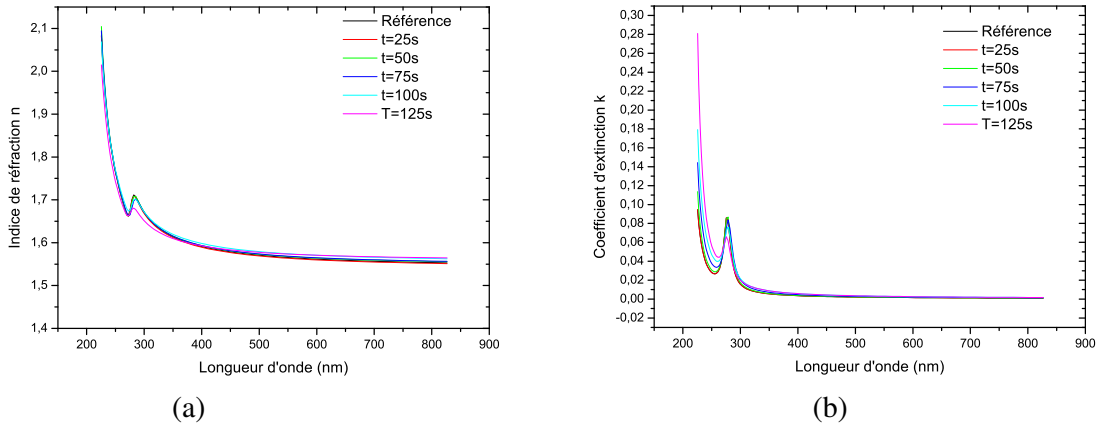


Figure 30 : Les propriétés optiques de la résine 248nm après différents temps d'exposition au plasma Ar/O₂ (a) indice de réfraction, (b) coefficient d'extinction

Dans la Figure 31 on compare l'évolution de l'épaisseur d'un film homogène de résine 248 nm durant le procédé de gravure pour les deux chimies. Ces épaisseurs ont été mesurées par ellipsométrie en pleine plaque en même temps que les indices optiques (mesure en pleine plaque de $(e, n(\lambda), k(\lambda))$). On constate que la vitesse de gravure dans le cas d'une chimie Ar/O₂ (180nm/min) est plus importante que dans le cas d'une chimie HBr/O₂ (83nm/min). Le procédé de réduction du cote résine avec une chimie à base Ar/O₂ est très difficile à contrôler du fait de sa vitesse de gravure élevée. Pour cela ce type de chimie est très peu utilisé dans l'industrie microélectronique. Cependant, il s'agit d'un cas idéal pour valider nos algorithmes, car il permet d'avoir des vitesses de gravure très élevées, et d'arriver à suivre l'évolution en temps réel par la scatterométrie et de valider les algorithmes dans des cas critiques

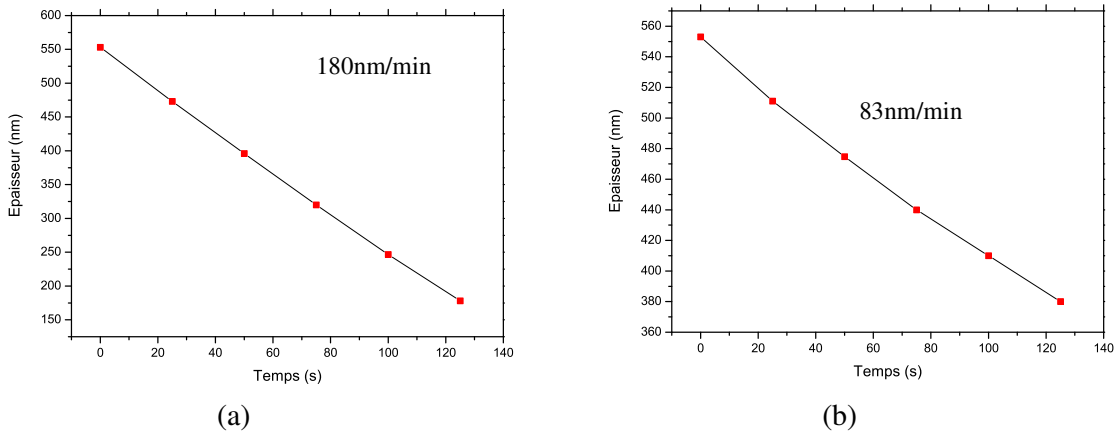


Figure 31 : L'évolution de l'épaisseur d'un film homogène de résine 248nm :(a) en fonction du temps d'exposition au plasma Ar/O₂, (b) en fonction du temps d'exposition au plasma HBr/O₂

III.3.3.2. La résine 193 nm

L'étude de l'impact des deux plasmas HBr/O₂ et Ar/O₂ sur une résine 193nm a été réalisée en suivant le même protocole. Les propriétés optiques de la résine en film mince homogène ont été mesurées après différents temps d'exposition et l'impact du plasma sur la résine a été étudié.

La Figure 32 présente l'évolution de l'indice optique de la résine 193nm après différents temps d'exposition dans un plasma Hbr/O₂. On remarque que l'indice de réfraction de la résine a tendance à augmenter d'une manière significative après exposition au plasma. Avec une augmentation de l'ordre de 6% par rapport à l'indice initial. Dans la Figure 32 (b), on constate que plus le temps d'exposition au plasma augmente plus la résine devient absorbante.

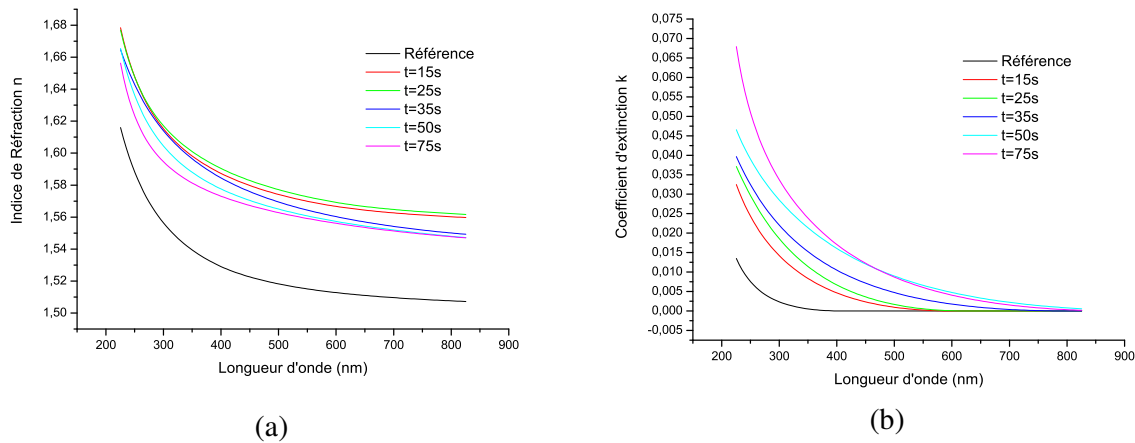


Figure 32 : Les propriétés optiques de la résine193nm après différents temps d'exposition au plasma HBr/O₂ (a) indice de réfraction, (b) coefficient d'extinction

Sur La Figure 33 on présente l'évolution de l'indice de réfraction et le coefficient d'extinction de la résine 193nm après exposition à un plasma Ar/O₂. On constate que l'indice de réfraction de la résine 193nm subit une modification de l'ordre de 3% après exposition au plasma. Dans la Figure 33 (b) on remarque que le coefficient d'extinction augmente avec le temps d'exposition, avec une augmentation du même ordre de grandeur que dans le cas d'un plasma HBr/O₂ pour le même temps d'exposition. Par exemple, pour un temps d'exposition de 35s l'augmentation du coefficient d'extinction dans la zone UV (à 250nm par exemple) est de l'ordre de 0.03.

On remarque aussi, que la modification de l'indice de réfraction de la résine est plus importante dans le cas d'un plasma HBr/O₂ que dans le cas d'un plasma Ar/ O₂.

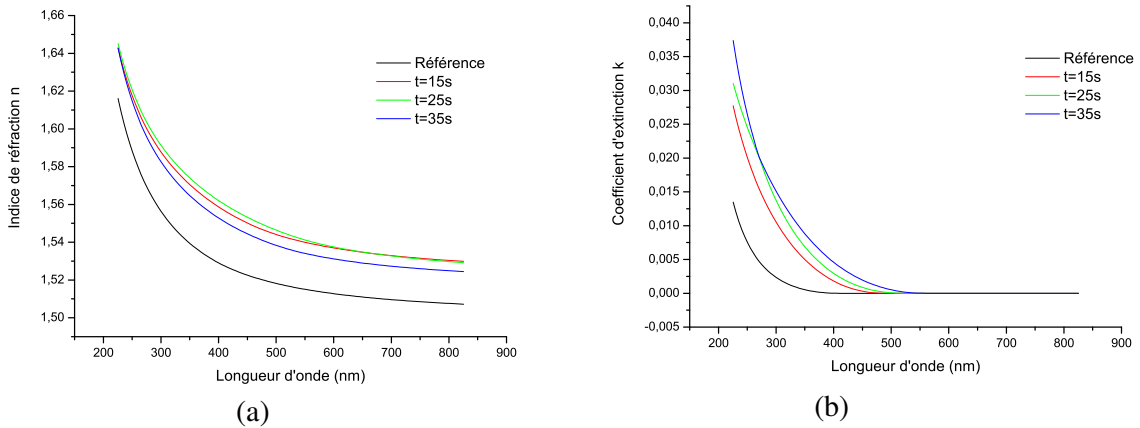


Figure 33 : Les propriétés optiques de la résine JSR1682 après différents temps d'exposition au plasma Ar/O₂ (a) indice de réfraction, (b) coefficient d'extinction

Cette étude montre que pour les deux chimies utilisées, l'indice optique de la résine est modifié, ce qui n'est pas le cas pour les résines 248nm. Pargon et al. [27] attribuent cette modification au VUV (de l'anglais Vacuum UltraViolet) des plasmas ainsi qu'aux radicaux et aux ions des plasmas.

L'étude faite dans le *chapitre II* sur les incertitudes de mesure sur le nœud technologique 45nm montre qu'une erreur sur les indices optiques des matériaux induit une erreur systématique sur les paramètres. Par exemple on a vu dans le chapitre précédent qu'une erreur de 0,5% sur l'indice de la résine 193nm induit une erreur de 1,5% sur le CD (cf. *chapitre II*). D'où la nécessité de prendre en considération la modification des indices optiques de la résine dans le modèle scatterométrique.

Dans la suite, pour les résines 193nm on considère que l'indice optique de la résine est représenté par l'équation (51), avec un seul paramètre pour représenter la modification de l'indice dans le modèle qui est le paramètre x .

51

$$N = xN_f + (1-x)N_0$$

N : représente l'indice complexe de la résine : $N = n - ik$, N_0 et N_f représentent respectivement l'indice complexe de la résine mesuré à $t=0s$ (indice de référence) et à t final. x varie dans l'intervalle $\{0,1\}$.

III.3.4 Protocole de validation par CD AFM

Les résultats scatterométriques obtenus lors de suivi en temps réel d'un procédé de réduction de cote résine ont été comparés avec des mesures CD AFM effectuées dans les mêmes conditions. Lors de cette comparaison le protocole expérimental est le suivant :

Avant chaque étape de gravure le réacteur DPS est nettoyé par l'utilisation d'un plasma à base d'un gaz SF₆/O₂ [75]. Ce plasma permet de nettoyer le réacteur afin d'être toujours dans les mêmes conditions de départ. Ensuite, nous considérons plusieurs plaques

identiques d'un même lot. Ces dernières sont gravées dans le réacteur à des temps différents (20s, 40s, 60s, 80s, etc.). Durant le procédé de gravure des mesures scatterométriques permettent de suivre l'évolution des profils de lignes. Ces mesures sont comparées avec les mesures CD AFM effectuées à la fin de chaque étape (cf. Figure 34).

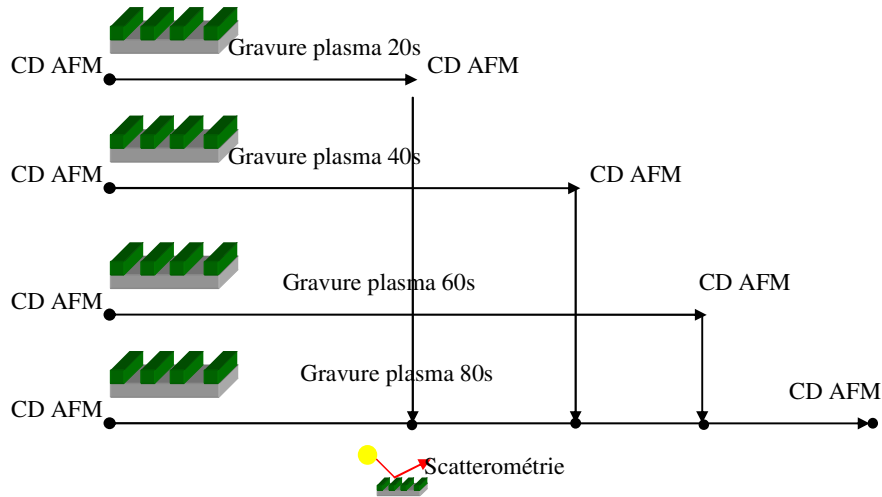


Figure 34 : Protocole expérimental de validation d'une mesure scatterométrique par des mesures CD AFM

III.3.5 Résultats scatterométriques

III.3.5.1. Etude de la résine 248nm

Ces expériences consistent à suivre l'évolution du profil des lignes d'un réseau durant le procédé de réduction de cote résine. L'ellipsomètre permet d'effectuer les mesures *in situ* dans le réacteur de gravure et ainsi d'acquérir le film des signatures scatterométriques. Le profil étudié est un réseau périodique d'une résine 248nm sur substrat de silicium décrit dans la partie (III.3.1).

Des mesures CD AFM sont faites avant et après gravure plasma sur chaque plaque comme défini dans (III.3.4). Ces mesures sont reportées sur la Figure 35. Les profils mesurés à l'AFM nous permettent d'élaborer un modèle géométrique des profils durant le procédé de gravure. On a choisi un modèle trapèze, représenté par les trois paramètres (CD, hauteur, SWA « SideWall Angle ») (cf. Figure 36). La bibliothèque calculée pour cette étude est donnée dans le Tableau 12. La précision dans la bibliothèque sur les différents paramètres du profil est de 1nm sur le CD et la hauteur et de 1° sur SWA, sa taille mémoire est de 457,8Mbits et le temps nécessaire pour la calculer est de 8jours et 3heures avec 6 CPU de 2,85Ghz.

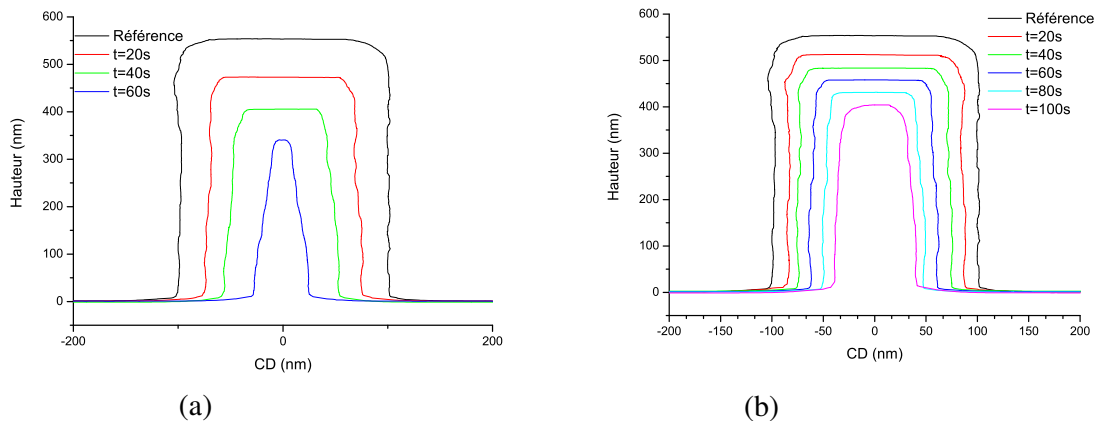


Figure 35 : L'évolution du profil des lignes de la résine 248nm lors de l'étape de gravure observé par CD AFM. (a) Plasma Ar/O₂, (b) plasma HBr/O₂.

	Valeur minimale	Valeur maximale	Pas
CD (nm)	0	250	1
Hauteur (nm)	0	550	1
SWA(°)	85	90	1

Tableau 12 : Bibliothèque de signatures scatterométriques pour les résines 248nm

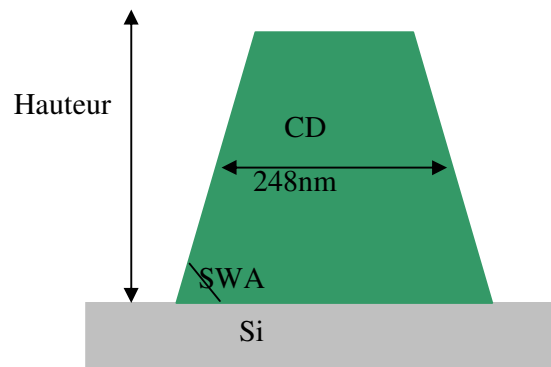


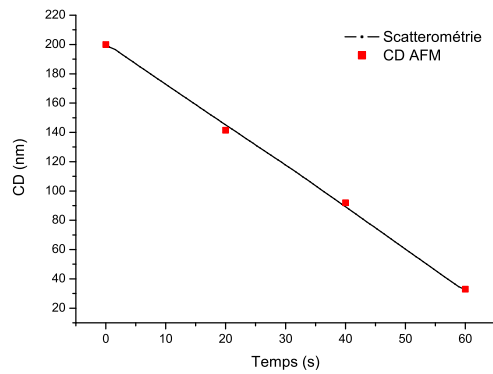
Figure 36 : profil de ligne modélisée pour les résines 248nm

Une fois la bibliothèque pré-calculée nous utilisons les algorithmes de recherche des plus proches voisins ainsi que la régularisation de Tikhonov pour suivre la variation du profil de ligne lors de l'étape de gravure (cf. *chapitre II*). L'étude des résines 248nm permettra de valider notre outil scatterométrique.

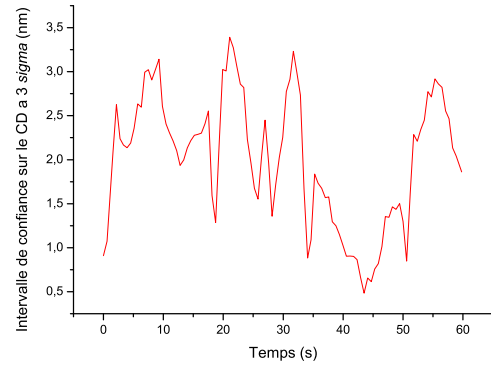
La Figure 37 présente l'évolution des paramètres du profil de ligne de la résine 248nm (CD, hauteur et SWA) ainsi que respectivement leurs intervalles de confiance pour une chimie d'Ar/O₂. Les intervalles de confiance sont donnés à 3 σ , ils sont mesurés comme décrit dans la partie (*bilan chapitre II*). L'intervalle de confiance sur les paramètres dépend de la qualité d'ajustement entre les données expérimentales et les données simulées (χ^2 cf. chapitre

I) et de la matrice de covariance des paramètres de sortie du profil (CD, hauteur et SWA). Sur la Figure 37 (d), (e) et (f) on remarque que la variation de l'intervalle de confiance à 3σ sur les paramètres géométriques est irrégulière. Cela est principalement dû au fait que la matrice de covariance des paramètres et la fonction de coût varie au cours du temps, car le profil géométrique varie.

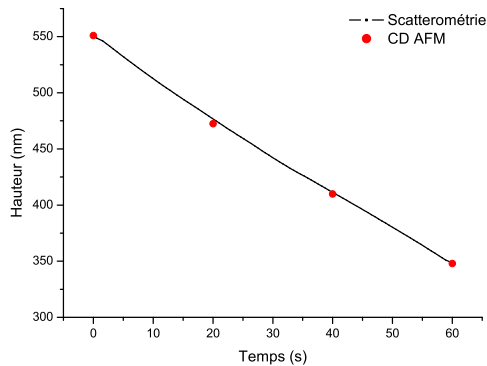
Sur les Figure 37 (a) et (b), on constate une bonne corrélation entre les résultats scatterométriques (courbe noire) et ceux obtenus par CD AFM (points rouges).



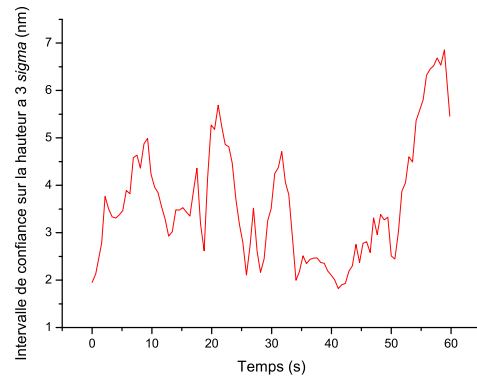
(a)



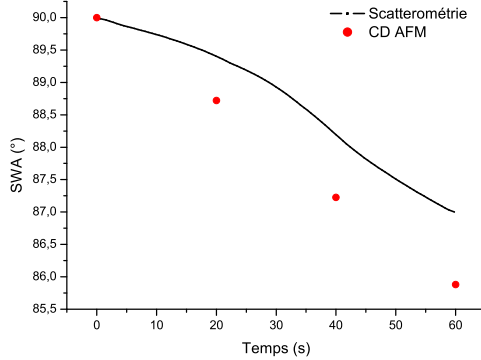
(d)



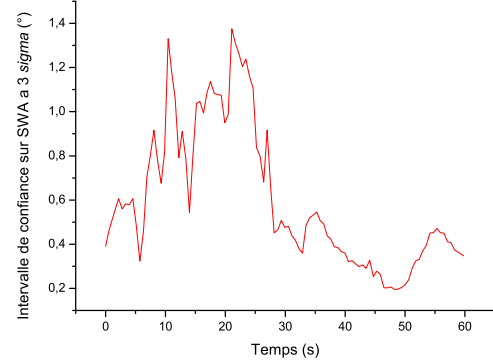
(b)



(e)



(c)



(f)

Figure 37 : Evolution des paramètres géométriques (CD (a), hauteur (b), SWA (c)) d'une résine 248nm et de leurs intervalles de confiance ((d), (e),(f)) durant le procédé de gravure pour chimie Ar/O₂.

Dans le Tableau 13 nous avons reporté les résultats obtenus par les deux techniques à différents temps de procédé. L'intervalle de confiance sur les résultats scatterométriques est donnée à 3σ et l'incertitude sur les mesures CD AFM représentent l'écart type entre plusieurs mesures (20 mesures) donnée à 3σ .

On remarque que la différence maximale entre les résultats obtenus par les deux techniques est de l'ordre de 2.8nm pour le CD. Cette différence est constatée pour $t=20s$. A ce même instant ($t=20s$) l'intervalle de confiance sur le CD à 3σ est de l'ordre de 3nm. Cette dernière est supérieure à l'écart constaté entre les deux techniques. On remarque également que la différence sur la hauteur entre les deux techniques est de l'ordre de 0,3 à 1,6nm, ce qui est largement inférieur à l'intervalle de confiance sur ce paramètre qui est compris dans un intervalle de 2à 7nm (cf. Figure 37 (e)).

Temps(s)	CD (nm)		Hauteur (nm)		SWA(°)	
	Scat.	CD AFM	Scat.	CD AFM	Scat.	CD AFM
0	200±0,91	200±3,27	551±1,95	551±1,5	90±0,4	90±0,6
20	145,4±3	142,6±2,56	477,2±5,18	477,5±1,5	89,4±0,98	88,7±1,5
40	89,3±0,9	92±3,2	411,4±2	409,8±1,2	88,2±0,36	87±0,9
60	33±1,86	33±2,64	349±5,45	347,9±2,7	87,2±0,34	85,8±1,1

Tableau 13 : Comparaison entre les résultats scatterométrie et les résultats CD AFM obtenus lors du procédé de réduction de cote résine 248nm pour la chimie Ar/O₂

La Figure 37 (c) présente l'évolution de la pente de ligne en fonction du temps de gravure. On constate que durant le procédé de gravure la pente du profil augmente, linéairement en fonction du temps. La comparaison de la pente du profil SWA mesurée par scatterométrie et CD AFM montre que la différence maximale entre les deux techniques est de l'ordre de 1,4° observée à $t=60s$ (cf. Tableau 13). Cette différence est supérieure à l'intervalle de confiance sur ce paramètre à ce même instant (0,34° pour la mesure scatterométrique et de 1,1° pour la mesure CD AFM).

Ukrainsev et al. [86, 87] estiment qu'il subsiste toujours une différence de 1° entre les deux techniques, cet écart provient de la différence d'approche utilisée pour mesurer ce paramètre.

La pente mesurée par scatterométrie correspond à la pente du profil comme indiqué sur la Figure 36, alors qu'avec le CD AFM on mesure la pente du profil entre $h_{20\%}$ et $h_{80\%}$, avec h la hauteur du profil. Cela est principalement dû à la forme circulaire de la pointe. Cette forme rend difficile la mesure du haut et du bas du profil d'une ligne par CD AFM. En CD AFM généralement les paramètres mesurés sont CD_{Top} à $h_{80\%}$, CD_{Bottom} à $h_{20\%}$, CD_{Middle} à $h_{50\%}$ appelé CD dans cette thèse. Les pointes CDR120 de teamNanotec utilisées dans ces études ont l'avantage d'être longues (hauteur totale de l'ordre de 600nm) ce qui permet de balayer toute la hauteur de la ligne. Leur forme circulaire permet de mesurer avec précision les profils rentrants et la rugosité de la ligne.

Nous pouvons donc conclure de ces résultats que la scatterométrie est une technique fiable pour suivre le procédé de réduction de cote résine 248nm dans une chimie Ar/O₂.

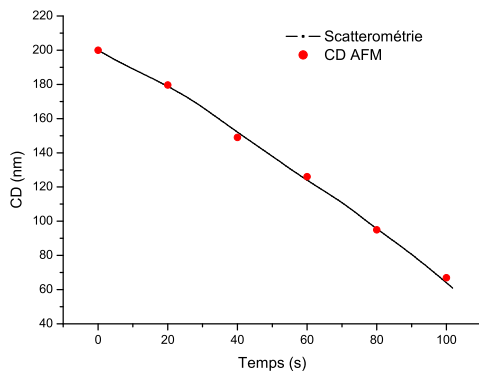
Sur la Figure 38 a), nous montrons l'évolution du CD durant le procédé de réduction de cote résine pour la chimie HBr/O₂. On peut constater une très bonne corrélation entre les résultats scatterométriques (courbe noire) et les mesures CD AFM (points rouges) avec une différence maximale de l'ordre de 2.8nm observée à $t=40s$. Toutefois cette différence reste de l'ordre de l'incertitude sur ce paramètre qui est de l'ordre de 2,5nm sur la mesure scatterométrique et de l'ordre de 1,6 nm sur la mesure CD AFM (cf. Figure 38(d) et cf. Tableau 14).

Dans la Figure 38 b), on remarque une bonne corrélation de la hauteur obtenue par les deux techniques, avec des différences inférieures à l'incertitude estimée. A titre d'exemple, pour $t=40s$ la différence obtenue entre les deux techniques est de 1,3nm alors que l'incertitude sur la hauteur estimée par scatterométrie à ce même instant est de l'ordre de 4,3nm (cf. Tableau 14).

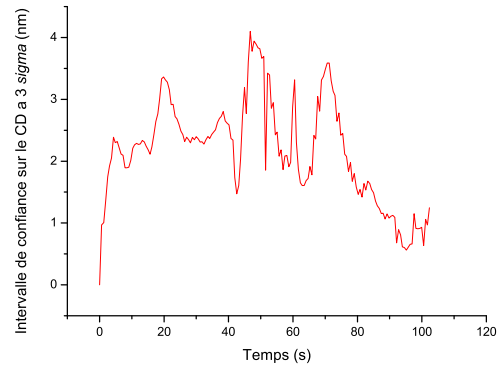
Sur Figure 38 c), nous présentons l'évolution de la pente du profil durant le procédé de gravure. Les résultats scatterométriques montrent que la pente du profil n'évolue pas durant le procédé, alors que les résultats CD AFM montrent que la pente du profil a tendance à augmenter durant le procédé. Lorsqu'on compare les résultats obtenus par les deux techniques, on remarque que la différence maximale est de l'ordre de $1,8^\circ$ à $t=80s$.

Dans la Figure 38 f), nous avons présenté l'évolution de l'intervalle de confiance sur la pente durant le procédé de gravure. Nous constatons que cette dernière varie en fonction du temps dans un intervalle compris entre 0,6 et 2° . Or, si on tient compte de l'incertitude de mesure sur la pente des profils de ligne lors de la comparaison des résultats scatterométriques et ceux obtenus par CD AFM, on peut considérer que les deux techniques donnent des résultats proches.

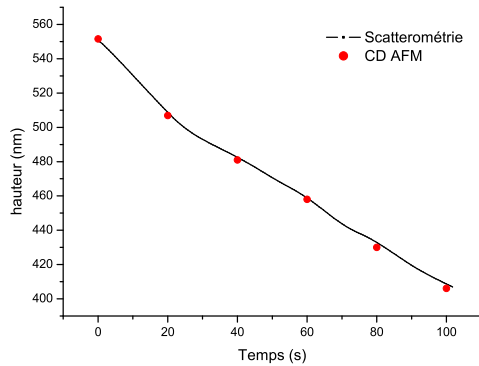
La comparaison des résultats scatterométriques et les mesures CD AFM montrent un accord excellent dans le cas de résines 248nm avec des chimies Ar/O₂ et HBr/O₂. Cependant, une différence majeure subsiste entre ces deux techniques de métrologie. Les mesures scatterométriques sont des mesures *in situ* effectuées en temps réel, alors que les mesures CD AFM sont des mesures *ex situ* et longues. Ce qui rend la scatterométrie plus attractive pour le contrôle de ce type de procédé.



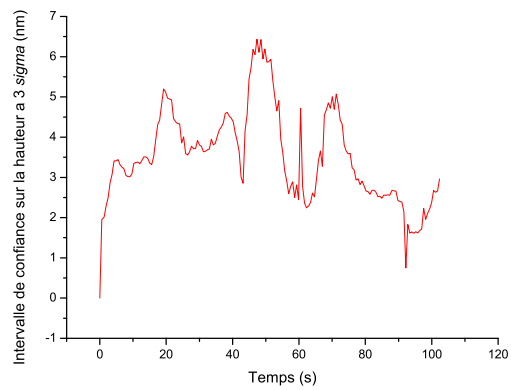
(a)



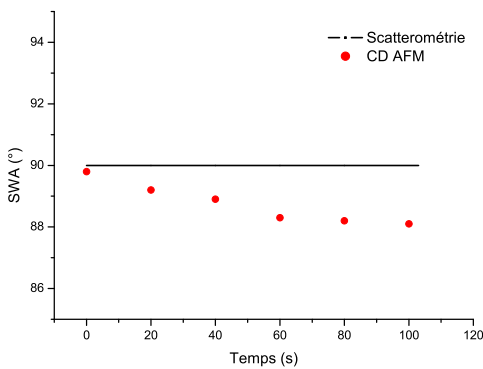
(d)



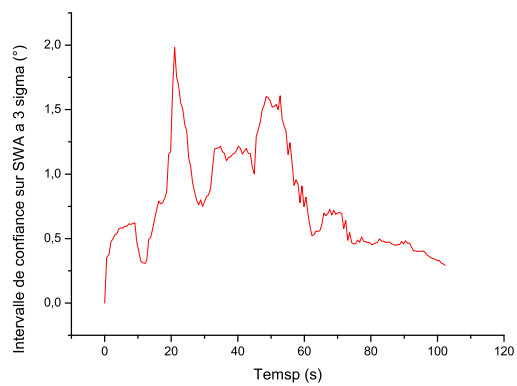
(b)



(e)



(c)



(f)

Figure 38 : Evolution des paramètres géométriques (CD (a), hauteur (b) et SWA (c)) d'une résine 248nm ainsi que leurs intervalles de confiance ((d), (e) et (f)) durant le procédé de gravure pour la chimie HBr/O₂.

Temps(s)	CD (nm)		Hauteur (nm)		SWA(°)	
	Scat.	CD AFM	Scat.	CD AFM	Scat.	CD AFM
0	200±0,9	200±3	551±1,95	551±1,5	90±0,35	89,9±0,6
20	178.4±3,3	179,7±2,8	507.8±4,95	506,9±1,4	90±1,65	89,2±1,2
40	151.8±2,5	149±1,6	482.3±4,38	481±1,55	90±1,2	88,9±0,9
60	124.2±3,3	126±1,75	459±4,72	458±1,2	90±0,8	88,3±1,2
80	95.3±1,54	95±2,6	432.6±2,6	430±1,4	90±0,4	88,2±1,5
100	64,5±1,2	67±2,3	408.7±2,9	406,1±1,5	90±0,3	88,2±0,6

Tableau 14 : Comparaison entre les résultats scatterométrie et les mesures CD AFM obtenus lors du procédé de réduction de cote résine 248nm pour la chimie HBr/O₂

A la vue de ces premiers résultats, sur la réduction de cote de résine 248nm, il semble que la scatterométrie est parfaitement adaptée pour le contrôle en temps réel de ce type de procédé. Il est maintenant intéressant de montrer que la technique est également capable de suivre le procédé de réduction de cote résine 193nm. En effet, dans l'industrie de la microélectronique la plupart des résines utilisées actuellement sont de ce type.

III.3.5.2. Etude des résines 193nm

Les études effectuées en pleine plaque montrent que les propriétés optiques de la résine 193nm sont modifiées par les plasmas étudiés (HBr/O₂, Ar/O₂) (cf III.3.3.2). Nous avons donc considéré l'indice optique de la résine comme variable dans le modèle. La variation de l'indice est représentée selon l'équation (2) par le paramètre x . Le profil de ligne étudié est constitué d'une résine 193nm sur BARC et sur substrat (cf III.3.1). Les paramètres géométriques représentant la variation du profil durant le procédé sont (cf. Figure 39) :

- CD largeur du motif.
- H1 : hauteur de la résine photosensible.
- H2 : hauteur de BARC gravé.
- T_{BARC} : hauteur total du BARC

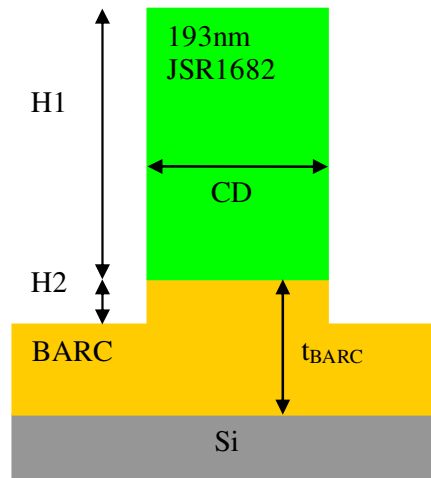


Figure 39 : profil de ligne modélisée pour la résine 193nm

La précision dans la bibliothèque sur les différents paramètres géométriques est de 1nm et sur le paramètre x est de 0,01. La taille mémoire de la bibliothèque est de 2,2Gbits et son temps de calcul est de 18 jours et 11 heures.

L'évolution des profils de lignes mesurées par CD AFM (cf. Figure 40) montre que le profil de ligne ne présente pas de pente sur les flancs (SWA). Fort de cette constatation, nous n'avons pas intégré ce paramètre dans notre modèle. En revanche le motif présente un arrondi au sommet du motif. Toutefois, nous n'avons constaté aucune différence dans les résultats scatterométriques lorsque ce paramètre est inclus dans la bibliothèque. Cela peut principalement être dû à la faible sensibilité à ce paramètre (cf. chapitre II).

Une fois la bibliothèque calculée, nous avons étudié le procédé de réduction de cote résine dans les conditions expérimentales décrites précédemment. Nous avons comparé les résultats scatterométriques avec les mesures CD AFM effectuées dans les mêmes conditions.

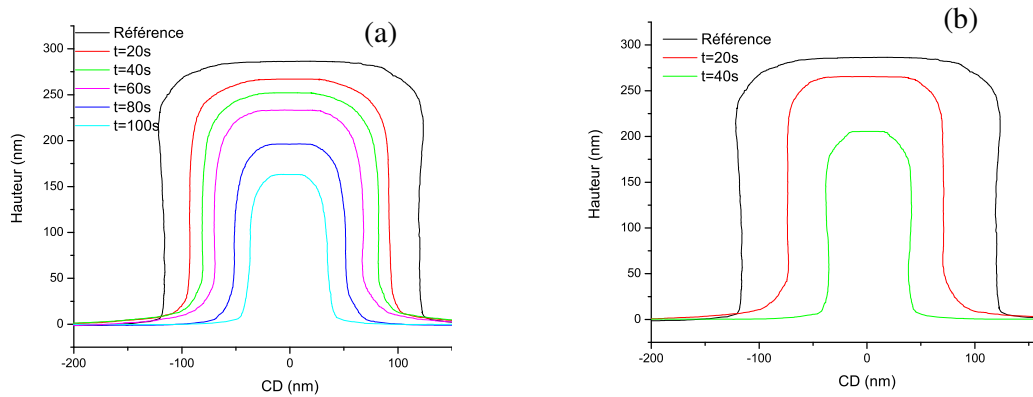


Figure 40 : L'évolution du profil des lignes de la résine 193nm lors de l'étape de gravure observé par CD AFM. (a) Plasma HBr/O₂, (b) plasma Ar/O₂.

Sur la Figure 41, nous montrons l'évolution du CD et de la hauteur totale du profil de ligne de la résine 193nm durant le procédé de gravure dans un plasma Ar/O₂. En noir les résultats scatterométriques et les points rouges représentent les mesures CD AFM. La hauteur totale mesurée par scatterométrie est la somme de deux hauteurs H1 et H2 représentant respectivement la hauteur de la résine et la hauteur du BARC gravé. L'intervalle de confiance sur la hauteur totale est obtenu par la formule suivante :

$$\sigma_{htotale} = \sqrt{\sigma_{h1}^2 + \sigma_{h2}^2} \quad 52$$

Avec σ_{h1} et σ_{h2} les intervalles de confiance à 3σ sur la hauteur de la résine et la hauteur du BARC.

La comparaison entre les résultats scatterométriques et les mesures CD AFM montrent qu'il y a une bonne corrélation entre les deux techniques. Nous constatons également que l'écart entre les deux techniques est plus important que dans le cas des résines 248nm. Toutefois cet écart reste de l'ordre de l'incertitude sur les deux paramètres. A titre d'exemple, à $t=40s$, l'écart maximal sur le CD est de 5,4nm, alors que l'incertitude sur le CD obtenue par

scatterométrie à ce même instant est de 4,5nm et l'incertitude sur la mesure CD AFM est de 1,3nm (cf. Tableau 15). Au même instant, l'écart observé sur la hauteur totale est de 4,1nm qui est de l'ordre de l'incertitude de mesure qui est de 3,8nm.

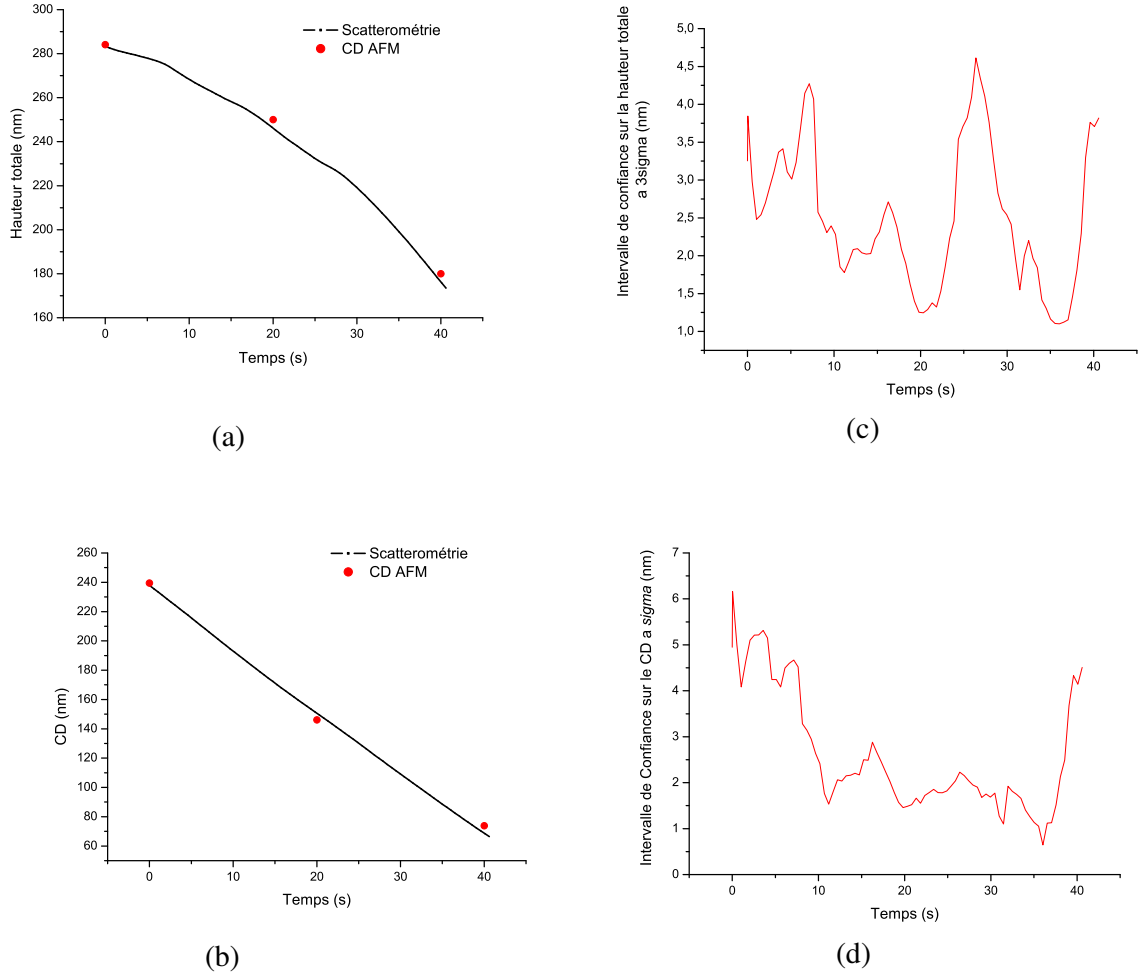


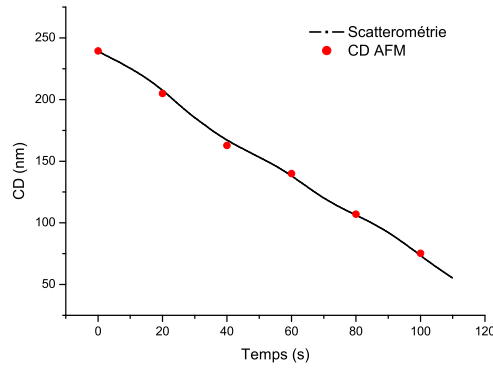
Figure 41 : Evolution des paramètres géométriques du profil de ligne ((a) hauteur totale et (b) CD) de la résine 193nm ainsi que de leurs incertitudes de mesures ((c) et (e)) pour le plasma Ar/O₂

Temps(s)	CD (nm)		Hauteur (nm)	
	Scat.	CD AFM	Scat.	CD AFM
0	240±4,95	240±1,2	284±3,25	284±0,5
20	150.4±1,5	146,1±2,1	246.7±1,2	250±0,8
40	68.4±4,5	73,8±1,3	175.9±3,8	180±0,3

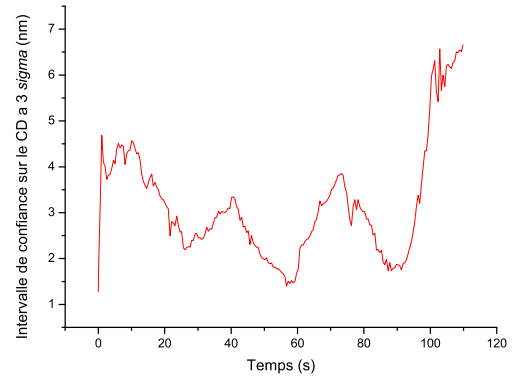
Tableau 15 : Comparaison entre les résultats scatterométrie et les mesures CD AFM obtenus lors du procédé de réduction de cote résine 193nm pour la chimie Ar/O₂

La Figure 42 présente l'évolution des paramètres géométriques de la structure durant la gravure pour un plasma HBr/O₂, en noir les résultats scatterométriques et en point rouge les

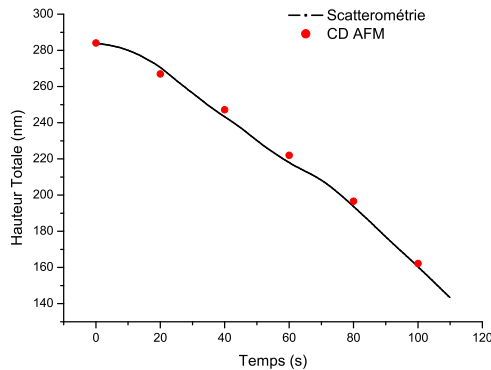
résultats obtenus par CD AFM. On constate une bonne concordance entre les résultats obtenus par les deux techniques pour les deux paramètres. La différence maximale observée est de l'ordre de l'incertitude de mesure. A titre d'exemple, l'écart maximal observé pour le CD est de 4nm, cette différence est constatée à t=40s (cf. Tableau 16) au même instant l'incertitude sur ce paramètre est de l'ordre de 3,8nm.



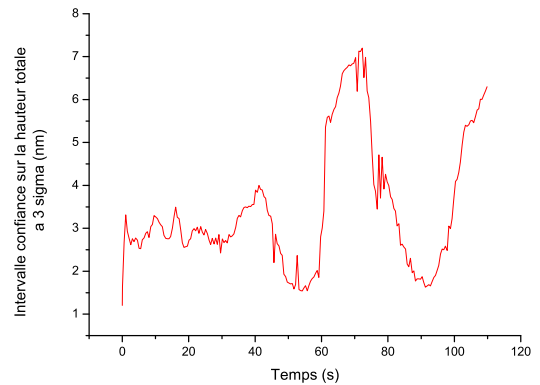
(a)



(c)



(b)



(d)

Figure 42 : Evolution des paramètres géométriques du profil de ligne ((a) CD) et (b) hauteur totale) de la résine 193nm ainsi que de leurs incertitudes de mesures ((c) et (e)) pour le plasma HBr/O₂

Temps(s)	CD (nm)		Hauteur (nm)	
	Scat.	CD AFM	Scat.	CD AFM
0	240±1,2	240±1,2	284±1,2	284±0,5
20	208.3±3,2	205±2,1	270.4±2,7	267±1
40	166.8±3,8	162,7±1,5	243.2±3,8	247,2±0,8
60	137.7±1,7	140±1,8	217.8±3	222±1,6
80	105.9±3	107,1±1,4	193.3±4	196,6±1,4
100	73.9±6,1	75,2±0,9	160.7±4,1	162,2±0,6

Tableau 16 : Comparaison entre les résultats scatterométrie et les mesures CD AFM obtenus lors du procédé de réduction de cote résine 193nm pour la chimie HBr/O₂

La Figure 42 (c) et (d) présentent les incertitudes de mesure sur le CD et la hauteur à 3σ . On constate qu'elles varient en fonction du temps dans un intervalle compris entre 2 et 6.8nm pour le CD et dans un intervalle de 1 à 7nm pour la hauteur. Toutefois, la comparaison entre les résultats scatterométriques et les résultats CD AFM montrent une bonne corrélation entre les deux techniques. Cela montre que la technique de scatterométrie s'avère une technique prometteuse pour le suivi de ce type de procédé.

L'étude des résines 193nm est un cas typique qui nous a permis de valider notre outil sur un procédé plus complexe, avec la prise en compte de l'indice optique comme paramètre variable. Des premiers essais, non présentés ici, sans tenir compte de la variation de l'indice lors de la gravure de la résine 193nm avaient fait apparaître des différences notables dans les résultats comparatifs avec les mesures CD AFM

III.4 Conclusion

Les résultats de cette étude montrent que la scatterométrie est adaptée pour le contrôle dynamique et en temps réel d'un procédé de réduction de cote résine. Nous avons montré l'efficacité des techniques de métrologie optique pour être utilisé on *in situ* et en temps réel lors de l'étape de réduction de cote résine.

L'étude de l'impact du plasma sur les indices de la résine montre que les propriétés optiques des résines 193nm changent durant le procédé. Cette modification conduit à des incertitudes de mesures sur les résultats scatterométriques (cf. *chapitre II*). D'où la nécessité de prendre en considération ce changement d'indice dans le modèle pour une bonne précision des mesures scatterométrique.

Dans le futur, d'autres études devront suivre pour montrer la capacité de la technique pour le contrôle des empilements plus complexes.

IV Scatterométrie porosimétrique

L'amélioration des performances des circuits intégrés nécessite la réduction de la taille et du temps de commutation des dispositifs. Avec la miniaturisation, le temps de transit dans les interconnexions est devenu prépondérant devant le temps de commutation des transistors [16]. Afin de réduire le temps total, il a été nécessaire d'introduire de nouveaux matériaux diélectriques à faible constant diélectrique. L'introduction de ces nouveaux matériaux permet un abaissement du couplage capacitif des interconnexions conventionnellement réalisées par des lignes métalliques.

Pour parvenir à baisser la constante diélectrique, une solution consiste à utiliser des matériaux poreux [46, 17]. Une difficulté majeure réside dans le fait de pouvoir mesurer la porosité de ces matériaux lors de leur intégration.

Pour ce faire la technique la plus utilisée est la caractérisation de ces matériaux en couche mince par Ellipsométrie Porosimétrique (EP) [56, 22]. L'ellipsomètre est installé sur une chambre sous vide contenant la couche mince à étudier ainsi que du solvant dont la pression peut varier. Lorsque la pression partielle du solvant augmente, le solvant condense progressivement dans les pores du matériau. Des mesures ellipsométriques sont effectuées pour chaque pression. Ainsi, on mesure la variation de l'indice optique de l'ensemble (matériau poreux + solvant) en fonction de la pression. La variation de l'indice optique de l'ensemble permet de remonter à la porosité des matériaux poreux.

Cette technique présente toutefois certains inconvénients et limitations. Les mesures EP ne sont adaptées que pour la mesure de couches minces poreuses. Comme les propriétés des matériaux poreux peuvent évoluer lors des étapes de lithographie et de gravure, il est fondamental de pouvoir mesurer ces propriétés lorsque le matériau est sous forme de motifs. Pour cela, une nouvelle technique a été mise au point au cours de cette thèse, en collaboration avec l'équipe gravure du LTM et l'équipe de caractérisation off line du CEA LETI Minattec. Il s'agit de la Scatterométrie Porosimétrique (SP). Cette technique est capable de caractériser les flancs des matériaux poreux et ainsi connaître à la fois le changement de porosité, les propriétés de perméation et d'hydrophobie de la partie modifiée sur les flancs.

Ce chapitre se décompose en trois parties. Dans les deux premières, le dispositif expérimental ainsi que le principe de la scatterométrie porosimétrique seront décrits. Dans la troisième partie, deux applications de la technique de SP seront présentées.

IV.1 Dispositif expérimental

Sur la Figure 43 on a reporté le schéma de l'ellipsomètre utilisé lors des mesures SP. Il est constitué de:

- une chambre avec porte échantillon.
- un ellipsomètre de type EP12 commercialisé par la société SOPRALAB (SEMILAB). C'est un ellipsomètre spectroscopique à polariseur tournant. Les mesures ellipsométriques sont effectuées dans la gamme spectrale (300-800nm) par un détecteur CCD, avec un angle d'incidence constant 60.15° .
- une pompe qui permet de modifier la pression régnant à l'intérieur de la chambre. La pompe est reliée à la chambre via une vanne de réglage. La pression dans la chambre varie de 1 mTorr (sous vide) jusqu'à la pression de vapeur saturante du solvant P_s .
- trois réservoirs de solvant (eau, méthanol, toluène) sont disponibles pour alimenter la chambre via une vanne de réglage. Les solvants étudiés dans cette thèse sont le méthanol ($P_s=115\text{Torr}$, $n=1,329$) et l'eau ($P_s=18\text{Torr}$, $n=1,332$). Les indices de

réfraction sont donnés à la longueur d'onde $\lambda=633\text{nm}$, et les pressions de vapeur saturante (P_s) à température ambiante.

- une jauge de pression permet de mesurer la pression dans la chambre.

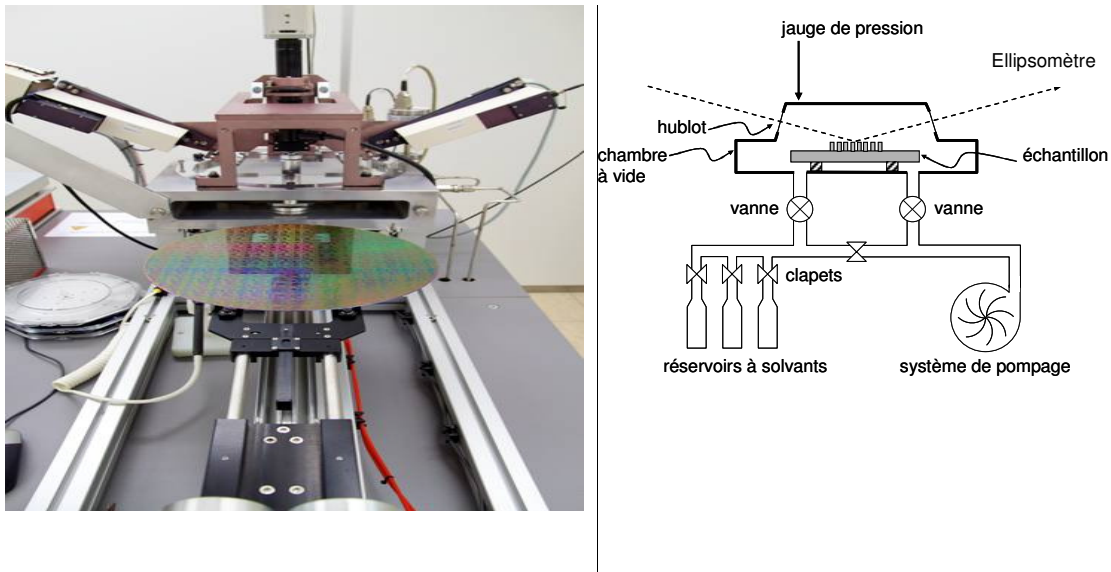


Figure 43 : Dispositif expérimental

L'ellipsomètre présent sur la chambre peut être utilisé dans deux modes d'acquisition différents :

Dans le premier, la pression de solvant varie. Celle-ci est contrôlée dans la chambre et pour chaque valeur une mesure ellipsométrique est effectuée. Ce mode d'acquisition permet d'avoir une bonne résolution en pression ce qui permet de donner la distribution des pores en fonction de leur taille. En effet, lorsque la pression de solvant augmente, le solvant condense progressivement des pores les plus petits jusqu'aux plus gros.

Dans le deuxième, les mesures ellipsométriques sont effectuées en fonction du temps à une pression fixe dans la chambre. Dans ce mode d'acquisition, en partant de la chambre sous vide, le solvant est injecté puis la pression est augmentée rapidement pour atteindre une pression inférieure à la pression de vapeur saturante du solvant P_s , eu même temps supérieure à la pression de condensation du solvant dans les pores (typiquement $0.8 P_s$). Des mesures ellipsométriques à intervalle du temps régulier permettent d'avoir accès à la cinétique de diffusion du solvant dans les pores. C'est ce type de mesure qu'il faut réaliser pour mesurer la couche modifiée sur les flancs des motifs.

IV.2 Scatterométrie porosimétrique

La technique peut être décrite en trois étapes illustrées par la Figure 44, Tout d'abord, les paramètres géométriques de la structure sont déterminés sous vide (1 mTorr). Cette détermination est obtenue par la réalisation d'une mesure scatterométrique statique. A l'aide de l'ellipsomètre placé dans la chambre, la réponse optique correspondant à la structure diffractante est mesurée. Étant donné que les propriétés optiques des différents matériaux constituant la structure diffractante sont connues (précédemment déterminés en pleine plaque par ellipsométrie classique), seuls les paramètres géométriques de la structure sont déterminés.

Aux instants suivants, des mesures ellipsométriques sont effectuées sur la structure diffractante contenant le matériau poreux durant la montée en pression du solvant (soit en faisant varier la pression dans la chambre soit en faisant varier le temps). En d'autres termes pour chaque pression relative P_{rel} du solvant dans la chambre, on effectue une mesure ellipsométrique. La pression relative du solvant dans la chambre est donnée par la relation $P_{rel}=P/P_s$ où P est la pression dans la chambre et P_s est la pression saturante du solvant.

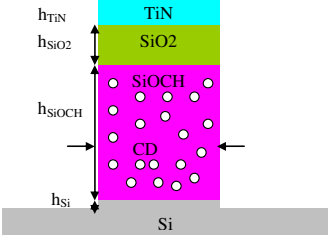
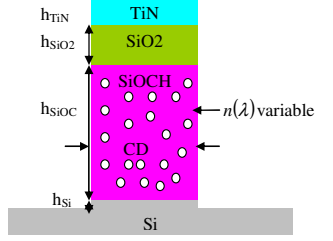
<p>1) Indices optiques connus et fixés. La mesure est effectuée sous vide et pour toutes les longueurs d'onde (λ)</p>	<p>2) Pour chaque pression et chaque longueur d'onde l'indice variable est déterminé</p>	<p>3) Pour chaque pression à la longueur d'onde $\lambda=633\text{nm}$ la fraction volumique est déterminé</p>
		$V_{\text{solvant}}(P_{rel}) = \frac{\frac{n^2(P_{rel}) - 1}{n^2(P_{rel}) + 2} - \frac{n_{vide}^2 - 1}{n_{vide}^2 + 2}}{\frac{n_{\text{solvant}}^2 - 1}{n_{\text{solvant}}^2 + 2}}$

Figure 44 : Principe opératoire permettant de mesurer une porosité sur des motifs périodiques (les paramètres modélisés sont représenté sur la structure)

La signature expérimentale d'une structure périodique change en fonction des dimensions ou des indices optiques des matériaux qui le composent. Or dans le cas de la scatterométrie porosimétrique, on considère que les dimensions de la structure sont inchangées. On cherche uniquement à déterminer l'indice optique du matériau poreux avec solvant.

Pour chaque mesure (en fonction de la pression ou du temps) l'indice optique de l'ensemble incluant le matériau poreux et le solvant ayant été absorbé dans les pores ouverts change en fonction de la quantité de solvant absorbée dans les pores. Les solvants utilisés ne sont pas absorbants dans la gamme de longueur d'onde utilisée. Ainsi seule la partie réelle de l'indice optique du matériau poreux sera déterminée. La variation de l'indice de réfraction du matériau poreux peut être représentée:

- Soit en utilisant un modèle de variation de l'indice (cf. annexe), par exemple, modèle de Cauchy. Dans ce cas les paramètres à déterminer sont A, B et C et on a :

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} \quad 53$$

- Soit en déterminant l'indice par une loi de mélange, la variation de l'indice du matériau poreux en fonction de la pression partielle sera bornée entre deux valeurs extrêmes :

$$n = (1 - x)n_{vide} + xn_{plein} \quad 54$$

Dans ce cas seul le paramètre x est déterminé. n_{vide} et n_{plein} représentent respectivement l'indice du matériau poreux sous vide (utilisé lors de la première étape pour la détermination des paramètres géométriques de la structure) et l'indice du matériau poreux avec tous les pores remplis du solvant mesuré. Ces indices optiques ont été mesurés en pleine plaque par ellipsométrie.

Indépendamment du modèle utilisé pour représenter la variation de l'indice du matériau poreux, nous avons choisi d'utiliser comme méthode d'optimisation la méthode de la bibliothèque. Les études faites durant cette thèse montrent que les paramètres géométriques des lignes ne subissent pas de modification, sauf dans quelques cas où le matériau poreux gonfle après absorption du solvant. Pour cela, les paramètres géométriques sont considérés comme fixes dans le modèle. Seuls les paramètres représentant la variation de l'indice optique du matériau poreux (soit le triplet (A, B et C), soit le paramètre x) sont représentés dans la bibliothèque.

Une fois l'optimisation réalisée, on obtient l'indice de réfraction global des matériaux poreux pour chaque pression partielle. On a donc une valeur de l'indice de réfraction $n(P_{rel})$ avec une certaine quantité de solvant condensée dans les pores pour une pression relative donnée pour toutes les longueurs d'onde.

La dernière étape, consiste à déterminer la quantité du solvant condensé dans les pores en fonction de sa pression dans la chambre. Pour cela, l'indice de réfraction du matériau poreux avec solvant $n(P_{rel})$ est utilisé pour remonter à la quantité du solvant qui s'est condensée dans les pores du matériau grâce à une loi d'approximation des milieux effectifs nommé EMA (de l'anglais : Effective Medium Approximation) [73] :

$$V_{solvant}(P_{rel}) = \frac{\frac{n^2(P_{rel}) - 1}{n^2(P_{rel}) + 2} - \frac{n_{vide}^2 - 1}{n_{vide}^2 + 2}}{\frac{n_{solvant}^2 - 1}{n_{solvant}^2 + 2}}$$

Avec :

$V_{solvant}(P_{rel})$: Fraction volumique de solvant condensée dans les pores

$P_{rel} = P / P_s$: Pression relative du solvant dans la chambre

P : Pression dans la chambre

P_s : Pression de vapeur saturante du solvant

$n(P_{rel})$: Indice de réfraction du matériau constituant le réseau (poreux + solvant) à la pression relative P_{rel} et à une longueur d'onde donnée (dans notre cas $\lambda = 633nm$).

$n_{solvant}$: Indice du solvant à la même longueur d'onde donnée.

n_{vide} : Indice du matériau poreux sous vide à la même longueur d'onde donnée.

Notons que les indices de réfraction $n(P_{rel})$ et n_{vide} sont mesurés pour toutes les longueurs d'onde. Cependant, comme l'indice de réfraction du solvant n'est connue qu'à une seule longueur d'onde ($\lambda=633nm$). La fraction volumique du solvant n'est déterminée qu'à cette longueur d'onde. Toutefois, la mesure de l'indice de réfraction du solvant à plusieurs longueurs d'ondes pourra encore améliorer le résultat.

Lorsqu'on atteint la pression du vapeur saturante du solvant ($P_{rel}=1$), tous les pores ouverts sont remplis. En conséquence, la valeur de la fraction volumique du solvant condensé à la pression du vapeur saturante $V_{solvant}(P_{rel} = 1)$ correspond au taux de porosité du matériau (c'est-à-dire le pourcentage des pores dans le matériau poreux).

IV.3 Applications

Nous nous sommes intéressés à deux principales applications de la scatterométrie porosimétrie.

Tout d'abord, la technique est utilisée pour l'estimation de la porosité du matériau poreux après les étapes de fabrication (gravure, lithographie). La porosité est mesurée lorsque tous les pores sont remplis de solvant c'est-à-dire à $P_{rel}=1$. Les mesures scatterométriques faites sur la structure diffractante seront comparées à des mesures ellipsométriques effectuées sur des couches minces.

Ensuite, la technique est utilisée pour l'estimation de l'épaisseur de la couche modifiée sur les flancs du matériau poreux après l'étape gravure et exposition aux différents traitements plasma. A l'heure actuelle seule les mesures par Microscope Electronique à Balayage permettent d'estimer l'épaisseur de la couche modifiée. Cependant ces mesures sont destructives et délicates à réaliser car le matériau poreux SiOCH est modifié par le faisceau d'électrons lors de la mesure. De plus ces mesures nécessitent l'utilisation d'un bain HF 1% pour éliminer la couche modifiée. En gravant le matériau poreux avec un bain HF il se peut que la couche modifiée ne soit pas totalement retirée par le bain. Le bain HF conduit à la formation des résidus sur le TiN qui peut conduire à une contamination des plaques.

IV.3.1 Structure étudiée

Pour cette étude la structure considérée est un réseau périodique de ligne de 180 nm, avec une période de 340nm. L'empilement utilisé est composé de 4nm de TiN sur 125nm de SiO₂ sur 665nm de SiOCH sur substrat de silicium. Le SiOCH est un matériau diélectrique poreux avec un taux de porosité autour de 27% à 29% (mesuré en pleine plaque par ellipsométrie porosimétrie).

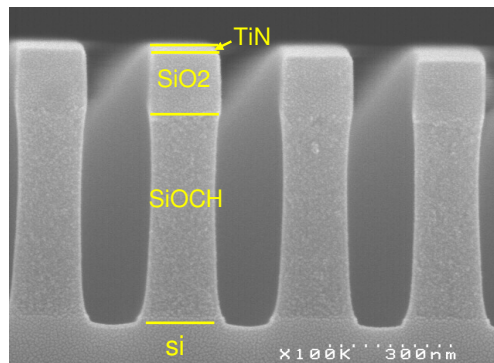


Figure 45 : réseau de ligne étudié pour la validation de la SP

IV.3.2 Etude de la porosité du SiOCH

La validation de la technique de scatterométrie porosimétrie a été effectuée par mesure de la porosité du SiOCH. L'empilement étudié est celui qui est représenté dans la Figure 45. Celui-ci est modélisé par deux modèles approchant la structure réelle (cf. Figure 46). Le profil P1 est un profil parfaitement rectangulaire y compris pour la couche SiOCH. Les paramètres géométriques de l'ensemble des couches de l'empilement sont présentés sur le profil P1. Le profil P2 présente un écart de géométrie par rapport au profil P1 au niveau du SiOCH. La couche SiOCH présente un léger profil rentrant des deux côtés. Cette variation de

profil peut être assimilé à une parabole, cet écart entre le profil parabolique et le profil rectangulaire est maximal à mi-hauteur et vaut ΔCD . Ce profil P2 est considéré car les images MEB d'une section de ligne (cf. Figure 45) montrent un léger resserrement de la largeur du motif SiOCH.

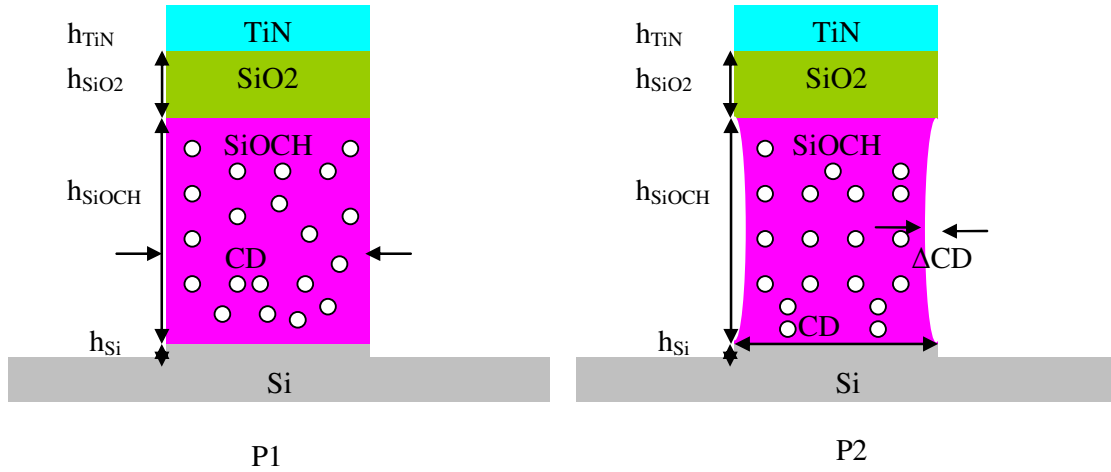


Figure 46 : Différents profil de lignes modélisées par scatterométrie porosimétrique. P1 profil rectangulaire, P2 profil rentrant au milieu représenté par le paramètre ΔCD

	Profil P1	Profil P2	MEB
Période (nm) (fixe)	340	340	340
CD (nm)	183	185	184
h_{TiN} (nm)	4	4	<10
h_{SiO2} (nm)	131	131	125
h_{SiOCH} (nm)	578	580	565
h_{Si} (nm)	19	20	19
ΔCD (nm)		3	4

Tableau 17 : Les paramètres de la structure périodique obtenu par SP et MEB

La première étape consiste à déterminer les paramètres géométriques de la structure étudiée avec les pores vides. Ces paramètres géométriques dans ce cas de figure sont mesurés par scatterométrie dans la chambre sous vide. Seuls les paramètres géométriques de la structure sont considérés variables dans le modèle. Les propriétés optiques de différentes couches sont connues a priori. Les mesures scatterométriques ont été comparées avec des mesures MEB effectuées sur la même structure.

Le Tableau 17 montre les dimensions mesurées par scatterométrie et celles obtenues par MEB. Nous pouvons constater que les dimensions obtenues par les deux techniques sont très proches. Un léger écart subsiste, il est de 1nm sur le CD de 6 sur la hauteur du SiO2 et de

15nm sur la hauteur du SiOCH. L'écart s'explique par l'imprécision de chacune des deux techniques. Le SiOCH est modifié par le faisceau d'électrons lors de la mesure MEB, ce qui rend très délicat la mesure de ce matériau par le MEB. Cela peut expliquer les 15nm de différence entre les deux techniques. On remarque aussi que l'écart entre les valeurs obtenues par le modèle P1 et P2 ne sont pas notables. Cet écart est de l'ordre de 2nm sur le CD et la hauteur de SiOCH, de 1nm sur la hauteur de Si et nulle sur les autres paramètres. Dans la suite de cette étude nous avons choisi de représenter la variation du profil de ligne par le profil P1. Ce choix s'explique par le fait que les deux modèles permettent de représenter la structure, le modèle P1 est plus simple à modéliser avec un nombre de paramètres moins important.

A l'issue de la mesure des paramètres géométriques sous vide, nous procédons à la mesure de la variation de l'indice du matériau poreux. Cette mesure est faite au cours de la montée en pression du solvant (méthanol dans notre cas) dans l'enceinte de mesure. A chaque palier de pression une mesure ellipsométrique est effectuée. Ces mesures sont ensuite exploitées pour déterminer les indices de réfraction du matériau poreux durant le remplissage des pores. La variation de l'indice de réfraction dans la bibliothèque est représentée par l'équation (54) avec une précision de l'ordre de 0.001 sur le paramètre x .

Les résultats obtenus par scatterométrie porosimétrie ont été comparés avec les résultats obtenus par ellipsométrie porosimétrie.

Les études effectuées en pleine plaque montrent que la porosité de la couche modifiée par un traitement plasma est similaire à celle du SiOCH vierge.

La Figure 47 représente le volume de méthanol condensé dans le diélectrique. La Figure 47 (a) représente le résultat obtenu sur des motifs par SP. La Figure 47 (b) représente le résultat obtenu en pleine plaque par EP. Nous pouvons constater que le diélectrique conserve bien sa porosité initiale après l'étape de gravure (de l'ordre de 27% à 29%). Cette porosité est déterminée lorsque tous les pores de diélectriques sont remplis de solvant, c'est-à-dire lorsque la pression relative est égale à 1. Cela montre que la technique peut être utilisée pour la mesure de la porosité des matériaux poreux sur des lignes périodiques. Cette étude confirme que les étapes de gravure ne modifient pas la porosité des matériaux. La méthode a donc été validée par le test. Le résultat montre que la technique est fiable et peut être utilisée pour mesurer la porosité d'un matériau poreux sur des structures périodiques.

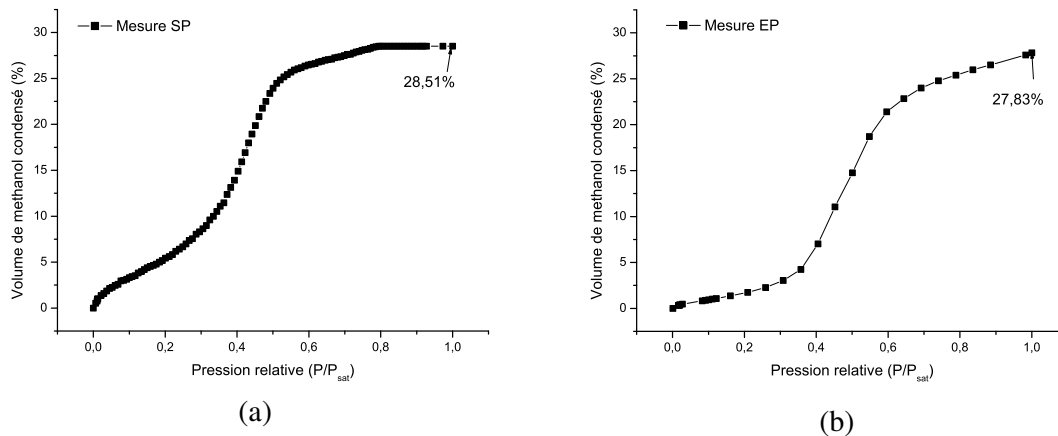


Figure 47 : Mesure de la fraction de solvant condensé dans le SiOCH. (a) le résultat obtenu sur des lignes périodique avec SP, (b) le résultat obtenu en pleine plaque avec l'EP.

La Figure 48 présente la vitesse de condensation du méthanol dans les pores : en noir le résultat obtenu sur des lignes périodiques par SP, en rouge le résultat obtenu en pleine plaque par EP.

En partant de la chambre sous vide, le solvant est injecté dans la chambre puis la pression est augmentée rapidement dans la chambre pour atteindre une pression inférieure à la pression de vapeur saturante mais supérieure à la pression de condensation du méthanol dans les pores (typiquement 0,8 Ps). Des mesures EP et SP sont effectuées à intervalle de temps régulier ce qui permet d'avoir accès à la cinétique de diffusion du solvant dans le matériau poreux. On constate que la condensation du solvant en pleine plaque est différente de celle observée sur des profils de lignes périodiques. On remarque une condensation plus rapide du solvant dans les pores lorsque le SiOCH est sous forme d'empilement de ligne. Cela peut être dû au bombardement ionique durant l'étape de gravure qui peut conduire à l'hydrophilisation des flancs des motifs. Cette différence de condensation du solvant dans les pores met en évidence l'importance de la scatterométrie porosimétrique pour la caractérisation de la porosité sur des profils de lignes périodiques. Dans la suite nous allons présenter un moyen de mesurer l'épaisseur de la couche modifiée sur les flancs des motifs après gravure.

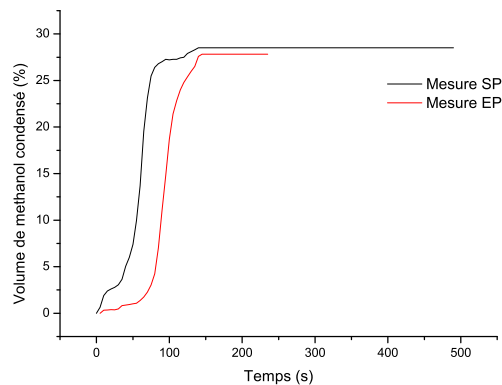


Figure 48 : Vitesse de perméation du méthanol dans les pores après étape gravure : en noir le résultat obtenu sur des lignes périodique par SP, en rouge le résultats obtenu en pleine plaque par EP.

IV.3.3 Etude de la modification des flancs du SiOCH

Dans le cas des matériaux denses, les réactions chimiques plasma/surface ont lieu à la surface du matériau. Avec les matériaux poreux, les espèces réactives du plasma peuvent diffuser dans les pores connectés à la surface. Les réactions chimiques lors de la gravure peuvent alors se passer plus en profondeur dans le matériau, ce qui entraîne une hydrophilisation des pores. L'humidité de l'air peut alors être condensée dans les pores hydrophiles conduisant à une diminution des performances du produit final.

Ces modifications peuvent bien sur être limitées en ajustant la composition du plasma mis en jeu pendant la gravure. Cependant, il est important de mesurer l'impact du plasma sur les flancs du diélectrique poreux.

A l'heure actuelle, très peu de techniques ont été développées pour caractériser la modification du diélectrique sur les flancs. De rares études se sont intéressées à la composition de la surface des flancs par XPS (x-ray photoelectron spectroscopy) en utilisant la technique topographique chimique [28, 54]. Dans ces études la modification du flanc du

SiOCH ne peut pas être totalement discriminée par rapport à la modification du masque TiN et SiO₂.

D'autres études observent la signature scatterométrique mesurée à l'aide d'un ellipsomètre avec de l'eau sur les flancs du profil de ligne. Une variation de la signature en fonction de la pression partielle de l'eau indique qu'une partie du volume de SiOCH poreux est hydrophile, ce qui veut dire qu'une partie du SiOCH est modifiée et l'interprétation s'arrête là [64].

Dans cette partie nous présentons l'application de la scatterométrie porosimétrique à la mesure de l'épaisseur de la couche modifiée sur les flancs. Nous avons étudié la modification du SiOCH poreux sur les flancs après gravure et différents traitements post gravure. Pour cela, nous avons utilisé de l'eau comme solvant afin de déterminer le volume des pores hydrophiles sur les flancs du diélectrique. L'utilisation de l'eau s'explique par le fait que :

- La couche modifiée sur les flancs du SiOCH est hydrophile alors que le SiOCH non modifié est hydrophobe. D'où l'utilisation de l'eau qui ne se condense que dans la partie hydrophile, à l'inverse du méthanol qui aura tendance à se condenser partout.
- L'indice optique de la couche hydrophile est très peu différent de l'indice de réfraction du SiOCH (cf. Figure 49). Par contre l'indice réfraction du SiOCH avec les pores remplis d'eau est très différent de l'indice du SiOCH. Cela permettra d'avoir un contraste d'indice plus important, qui permettra de mesurer l'épaisseur de la couche modifiée avec une plus grande sensibilité.

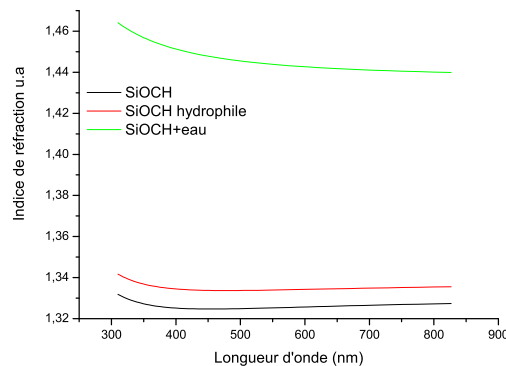


Figure 49 : l'indice de réfraction du SiOCH ainsi que l'indice de réfraction du SiOCH hydrophile et du SiOCH hydrophile avec les pores remplis d'eau.

La modélisation de l'épaisseur de la couche modifiée sur les flancs du diélectrique est effectuée en considérant un modèle tri-couche (cf. Figure 50). La couche centrale est considérée comme étant une couche non modifiée. Elle a pour indice optique celle de SiOCH sous vide. Quant à la couche hydrophile, elle a comme indice celle d'une couche modifiée dont les pores hydrophiles sont complètement remplis d'eau. Les mesures scatterométriques sont effectuées à une pression ($0,99 P_{\text{sat}}$) où l'eau est condensée dans tous les pores hydrophiles sur les flancs des lignes de SiOCH. Seuls les paramètres géométriques et l'épaisseur de la couche modifiée sont considérés variables dans le modèle. Les résultats de la scatterométrie porosimétrique seront comparés avec des mesures MEB effectuées sur la même structure. Ces mesures MEB sont effectuées avant et après un bain HF (1%) qui permet d'éliminer la couche hydrophile sur les flancs.

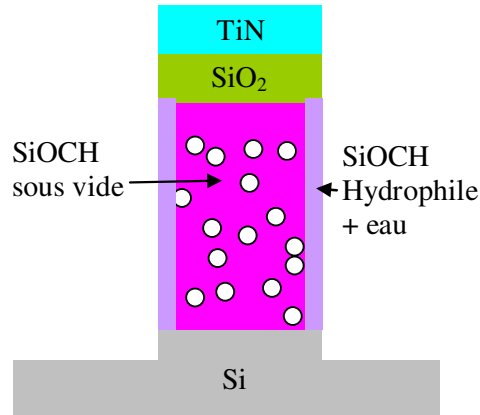


Figure 50 : Modèle scatterométrique utilisé pour estimer l'épaisseur des couches hydrophiles

Les deux chimies de plasma présentées ici ont été développées par l'équipe Back end de notre laboratoire pour minimiser la modification du SiOCH poreux. Les conditions expérimentales sont :

- NH₃: 200mTorr/ 500 Ws / 500sccm /30s.
- H₂/Ar : 20mTorr /500 Ws / (50 :150 sccm) 30s.

L'impact de ces chimies sur les matériaux poreux ne sera pas discuté dans cette thèse. Le lecteur pourra trouver une présentation plus détaillée de ces travaux ailleurs [23, 17].

La comparaison entre les mesures scatterométriques et les mesures MEB (cf. Tableau 18) montrent une bonne corrélation entre les deux techniques, avec une différence maximale de l'ordre de 2nm. Cette différence est inférieure à la précision du MEB utilisée qui est de l'ordre de 5nm. Toutefois, la technique de la SP a l'avantage d'être non destructive et rapide. A l'inverse, les mesures MEB nécessitent un clivage (découpage de la plaquette de silicium) et l'utilisation d'un bain HF (1%) pour éliminer la couche modifiée

Procédé	SP (nm)	MEB (nm)
Après étape gravure	10	8
Après étape gravure+H ₂ /Ar	2	0
Après étape gravure+NH ₃	22	20

Tableau 18 : Epaisseur de la couche hydrophile estimée en utilisant SP et MEB

Dans le modèle scatterométrique nous avons modélisé l'épaisseur de la couche modifiée sur les flancs avec une épaisseur uniforme. Dans les faits, la modification des flancs en haut et en bas du profil de ligne peut être différente en raison du bombardement ionique. D'autre part, il se peut que la couche modifiée sur les flancs ne soit pas totalement hydrophile. Un gradient situé à l'interface SiOCH modifié/ SiOCH non modifié n'est pas non plus pris en compte dans notre modèle simple.

Malgré ces hypothèses réductrices la technique de la SP reste la technique la plus pertinente à l'heure actuelle pour estimer l'épaisseur moyenne de la couche hydrophile sur les

flancs du SiOCH ou du moins le volume de pores hydrophiles. Elle peut par ailleurs être raffinée facilement pour prendre en compte ces effets.

IV.3.4 Impact du choix du modèle

Les résultats obtenus après l'étape gravure montrent la présence d'une couche hydrophile d'épaisseur de 10nm sur les deux côtés du flanc de ligne (cf. Tableau 18). Cette couche hydrophile est due à l'étape de gravure. Or, lors de la détermination des paramètres géométriques de la structure (cf. paragraphe IV.3.2), la présence de cette couche modifiée n'est pas prise en considération dans le modèle. Quel sera l'impact de la présence de cette couche hydrophile sur les résultats scatterométriques ?

Nous avons utilisé la méthode de propagation des variances (cf. chapitre II) pour estimer les incertitudes de mesures sur les paramètres géométriques de la structure. Les sources d'incertitudes sont la présence d'une couche modifiée sur les flancs du motif non prise en considération dans le modèle. Nous considérons que cette couche peut être soit de type SiOCH hydrophile soit de type SiOCH avec les pores remplis d'eau.

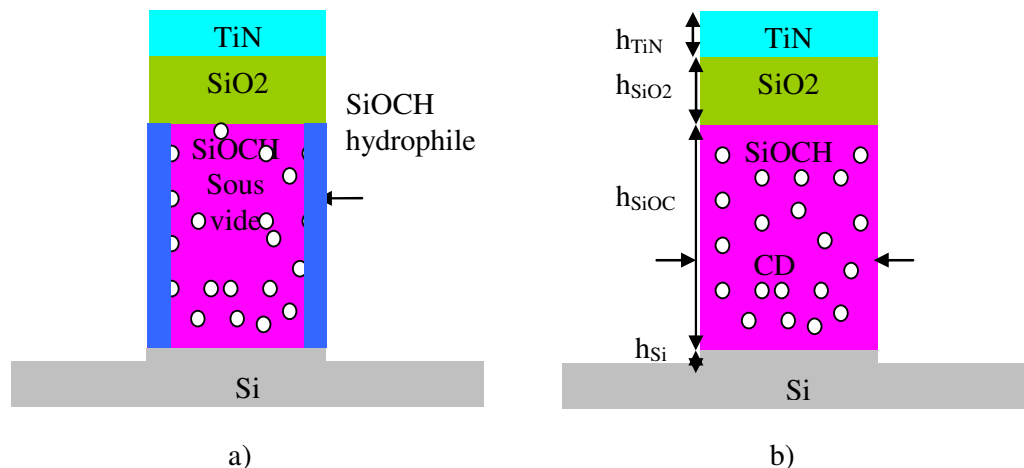


Figure 51 : Etude des incertitudes de mesure : (a) représente la structure réelle, (b) représente la structure modélisée.

La Figure 51 présente le module réel (a) et le module modélisé (b). Les indices de réfraction des trois matériaux SiOCH, SiOCH hydrophile et SiOCH+eau sont donnés sur la Figure 49.

Les paramètres géométriques de la structure sont ceux obtenus précédemment pour le profil P1 (cf. Tableau 17).

Les incertitudes de mesure sur les paramètres géométriques dues à la présence de la couche hydrophile d'une épaisseur de 10nm sont reportées dans le Tableau 19. On remarque que pour une épaisseur de la couche hydrophile de l'ordre de 10nm l'erreur commise sur le CD et la hauteur du SiOCH sont de l'ordre de 1.4nm (c'est-à-dire une erreur relative de l'ordre de 0.8% et de 0.3% respectivement). L'erreur sur les autres paramètres est inférieure à 1nm. Cette erreur est de l'ordre de la précision dans la bibliothèque. Pour cela, l'impact de la présence de la couche hydrophile sur les flancs des motifs sur les résultats scatterométriques peut être considéré négligeable.

On remarque aussi que dans le cas de la présence d'une couche sur les flancs de type SiOCH+eau les incertitudes de mesures sont plus importantes. Par exemple pour une épaisseur de couche modifiée de type SiOCH+eau de 10nm, l'incertitude sur le CD est de 6.8nm alors que dans le cas d'une couche hydrophile cette incertitude est de 1.4nm.

	ΔCD (nm)	ΔH_{TiN} (nm)	ΔH_{SiO_2} (nm)	ΔH_{SiOCH} (nm)	ΔSi (nm)
Couche de type SiOCH+eau de 10nm	6,80	0,24	4,21	8,62	4,02
Couche de type SiOCH hydrophile de 10nm	1,34	0,06	0,89	1,4	0,61

Tableau 19 : Incertitude de mesure sur les paramètres géométrique due à la présence d'une couche modifiée sur les flancs du motif de ligne

L'étude de sensibilité globale effectuée sur la structure Figure 51 (b) montre une sensibilité de 6.5 nm^{-1} dans le cas d'une couche modifiée de type hydrophile et une sensibilité de 60 nm^{-1} lorsque la couche modifiée est remplie d'eau. La faible sensibilité à la présence de la couche hydrophile rend la mesure de cette couche avec précision délicate. Cela explique la faible erreur commise sur les paramètres de la structure lorsque la couche hydrophile n'est pas incluse dans le modèle. Cela montre qu'il sera très difficile de distinguer un matériau SiOCH hydrophile et hydrophobe en utilisant la scatterométrie porosimétrie. Cependant, lorsque le contraste d'indice est grand entre la couche modifiée et la couche non modifiée du SiOCH (cas couche modifiée remplie d'eau) nous constatons une bonne sensibilité à la présence de la couche modifiée sur les flancs. D'où l'intérêt de remplir les pores du matériau de l'eau afin d'avoir un contraste d'indice plus fort.

IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre, le principe de la technique de scatterométrie porosimétrie a été présenté. Cette technique permet la caractérisation des matériaux poreux utilisés dans les interconnexions en microélectronique après gravure et post traitement. Elle permet à la fois de mesurer la porosité et les dimensions de la structure. Elle a également l'avantage d'être non destructive et rapide.

Au début, nous avons appliqué la technique à la mesure du taux de porosité du matériau SiOCH gravé sous forme de réseau de ligne. Cette étude a mis en évidence le changement de comportement d'absorption du solvant dans le cas d'un empilement de motif périodique par rapport au cas pleine plaque. La technique de scatterométrie a permis également de montrer que la porosité du matériau utilisé dans cette étude n'est pas affectée par les étapes de fabrication technologique du réseau.

Nous avons également montré que la scatterométrie porosimétrie est une des rares techniques permettant la mesure de l'épaisseur moyenne de la couche modifiée sur les flancs après un traitement plasma. Nous avons constaté la limitation de la technique pour mesurer les couches hydrophiles. Un protocole de mesure a été proposé pour distinguer les couches

hydrophiles à des couches hydrophobes. Il consiste à remplir la couche hydrophile d'eau qui rend plus facile la mesure.

Les travaux effectués au cours de cette thèse permettent de valider la technique sur des structures avec une seule couche poreuse. Nous envisageons à court terme l'étude de structures plus complexes contenant un empilement de plusieurs couches poreuses avec des taux de porosité différents.

Conclusion

Nous avons présenté une méthode de caractérisation optique non destructive, capable d'être utilisée pour le contrôle *in situ* et en temps réel du procédé de fabrication d'objets nanométriques. Elle est basée sur le couplage d'une mesure ellipsométrique à la résolution d'un problème inverse. La méthode retenue pour la résolution du problème inverse est la méthode des bibliothèques. Cette méthode est très largement utilisée dans le milieu industriel. L'utilisation des GPU pour accélérer le traitement du problème inverse nous a permis d'avoir un outil puissant compatible avec la contrainte du temps réel.

Au cours de cette thèse, nous avons validé l'utilisation de la scatterométrie en temps réel pour le suivi du procédé de réduction de cote résine (resist trimming). La technique a d'abord été validée avec succès sur des résines 248nm dans différentes conditions expérimentales. Puis sur des résines 193nm. Le cas de ces résines est plus intéressant d'un point de vue industriel, mais il est plus délicat à mettre en œuvre puisque les indices des matériaux mis en jeu change sous l'effet du plasma. Ces indices doivent donc être considérés comme des paramètres variables dans le modèle utilisé pour la résolution du problème inverse. La comparaison des résultats scatterométriques et des mesures CD AFM (considérées dans cette thèse comme les mesures de référence) montrent un accord excellent. La technique de scatterométrie se positionne comme une technique très prometteuse pour le suivi en temps réel des procédés de fabrication dans l'industrie de la microélectronique, à condition de pouvoir augmenter le niveau de complexité du modèle afin d'étudier des structures réelles.

Un autre axe important des travaux menés dans cette thèse est le développement d'une méthode pour l'estimation des incertitudes de mesure. Cet aspect répond à une exigence en matière de précision. La taille des composants diminue, il devient donc nécessaire de connaître les sources d'erreur, d'estimer leur influence afin de pouvoir la réduire. Cette méthode permet d'identifier les principales sources d'incertitudes qui peuvent limiter la précision de la mesure. Nous avons mis en évidence l'importance de la détermination précise de l'indice optique des matériaux pour réduire l'erreur systématique induite par le modèle. Nous avons montré que les incertitudes sur les paramètres liées aux erreurs sur les indices optiques des matériaux sont de l'ordre de quelques pourcents des valeurs nominales des paramètres. Cette étude est une étape importante pour assurer la qualité des résultats scatterométriques.

L'étude de la sensibilité a permis d'évaluer les paramètres les plus influents dans le modèle. Nous sommes capable de générer un modèle plus léger pour représenter la structure réelle et ainsi d'éviter le sur-paramétrage la plupart du temps pénalisant en terme d'incertitude. L'étude de sensibilité est une étape importante qui permet d'ajuster le paramétrage du modèle et également d'évaluer dans quelle limite les paramètres du profil sont mesurables.

Nous avons également mis au point une technique originale pour la mesure de la porosité des matériaux poreux en utilisant la scatterométrie. Cette technique appelée scatterométrie porosimétrique permet à la fois de déterminer la porosité, la perméation de la surface et l'épaisseur de la couche hydrophile sur les flancs. Elle est basée sur l'utilisation d'une mesure ellipsométrique couplée avec une analyse scatterométrique adaptée. Nous avons appliqué cette technique à la caractérisation du matériau poreux SiOCH. Ce matériau est très

largement utilisé pour l'isolation des interconnexions de cuivre en technologie CMOS. La technique a montré sa capacité de mesurer à la fois la porosité et l'impact des étapes de technologie sur le matériau poreux. Elle est utilisée pour déterminer l'épaisseur de la couche modifiée sur les flancs en utilisant un solvant adapté « l'eau ». Elle suscite un grand intérêt de la part des acteurs de l'industrie de la microélectronique et a fait l'objet d'un brevet déposé en collaboration avec le LETI.

Ce travail de thèse est donc une étape supplémentaire dans le développement d'un outil de métrologie optique, non destructif et orienté vers des applications temps réel. Nous avons montré sa puissance et validé son utilisation sur des cas proches des contraintes industrielles. Plusieurs perspectives sont envisagées pour poursuivre les travaux menés durant cette thèse. Elles s'orientent essentiellement sur la validation de la technique sur des empilements plus complexes.

La première concerne la multiplication des paramètres. Tous les paramètres nuisibles à la qualité de la mesure doivent être étudiés et pris en considération. En particulier le problème de changement d'indice des matériaux durant le procédé et ainsi que le problème de corrélation entre les différents paramètres du profil.

La deuxième concerne le problème direct. La méthode retenue pour résoudre le problème inverse impose le calcul d'une base de données « bibliothèque ». Cette base est constituée d'un nombre très important de signatures calculées par la MMFE. Plus le procédé étudié sera complexe plus la taille de la bibliothèque sera grande. Cela va engendrer une augmentation du temps de calcul, d'où la nécessité de développer des nouvelles approches pour le calcul de la bibliothèque. Nous pouvons envisager l'utilisation d'une méthode d'interpolation (méta-modèle) peut permettre de construire une bibliothèque de manière beaucoup plus économique en minimisant les appels au calcul électromagnétique rigoureux, très gourmand en temps de calcul. La nécessité est d'autant plus pressante si on veut utiliser des bibliothèques avec plus de paramètres ou mesurer des motifs tri-dimensionnels.

Enfin, d'autres approches seront étudiées pour résoudre le problème inverse en temps réel, en particulier l'approche neuronale. Cette approche fera l'objet d'une thèse qui étudiera l'apport du réseau de neurone pour résoudre le problème inverse en temps réel.

Bibliographie

- [1] AN. Tikhonov and VA Arsenin. *Solution of Ill-posed Problems*. 1977.
- [2] BIPM, IEC,IFCC, ILAC,ISO, IUPAC,IUPAP and OIML, *Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” Propagation of distributions using a Monte Carlo method* 2006.
- [3] D. Marshall. *Nearest neighbour searching in high dimensional metric space*. Master thesis, Australian National University - Department of Computer Science, 2006.
- [4] H. G. Tompkins. *A user’s guide to ellipsometry* Published 1993 by Academic Press in Boston .
- [5] H. G. Tompkins and W.A.McGahan. *Spectroscopic Ellipsometry and Reflectometry. A user’s guide*. Academic Press, New York, 2005.
- [6] <http://www.itrs.net/>.
- [7] *International vocabulary of basic and general terms in metrology (VIM), second edition, 1993, International Organization for Standardization (Geneva, Switzerland)*.
- [8] J.M.E. Harper, *Ion beam etching*, in D.M. Manos and D.L. Flamm (eds.) Academic Press, San Diego, 391-423 (1989).
- [9] K. Madsen, H.B. Nielsen, and O. Tingleff. *Methods for Non-Linear Least Squares Problems*. Technical University of Denmark, 2004.
- [10] *La nonolithographie sous la direction de stephan Landis Lavoisier* 2010.
- [11] *Unified advanced Optical Critical Dimension (OCD) scatterometry specification for sub-65nm Technology (version 2008) International SEMATECH Manufacturing Initiative* <http://ismi.sematech.org>.
- [12] V. Farys. *Validation d’une technique de contrôle dimensionnelle par voie optique*. Rapport de stage, CNRS/LTM.
- [13] C. Schneider L. Pfitzner A. Hettwer, N. Benesch and H. Ryssel. *Phi-scatterometry for integrated linewidth and process control in dram manufacturing*. *IEEE Trans. on semiconductor manufacturing*, 15:470–478, 2002.
- [14] R. M. Al-Assaad and D. M. Byrne. *Error analysis in inverse scatterometry. i. modeling*. *J. Opt. Soc. Am. A*, 24:326–338, 2007.
- [15] D. E. Aspnes and A. A. Studna. *High precision scanning ellipsometer*. *J. Opt. Soc. Am. A*, 14:220, 1975.

[16] M. T. Bohr. Interconnect scaling - the real limiter to high performance. In *IEEE International Electron Devices Meeting, Washington, Dc.*, 1995.

[17] R. BOUYSSOU. *Traitements plasmas Post Gravure pour l'intégration des matériaux SiOCH poreux dans les interconnexions en microélectronique*. PhD thesis, Université JOSEPH FOURIER de Grenoble, 2009.

[18] C. Rivas C. A. Mack, D. Harrison and P. Walsh. Impact of thin film metrology on the lithographic performance of 193nm bottom antireflective coatings. *Proc. SPIE*, 6518:65181C, 2007.

[19] D. Sweeney C. Gwyn, R. Stulen and D. Attwood. Extreme ultraviolet lithography. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 16:3142, 1998.

[20] S. L. Prins S. Sohail H. Naqvi J. R. McNeil C. J. Raymond, M. R. Murnane and J. W. Hosch. Multiparameter grating metrology using optical scatterometry. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 15:361–369, 1997.

[21] S. Sohail H. Naqvi C. J. Raymond, M. R. Murnane and J. R. McNeil. Metrology of subwavelength photoresist gratings using optical scatterometry. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 13:1484–1496, 1995.

[22] S. Zangoie C. Wongmanerod and H. Arwinc. Determination of pore size distribution and surface area of thin porous silicon layers by spectroscopic ellipsometry. *J. Appl. Sur.Sci.*, 172:117–125, 2001.

[23] M. DARNON. *Les Procédés par Plasmas Impliqués dans l'Intégration des Matériaux SiOCH Poreux pour les Interconnexions en Microélectronique*. PhD thesis, Université JOSEPH FOURIER de Grenoble, 2007.

[24] J. N. M. de Nijs and A. van Siflhout. Systematic and random errors in rotating analyzer ellipsometry. *J. Opt. Soc. Am. A*, 5:773, 1988.

[25] J. W. Denneman. Determination of electromagnetic properties of low-pressure electrodeless inductive discharges. *J. Phys. D.*, 23:293, 1990.

[26] S. Poirier E. Compain and B. Drevillon. General and self-consistent method for the calibration of polarization modulators, polarimeters, and mueller-matrix ellipsometers. *J. App. Opt.*, 38:3490–3502, 1999.

[27] M. Martin A. Bazin O. Chaix-Pluchery C. Sourd S. Derrough T. Lill E. Pargon, K. Menguelti and O. Joubert. Mechanisms involved in hbr and ar cure plasma treatments applied to 193 nm photoresists. *J. Appl. Phys.*, 105:094902–1, 2009.

[28] S. Xu E. Pargon, O. Joubert and T. Lill. Characterization of resist-trimming processes by quasi in situ x-ray photoelectron spectroscopy. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 22:1869–1879, 2004.

-
- [29] T. Chevolleau G. Cunge S. Xu E. Pargon, O. Joubert and T.Lill. Mass spectrometry studies of resist trimming processes in hbr/o2 and cl2/o2 chemistries. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 23:103–112, 2005.
- [30] C. Gerber G. Binnig, C. F. Guate. The atomic force microscope. *Phy. Rev. Lett.*, 56:930–933, 1985.
- [31] Jr. G. E. Jellison and F. A. Modine. Parameterization of the optical functions of amorphous materials in the interband region. *J. Appl. Phys. Lett*, 69:371–373, 1996.
- [32] V.I. Merkulov A.A. Poretzky D.B. Geohegan-G. Eres D.H. Lowndes J.B. Caughman G.E. Jellison Jr, U. Characterization of thin-film amorphous semiconductors using spectroscopic ellipsometry. *Thin Solid Films*, 68:377–378, 2000.
- [33] I. Gereige. *Contribution des réseaux de neurones dans le domaine de l'ellipsométrie : Application à la scatterométrie*. PhD thesis, Université de Saint Etienne, 2008.
- [34] G. Granet and B. Guizal. Really efficient implementation of the coupled-wave method for metallic lamellar gratings in tm polarization. *J. Opt. Soc. Am. A*, 13:1019–1023, 1996.
- [35] J. W. Coburn H. F. Winters and T. J. Chuang. Surface processes in plasma-assisted etching environments. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 1:496, 1983.
- [36] F Scholze H Gross, A Rathsfeld and M Bär. profile reconstruction in extreme ultraviolet (euv) scatterometry: modeling and uncertainty estimates. *Measurement science and technology*, 20:105102, 2009.
- [37] M. W. Cresswell R. A. Allen R. G. Dixon H. J. Patrick, T. A. Germer and M. Bishop. Modeling and analysis of scatterometry signatures for optical critical dimension reference material applications. *Proc. AIP*, 931:392–396, 2007.
- [38] P. Thony D. herisson G. Garcia O. Lartigue J. Hazart, G. Grand. Spectroscopic ellipsometric scatterometry: sources of errors in critical dimension control. *Proc. SPIE*, 5041:9–20, 2003.
- [39] W. A. McGahan M. V. Dusa J. M. Holden, T. Gubiotti and T. Kiers. Normal-incidence spectroscopic ellipsometry and polarized reflectometry for measurement and control of photoresist critical dimension. *Proc. SPIE*, 4689:1110–1121, 2002.
- [40] J. Leng L. Weia C. Uhrich M. Senko C. Zaiser J. Opsal, U. J. Fanton J. Chen and D.E. Aspnes. Broadband spectral operation of a rotating-compensator ellipsometer. *Thin Solid Films*, 313:58– 61, 1998.
- [41] D. G. Squire J. P. Beasley. An electron beam maskmaker. *IEEE Trans. on Elec. Dev*, 22:409, 1975.

[42] T. Leroux P. Barritault J. Hazart J. Petit, P. Boher and P. Chaton. Improved cd and overlay metrology using an optical fourier transform instrument. *Proc. SPIE*, 5742:41, 2004.

[43] R. Grigorovici J. Tauc and A. Vancu. Optical properties and electronic structure of amorphous germanium. *J. phys. stat. sol.*, 15:627–637, 1966.

[44] S. N. Jaspersen and S. E. Schnatterly. An improved method for high reflectivity ellipsometry based on a new polarization modulation technique. *Rev. Sci. Instrum.*, 40:761–767, 1969.

[45] W. Willie H. Jacky H. L. Chung C. R. Liang V. Shih H.H. Liu H.J. Lee J. Lin Y.D. Fan T. Yen N. Wright R.A. Sanchez W. Coene M. Noot K. Yuan V. Wang K. Bhattacharyya K. Chih-Ming, H. Jimmy and M.K. Van der. A scatterometry based cd metrology solution for advanced nodes, including capability of handling birefringent layers with uniaxial anisotropy. In *Proc. SPIE*, 2009.

[46] D. Shamiryani F. Iacopi S. H. Brongersma K. Maex, M. R. Baklanov and Z. S. Yanovitskaya. Low dielectric constant materials for microelectronics. *J. Appl. Phys.*, 93:8793–8813, 2003.

[47] P. Lalanne and G. M. Morris. Highly improved convergence of the coupled wave method for tm polarization. *J. Opt. Soc. Am. A*, 13:779–784, 1996.

[48] K. Levenberg. A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. *Quarterly of Applied Mathematics*, 2:164–168, 1944.

[49] L. Li. Use of fourier series in the analysis of the discontinuous structures. *J. Opt. Soc. Am. A*, 13:1870–1876, 1996.

[50] L. Li and C.W. Haggans. Convergence of the coupled-wave method for metallic lamellar diffraction gratings. *J. Opt. Soc. Am. A*, 10:1184, 1993.

[51] J. B. Lin. Optical lithography - present and future challenges. *C. R. Physique*, 7:856–874, 2006.

[52] P. C. Logofătu. Uv scatterometry. *Proc. SPIE*, 5038:0277, 2003.

[53] D. E. Ibbotson M. Cook and D. L. Flamm. Application of a low-pressure radio frequency discharge source to polysilicon gate etching. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 8:1, 1990.

[54] D. Eon R. Bouyssou B. Pelissier L. Vallier O. Joubert N. Posseme T. David F. Bailly M. Darnon, T. Chevolleau and J. Torres. Patterning of narrow porous sioch trenches using a tin hard mask. *Microelectronic Engineering*, 85:2226–2235, 2008.

[55] E. Garcia-Caurel R. Ossikovski C. Licitra F. Bertin K. Postava M. Foldyna, A. De Martino and B. Drevillon. Critical dimension of biperiodic gratings determined by spectral ellipsometry and mueller matrix polarimetry. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, 42:351–359, 2008.

-
- [56] V. G. Polovinkin M. R. Baklanov, K. P. Mogilnikov and F. N. Dultsev. Determination of pore size distribution in thin films by ellipsometric porosimetry. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 18:1385–1391, 2000.
- [57] D.W. Marquardt. An algorithm for the least-squares estimation of nonlinear parameters. *J. Appl. Math.*, 11:431–441, 1963.
- [58] M. Moharam. Coupled-wave analysis of two-dimensional dielectric gratings. *Proc. SPIE*, 883:8–11, 1988.
- [59] M. G. Moharam and T. K. Gaylord. Rigorous coupled-wave analysis of planargrating diffraction. *J. Opt. Soc. Am. A*, 71:811–818, 1981.
- [60] M. G. Moharam and T. K. Gaylord. Dffraction analysis of dielectric-surface relief gratings. *J. Opt. Soc. Am. A*, 72:1385–1392, 1982.
- [61] M. G. Moharam and T. K. Gaylord. Rigorous coupled-wave analysis of planargrating diffraction - e-mode polarization and losses. *J. Opt. Soc. Am. A*, 73:451–455, 1983.
- [62] M. G. Moharam and T. K. Gaylord. Three dimensional vector-coupled wave analysis of planar grating diffraction. *J. Opt. Soc. Am. A*, 73:1105–1112, 1983.
- [63] M. G. Moharam and T. K. Gaylord. Rigorous coupled wave analysis of metallic surface-relief gratings. *J. Opt. Soc. Am. A*, 3:1780–1796, 1986.
- [64] T. David M. Darnon J.P. Barnes O. Louveau C. Licitra D. Jalabert H. Feldis M. Fayolle N. Posseme, T. Chevolleau and O. Joubert. Efficiency of reducing and oxidizing ash plasmas in preventing metallic barrier diffusion into porous sioch. *Microelectronic Engineering*, 85:1842–1849, 2008.
- [65] J. A. Nelder and R. Mead. A simplex method for fonction minimization. *Computer Journal*, 7:308–313, 1965.
- [66] J. R. McNeil P. C. logofātu. Sensitivity analysis of fitting for scatterometry. *Proc. SPIE*, 3677:177–184, 1999.
- [67] J. R. McNeil P. C. logofātu. Measurement precision of optical scatterometry. *Proc. SPIE*, 4344:447453, 2001.
- [68] D. Laidler D. Koen P. Leray, C. P. Shaunee and A. L. Charley. Scatterometry metrology validation with respect to process control. In *Proc. SPIE*, 2010.
- [69] E. PARGON. *Analyse des mécanismes mis en jeu lors de l'élaboration par gravure plasma de structures de dimensions déca-nanométriques : Application au transistor CMOS ultime*. PhD thesis, Universite JOSEPH FOURIER de Grenoble, 2004.
- [70] H. J. Patrick and T. A. Germer. Progress towards traceable nanoscale optiale critical dimension metrology for semiconductors. *Proc. SPIE*, 6672:66720L, 2007.

[71] P. Drude. Ueber die Gesetze der Reflexion und Brechung des Lichtes an der Grenze absorbirender Krystalle. *J. Ann. Phys.*, 268:584–625, 1887.

[72] R. Quintanilha. *Etude du problème inverse en diffractométrie spectroscopique: application à la métrologie dimensionnelle en microélectronique*. PhD thesis, INPG Grenoble, 2005.

[73] C. Licitra T. Chevolleau M. Besacier N. Posseme O. Joubert R. Bouyssou, M. El Kodadi and P. Schiavone. Scatterometric porosimetry: A new characterization technique for porous material patterned structures. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 28:L31–L34, 2010.

[74] K. Rokushima and J. Yamakita. Analysis of anisotropic dielectric gratings. *J. Opt. Soc. Am. A*, 73:901–908, 1983.

[75] E. A. Edelberg L. B. Braly V. Vahedi S. J. Ullal, A. R. Godfrey and E. S. Aydil. Maintaining reproducible plasma reactor wall conditions: SF₆ plasma cleaning of films deposited on chamber walls during Cl₂/O₂ plasma etching of Si. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 20:43, 2002.

[76] M. Sendelbach and C. Archie. Scatterometry measurement precision and accuracy below 70 nm. *Proc. SPIE*, 5038:0277, 2003.

[77] P. Sigmund. Theory of sputtering. i. sputtering yield of amorphous and polycrystalline targets. *J. Phys. Rev.*, 184:383–416, 1969.

[78] S. Soulan. *Développement de la scatterométrie dynamique pour le suivi en temps réel de procédés application à la microélectronique*. PhD thesis, Université JOSEPH FOURIER de Grenoble, 2008.

[79] S. Xu S. Pan and D. Podlesnik. Decoupled plasma source technology: Process region choices for silicide etching. *J. Appl. Phys.*, 36:2514, 1997.

[80] M. Stchakovsky. *Conception et réalisation d'un ellipsomètre spectroscopique à modulation de phase. Application à l'étude d'interfaces de matériaux en couches minces*. PhD thesis, Université de Paris-Sud centre d'Orsay, 1991.

[81] E. SUNGAUER. *Étude et développement de procédés de gravure plasma de HfO₂ pour l'élaboration de transistors CMOS sub-45 nm*. PhD thesis, Université JOSEPH FOURIER de Grenoble, 2009.

[82] P. R. Krauss S. Y. Chou and P. J. Renstrom. Imprint of sub-25nm vias and trenches in polymers. *J. Appl. Phys. Lett.*, 67:3113, 1995.

[83] J. H. Kim T. A. Germer, G. W. Mulholland and S. H. Ehrman. Measurement of the 100 nm NIST SRM 1963 by laser surface light scattering. *Proc. SPIE.*, 4779:60–71, 2002.

[84] R. M. Silver T. A. Germer, H. J. Patrick and B. Bunday. Developing an uncertainty analysis for optical scatterometry. *Proc. SPIE*, 7272:7272, 2009.

-
- [85] C.M. Chiu T. F. Yen and K.-F. Chiu. Photo-resist trimming for sub 0.1 μm generation integrated circuit devices by Cl_2/O_2 transform coupled plasma. *J. Microelectronic Engineering*, 75:201–209, 2004.
- [86] V. A. Ukraintsev. A comprehensive test of optical scatterometry readiness for 65-nm technology production. *Proc. SPIE*, 6152:6152–52, 2006.
- [87] T. Lii R. A. Jackson V. A. Ukraintsev, M. C. Tsai. Transition from precise to accurate critical dimension metrology. *Proc. SPIE*, 6518:6581, 2007.
- [88] Y. J. van der Meulen and N. C. Hien. Design and operation of an automated, high-temperature ellipsometer. *J. Opt. Soc. Am. A*, 64:804, 1974.
- [89] P. VOISIN. *Lithographie de nouvelle génération par nanoimpression assistée par UV : étude et développement de matériaux et procédés pour l'application microélectronique*. PhD thesis, Université JOSEPH FOURIER de Grenoble, 2004.
- [90] W. T. Vetterling W. H. Press, S. A. Teukolsky and B. P. Flannery. *Numerical Recipes in C The Art of Scientific Computing Second Edition*. Cambridge University press Cambridge New York Port Chester Melbourne Sydney, 1992.
- [91] F. Xu and K. Mueller. Accelerating popular tomographic reconstruction algorithms on commodity pc graphics hardware. *J. Nuclear Science IEEE Transactions*, 52:654–663, 2005.
- [92] F. Pigeon G. Bouchet O. Parriaux P. van Dijk R. Pellens S. Topçu Y. Alayli Y. Jourlin, J. Jay and M. Bonis. Wafer scale submission optical grating for the picometre measurement of aberrations and stitching errors in step and repeat cameras. *J. Microelectronic Engineering*, 61-62:1101–1106, 2002.

Production Scientifique

Brevets :

M. El kodadi, M. Besacier, R. Bouyssou, T ; Chevolleau, C. Licitra. 'Method for optical characterization' (Brevet n: 20110019207)

Publications

- 1 **M. El kodadi**, S. Soulan, M. Besacier, P. Schiavone "Resist trimming etch process control using dynamic scatterometry" Microelectronic Engineering 86 (2009) 1040–1042
- 2 **M. El kodadi**, S. Soulan, M. Besacier, P. Schiavone "Real time scatterometry for profile control during resist trimming process" J. Vac. Sci. Technol. B 27 (6) Nov/Dec 2009
- 3 C. Licitra, R. Bouyssou, **M. El Kodadi**, G. Haberfehlner, T. Chevolleau, J. Hazart, L. Virota, M. Besacier, P. Schiavone and F. Bertin "Application of scatterometric porosimetry to characterize porous ultra low-k patterned layers" Thin Solid Films Vol. 519, Issue 9, 28 February 2011, Pages 2825-2829
- 4 R. Bouyssou, **M. El Kodadi**, C. Licitra, T. Chevolleau, M. Besacier, N. Posseme, O. Joubert, and P. Schiavone "Scatterometric porosimetry: A new characterization technique for porous material patterned structures" J. Vac. Sci. Technol. B 28 (4) 2010
- 5 N. Posseme, R. Bouyssou, **M. El Kodadi**, C. Licitra, T. Chevolleau, M. Besacier, O. Joubert, T. David, M. Darnon, H. Chaabouni (Study of Porous SiOCH Patterning Using Metallic Hard Mask: Challenges and Solutions) ECS Trans. / Volume 35 / Issue 4 / Emerging Dielectrics
- 6 T. Chevolleau, N. Posseme, T. David, R. Bouyssou, J. Ducote, F. Bailly, M. Darnon, H. Chaabouni, L.L. Chapelon, **M. El kodadi**, M. Besacier, C. Licitra, C. Verove and O. Joubert "Plasma Etching Process Scalability and Challenges for ULK Materials" IEEE Issue June 2010

Communications orales dans des conférences nationales et internationales

M. Darnon, T. Chevolleau, T. David, N. Posseme, R. Bouyssou, C. Licitra, N. Rochat, **M. El kodadi**, R. Hurand, F. Bailly, C. Verove, O. Joubert. "Characterizing Plasma Induced Damage to Ultra Low-k" PESH 2011. 5-6 May Mechelen Belgium

T. Chevolleau, N. Posseme, T. David, R. Bouyssou, J. Ducote, F. Bailly, M. Darnon, H. Chaabouni, L.L. Chapelon, **M. El kodadi**, M. Besacier, C. Licitra, C. Verove and O. Joubert. "Plasma Etching Process Scalability and Challenges for ULK Materials" IEEE International Interconnect Technology Conference 7-9 Juin 2010

C. Licitra, R. Bouyssou, T. Chevolleau, **M.El kodadi**, M Besacier, F. Bertin, P. Schiavone. “Scatterometric Porosimetry: a new method to characterize porous ultra low-k patterned layers” 5th International Conference on Spectroscopic Ellipsometry ICSE-V Albany NY USA 23- 28 Mai 2010

M. El kodadi, M. Besacier, I ; Gereige, P. Schiavone. « Développement des techniques de scatterométrie en temps réel pour le suivi des procédés de gravure plasma » Dixième colloque international francophone CMOI 2009 Reims France 16-20 Novembre 2009

I. Gereige, C, Gougon, **M. El kodadi**. « Caractérisation optique de structures périodiques dimensionnelles fabriquées par lithographie nanoimprint » Dixième colloque international francophone CMOI 2009 Reims France 16-20 Novembre 2009

M. El kodadi, M. Besacier, P. Schiavone, E. Pargon “Real time scatterometry: a new metrology to in situ microelectronics processes control” 3rd workshop on Plasma Etch and Strip in Microelectronics PESM 2010 4-5 Mars 2010

Co-auteur

M. El kodadi, S. Soulan, M. Besacier, P.Schiavone “Dynamic scatterometry for profile control during resist trimming Process” The 53rd International Conference on Electron, Ion, and Photon Beam Technology & Nanofabrication” EIPBN, Marco Island, Florida USA 26-29 May 2009

M. El kodadi, M. Besacier, P. Schiavone. 7TH FRAUNHOFER IISB. LITHOGRAPHY SIMULATION. WORKSHOP. Hersbruck, Germany. 25-27 Septembre 2009

M. El kodadi; M. Besacier, P. Schiavone. “real time scatterometry for profile control during resist trimming process in a HBr/O2 plasma” AVS 56 th International Symposium& exhibition San Jose, California USA 8-13 Novembre 2009

Présentations par affiches dans des conférences nationales et internationales

- 1 **M. El kodadi**, I. Gereige, M. Besacier, P. Schiavone. “Scatterometry: a promising metrology tool for real time, in situ, nanostructure profile control for semiconductor manufacturing processes” 5th International Conference on Spectroscopic Ellipsometry ICSE-V Albany NY USA 23- 28 Mai 2010
- 2 **M. El kodadi**, M. Besacier, E. Pargon, P. Schiavone “Real time scatterometry for 193 nm photoresist trimming monitoring: influence of the refractive index modification on CD accuracy” The 54th International Conference on Electron, Ion, and Photon Beam Technology & Nanofabrication” EIPBN 2010. 1- 4 Juin 2010
- 3 **M. El kodadi**, S. Soulan, M. Besacier, P. Schiavone. “Resist trimming etch process control using dynamic scatterometry” 34th International conference on Micro & Nano Engineering MNE 2008” Athens Greece 15-19 septembre 2008
- 4 I. Gereige, C. Gourgon. **M. El kodadi**. “Ellipsometric scatterometry: an efficient characterization tool for dimensional control of imprinted structures” 5th

International Conference on Spectroscopic Ellipsometry ICSE-V Albany NY USA
23- 28 Mai 2010

- 5 R. Bouyssou, T. Chevolleau, **M. El Kodadi**, M. Besacier, N. Posseme, R. Hurand, T. David, C.Licitra, M. Darnon, C.Vérove, O. Joubert. “Sidewall modification of porous SiOCH induced by etching and post etching plasma treatments” 3rd workshop on Plasma Etch and Strip in Microelectronics PESH 2010. Mars 2010
- 6 C. Licitra, T. Chevolleau, R. Bouyssou, **M. El Kodadi**, G. Haberfehlner, J. Hazart, L. Viro, M. Besacier, M. Darnon, R. Hurand, P. Schiavone, and F. Bertin (Ellipsometric Porosimetry: from Thin Films to Patterned Structures Characterization) International Conference on Frontiers of Characterization and Metrology for Nanoelectronics May 23-26 Grenoble France 2011
- 7 R. Bouyssou, T. Chevolleau, **M. El Kodadi**, M. Besacier, N. Posseme, T. David, C. Licitra, C.Vérove and O.Joubert (Sidewall modifications of porous SiOCH trenches induced by etching and post etching plasma treatments) 3ème colloque du Laboratoire International Associé « Nanotechnologies & Nanosystèmes », 12-16 juillet 2010, Sherbrooke, Canada

Annexe

Mesure de l'indice optique des matériaux

Les ellipsomètres et les réflectomètres spectroscopiques sont largement utilisés pour la détermination de l'épaisseur et les indices de couches minces. Cette mesure de l'indice des matériaux et de l'épaisseur est délicate et indirecte. Elle nécessite typiquement l'utilisation d'une loi de dispersion, caractérisant la variation de l'indice de réfraction et du coefficient d'extinction en fonction de la longueur d'onde.

De nombreux modèles ont été développés afin de décrire la dispersion des indices optiques des matériaux. Ces modèles ne reposent pas toujours sur une base physique rigoureuse, comme le modèle de Cauchy par exemple. Ils permettent cependant de représenter correctement l'évolution des indices optiques des matériaux dans une gamme de longueur d'onde. Nous ne décrirons rapidement que ceux qui sont le plus couramment utilisés dans notre équipe.

A) Modèle de Cauchy

Le modèle de Cauchy [4] a été élaboré par le mathématicien français Augustin Louis Cauchy en 1836. Il permet de présenter les propriétés optiques des matériaux loin de leur bande d'absorption par une loi de puissance de $\frac{1}{\lambda^2}$. Il est utilisé dans le visible essentiellement ($\lambda = 400 - 800nm$) pour les matériaux transparents les plus courants. Dans la région, ultra-violet (UV) ($\lambda = 200 - 400$), il existe des pics d'absorption qui ne sont pas pris en compte par ce modèle. La fonction de Cauchy pour l'indice de réfraction et le coefficient d'extinction est donnée par

$$n(\lambda) = \sum_{i \geq 1} \frac{n_i}{\lambda^{2(i-1)}} \qquad k(\lambda) = \sum_{i \geq 1} \frac{k_i}{\lambda^{2(i-1)}} \qquad 55$$

Dans la pratique, $i=2$ ou 3 . Ce modèle présente l'avantage d'être simple, cependant la fonction Cauchy ne respecte pas la relation de Kramers-Kronig [4]. Dans la suite ce module sera utilisé pour la détermination des indices des matériaux suivants (TiN, SiOCH) (cf. *chapitre III*).

B) Modèle de Tauc Lorentz

Ce modèle a été développé par Jellison et Modine [31, 32] pour représenter les propriétés optiques des matériaux (diélectrique, semi-conducteur, amorphe) dans le domaine infrarouge et proche UV. La fonction diélectrique peut être décrite par une loi de dispersion basée sur l'oscillateur classique de Lorentz et la densité d'états joints de Tauc [43].

La partie réelle ε_1 et la partie imaginaire ε_2 de la fonction diélectrique complexe ε sont données par :

$$\varepsilon_2(E) = 2n(E)k(E) = A_T \frac{(E - E_g)^2}{E^2} \Theta(E - E_g) \quad 56$$

$$\varepsilon_1(E) = \varepsilon_1(\infty) + \frac{2}{\pi} P \int_{E_g}^{\infty} \frac{\xi \varepsilon_2(\xi)}{\xi^2 - E^2} d\xi \quad 57$$

E est l'énergie des photons, E_g le gap optique, A_T est une constante et $\Theta(E < E_g) = 0$ et $\Theta(E > E_g) = 1$. Normalement $\varepsilon_1(\infty) = 1$ représente la permittivité du milieu de fond et P : la partie principale de l'intégrale. La fonction diélectrique complexe est reliée à l'indice complexe du matériau par $\varepsilon = (n - ik)^2$, avec n est l'indice de réfraction et k le coefficient d'extinction.

Ce modèle sera utilisé pour extraire les propriétés optiques des résines 248nm et 193nm (*cf. chapitre IV*).

C) Remarque

Lors de la détermination des propriétés optiques des matériaux, nous avons trois inconnues, l'épaisseur du matériau et le couple n et k . Dans le cas idéal l'épaisseur est connue (mesurée par une autre technique de métrologie), dans ce cas on se retrouve avec deux inconnues.

La détermination de ces différents paramètres est effectuée par l'association d'une mesure spectroscopique (ellipsomètre ou réflectomètre) et de la résolution d'un problème inverse. Cette mesure est donc indirecte et elle dépend du choix du modèle (loi de variation de l'indice optiques en fonction de la longueur d'onde), de l'instrument de mesure (calibration, précision, incertitudes...) de la fonction de coût, et de l'algorithme de minimisation de la fonction de coût. On se retrouve confronté au même problème qu'en scatterométrie (minima locaux), de plus les données expérimentales sont souvent corrélées, d'où la nécessité d'effectuer plusieurs mesures pour une bonne précision sur les indices optiques mesurées [5].

Résumé

La miniaturisation progressive de la taille des composantes est rendue possible grâce aux progrès technologiques des étapes de fabrication (lithographie, gravure, etc.). Ce progrès technologique crée un besoin de technique de caractérisation fiable, rapide et si possible à moindre coût.

La technique de caractérisation optique basée sur l'analyse de la lumière diffractée par un objet périodique, la scatterométrie, se positionne comme étant une technique très prometteuse pour le suivi *in situ* et en temps réel des étapes de fabrication dans l'industrie de la microélectronique.

Au cours de cette thèse, nous avons validé l'utilisation de la scatterométrie en temps réel pour le suivi d'une étape de fabrication, il s'agit du procédé de réduction de cote résine. La technique a d'abord été validée avec succès sur des résines 248nm dans différentes conditions expérimentales. Puis sur des résines 193nm. Le cas de ces résines est plus intéressant d'un point de vue industriel, mais il est plus délicat à mettre en œuvre puisque les indices des matériaux mis en jeu change sous l'effet du plasma. Ces indices doivent donc être considérés comme des paramètres variables dans le modèle utilisé pour la résolution du problème inverse.

Les travaux de cette thèse ont également permis l'extension de la technique à des applications originales telles que la porosimétrie. Cette technique appelée scatterométrie porosimétrique permet à la fois de déterminer la porosité, la perméation de la surface et l'épaisseur de la couche hydrophile sur les flancs.

Mots clés : scatterométrie, problème inverse, gravure, ellipsométrie, porosimétrie, métrologie optique.

Abstract

The miniaturization of the semiconductor devices is made possible by the improvement of technological processing steps (such as lithography, etching, etc.). This progress goes with the need of fast reliable characterization techniques.

Optical metrology based on the analysis of light diffracted by a periodic pattern, namely scatterometry, positions itself as a very promising technique for monitoring *in situ* and real-time manufacturing processes.

In this work, we validated scatterometry for the real-time monitoring of manufacturing processes; such as the resist trimming. First, the technique was successfully validated on 248nm photo resist, under various experimental conditions, then on 193nm photo resist. The latter case is more interesting for semiconductor manufacturing application, but it is more difficult to address because the optical properties of the materials used change during the course of the process as a result of the plasma impact. These optical properties must be considered as variable parameters in the model used for solving the inverse problem.

We have also contributed to the extension of the method to innovative applications such as porosimetry. This technique known as scatterometric porosimetry allows determining porosity as well as permeability of the surface and the thickness of the hydrophilic layer on pattern sidewalls.

Keywords: Scatterometry, inverse problem, etching, ellipsometry, porosimetry, optical metrology.