



HAL
open science

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

Mohamed El Kodadi, Maxime Besacier, Issam Gereige, Patrick Schiavone

► To cite this version:

Mohamed El Kodadi, Maxime Besacier, Issam Gereige, Patrick Schiavone. Développement des techniques de scatterométrie en temps réel pour le suivi des procédés de gravure plasma. 2009. hal-00441191

HAL Id: hal-00441191

<https://hal.science/hal-00441191>

Preprint submitted on 15 Dec 2009

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.

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

M. EL KODADI¹, M. BESACIER¹, I. GEREIGE¹, P. SCHIAVONE^{1,2}

¹Laboratoire des Technologies de la Microélectronique CNRS, 17 rue des Martyrs, 38054 Grenoble, France.

²UMI 2958 Georgia Tech-CNRS, Georgia Institute of Technology, 777 Atlantic Dr., Atlanta (GA) 30332, USA

Email: mohamed.el-kodadi@cea.fr

1. Introduction :

L'évolution de l'industrie de la microélectronique et la miniaturisation des composants exigent des techniques de métrologie précises, performantes et non destructives, capables de déterminer avec précision la dimension critique de la grille des transistors (CD "Critical dimension"). Les techniques classiques de métrologie telles que la microscopie à force atomique la microscopie électronique sont les techniques les plus couramment utilisées dans le milieu industriel. Malheureusement ces techniques ne sont pas adaptées au contrôle en temps réel, car très longues, ou destructives et donc non applicables au contrôle *in-situ*.

Les techniques optiques basées sur l'analyse de la lumière diffractée par une structure périodique telles que la scatterométrie sont des techniques fiables, non destructives, rapides et intégrables facilement en ligne. Cette dernière fait preuve d'un potentiel remarquable pour le contrôle *in situ* en temps réel de motifs périodiques.

De nombreux travaux ont contribué aux développements des techniques de scatterométrie, en utilisant différents dispositifs expérimentaux. McNeil et al[1] ont développé la réflectométrie à angle variable ou scatterométrie 2 θ . L'inconvénient de cette technique est la complexité du système de montage mécanique et la difficulté de maintenir un bon alignement optique selon l'incidence du rayon de lumière. Dans le cas de l'ellipsométrie [2] [3] ou la réflectométrie [4] spectroscopique, la longueur d'onde λ est variable et l'angle d'incidence est fixé. Ce sont des solutions adaptées pour la scatterométrie dynamique. Depuis plus de trois ans, le Laboratoire des Technologies de la Microélectronique a mis au point des outils matériels et logiciels capables d'effectuer de la scatterométrie dynamique *in situ* en utilisant un ellipsomètre spectroscopique multi-longueur d'ondes [5] [6].

Cet outil peut être utilisé pour le suivi des différentes étapes de fabrication dans l'industrie de la microélectronique. Le procédé de réduction de la cote de résine ou « resist trimming » en anglais [7] [8] est un exemple d'étape qui nécessite un contrôle particulièrement précis. Ce procédé consiste à éroder latéralement, par gravure plasma, les motifs de résine définie par la lithographie (optique ou par faisceau d'électron) afin d'atteindre des dimensions sub-20nm.

Toutefois, si l'étape de réduction de cote peut aider à diminuer la dimension de la résine, elle ne peut en aucun cas améliorer la densité des motifs au-delà des capacités de la lithographie. La réduction de la largeur des motifs est accompagnée d'une augmentation des espaces entre les lignes, préservant ainsi la période d'origine définie par la lithographie. Pour cette raison le procédé ne peut pas être utilisé pour obtenir des DRAM (Dynamic Random Access Memory). Toutefois le procédé de réduction de cote permet la fabrication de circuits CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) rapides, dont la dimension physique après gravure est en deçà de ce que permet l'étape de lithographie.

Dans cet article, nous présentons un résultat de l'application de la scatterométrie dynamique pour le suivi d'un procédé de réduction de cote de résine. Les résultats obtenus par scatterométrie seront comparés avec des mesures par microscope à force atomique (AFM) obtenues dans les mêmes conditions expérimentales. La première partie présentera le principe de la scatterométrie et du problème inverse, la seconde partie montrera la technique de validation par mesure AFM. Le procédé

expérimental ainsi que les outils utilisés seront détaillés puis les résultats de suivi en temps réel obtenus seront présentés et analysés.

2. La Scatterométrie :

La scatterométrie est une technique qui utilise l'analyse de la signature de la lumière diffractée par un objet périodique pour remonter à la forme du motif. Cette analyse prend en compte le changement de polarisation de la lumière par le motif périodique.

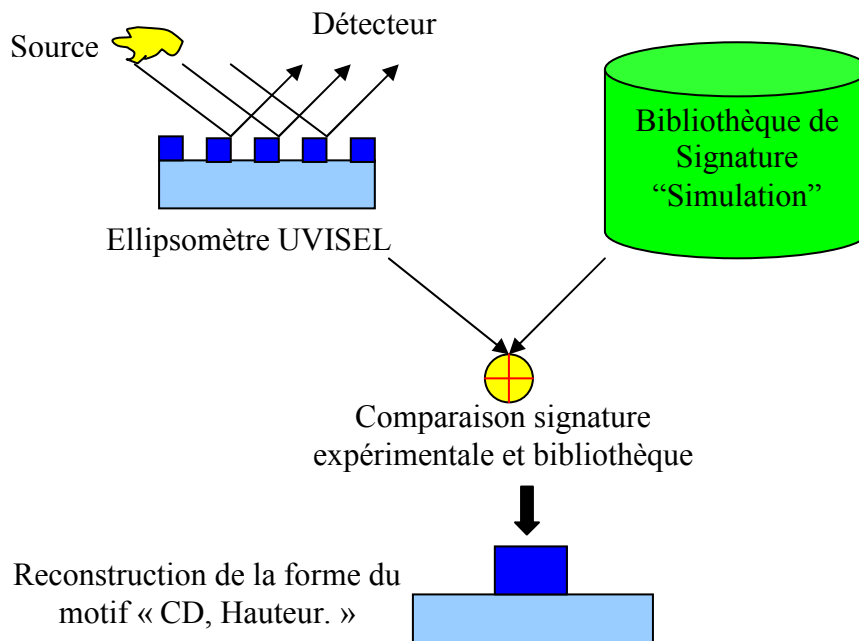


Figure 1 Méthode des bibliothèques pour la scatterométrie

L'analyse scatterométrique peut être définie en deux étapes. La première, appelée problème direct, consiste à générer une bibliothèque de signatures à partir d'un code électromagnétique fondé par exemple sur une méthode de décomposition modale telle que la MMFE « Modal Method by Fourier Expansion » élaborée initialement par M.G Moharam et al. [9] et améliorée par Lifeng Li [10]. Une signature scatterométrique est une représentation du couple (I_s, I_c) en fonction de la longueur d'onde incidente λ .

Si on appelle r_s et r_p les coefficients complexes de réflexion du champ pour les polarisations s et p respectivement parallèle et perpendiculaire. L'ellipsomètre permet la mesure de I_s et I_c , grandeurs définies par le rapport de changement de polarisation ρ données respectivement par les équations suivantes :

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

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

$$\rho = \frac{r_s}{r_p} = \tan(\psi) e^{i\Delta}$$

La seconde étape, appelée problème inverse, consiste à déterminer la forme des motifs périodiques à partir d'une mesure expérimentale. Dans notre outil, cette étape est résolue par la méthode des bibliothèques représentée par la figure 1. Cette méthode est très couramment utilisée dans le milieu industriel [11]. Une bibliothèque est un ensemble de signatures optiques calculées par le problème direct et des paramètres de profils « CD, Hauteur, etc.. ». Chaque signature acquise par

l'ellipsomètre spectroscopique est comparée à celles stockées dans la bibliothèque, il est ainsi possible de retrouver la forme du motif périodique. Mais la recherche des signatures dans la bibliothèque peut prendre beaucoup de temps car la taille de bibliothèque peut dépasser les 1Mo pour trois à quatre paramètres géométriques du module (« CD, Hauteur, Angle, etc. »). Pour résoudre ce problème nous utilisons les dernières générations de cartes graphiques GPU « Graphic Processing Unit », traitant le calcul de manière vectorielle et permet d'avoir des vitesses de résolution supérieures à 15 signatures par seconde. Ce qui est largement plus rapide que la vitesse d'acquisition de l'ellipsomètre (2Hz). Cette méthode a l'avantage d'être compatible à la résolution en temps réel du problème inverse, le temps mis pour le calcul pouvant être estimé a priori.

Une description complète de la méthode de résolution du problème inverse ainsi que la reconstruction des variations du profil diffractant pendant le procédé sont détaillés dans [5], [6].

3. La mesure AFM :

Un CD-AFM 3D de Veeco Instruments [12], [13], est utilisé comme référence pour la mesure de la forme des motifs. Il fournit une image en 3 dimensions de la surface du motif, et permet de mesurer avec précision des lignes verticales (CD, Hauteur), l'espace entre les lignes, ainsi que la rugosité des flancs du motif.

Les pointes AFM utilisées pour cette étude sont des pointes CDR120C de Team Nanotec GmbH. Ces pointes ont un diamètre de 120nm, un rayon de courbure de 20nm et une hauteur effective de 580nm. La mesure AFM 3D permet d'extraire les principaux paramètres décrivant la forme du motif « CD, Hauteur ». Chaque point de mesure AFM est une moyenne de 6 mesures effectuées sur la même structure de test, réduisant ainsi l'erreur de mesure. Cela a aussi l'avantage de rendre les résultats AFM comparables avec ceux obtenus par la scatterométrie, car si l'AFM est une mesure locale, la scatterométrie est une mesure moyenne de la zone correspondante à la taille du spot de l'ellipsomètre.

4. Dispositif expérimental :

Les procédés de réduction de cote de résine sont effectués dans le réacteur plasma de la DPS CENTURA 5200 d'Applied Materials, représenté par la figure 2.

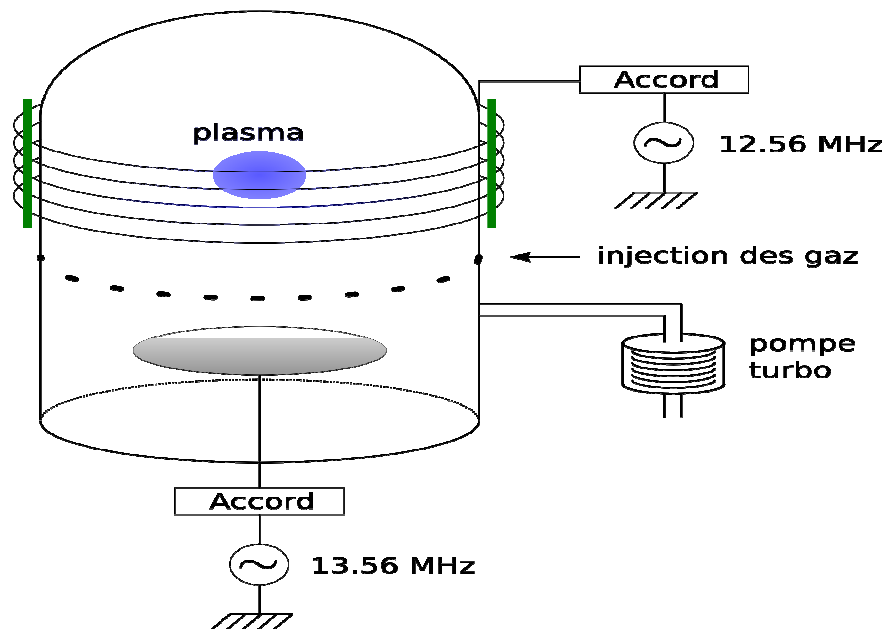


Figure 2. Schéma du réacteur de gravure.

C'est un réacteur plasma haute densité qui permet de graver des substrats de 200 mm de diamètre. Tout l'intérêt de ces sources dites à « haute densité » est qu'elles permettent de travailler à basse pression (quelques torrs) avec un contrôle indépendant du flux et de l'énergie des ions

bombardant le substrat. Le réacteur plasma est muni de deux générateurs radiofréquences, un à la fréquence de 12.56 MHz pour la création du plasma via un couplage inductif qui permet de contrôler la valeur du flux ionique bombardant le substrat, le second à la fréquence de 13.56 MHz, couplé de manière capacitive au substrat et qui permet de contrôler l'énergie des ions bombardant ce dernier. Les deux générateurs RF sont de fréquences différentes afin d'éviter tous les phénomènes d'interférences. Le procédé de « resist trimming » utilisé dans cette étude est le suivant : un plasma HBr/O₂ (70 sccm : 30 sccm), puissance source: 500 W, puissance Bais: 0 W, pression de travail : 4 mTorr. Les motifs étudiés sont des lignes périodiques denses de 250nm de largeur espacées de 250 nm. Ces lignes sont obtenues à partir d'une résine M78Y de JSR par insolation optique à 248nm sur substrat de Silicium.

Nous utilisons un ellipsomètre spectroscopique à modulation de phase UVISEL MWL-16 de JOBIN YVON, pour mesurer la lumière diffractée à l'ordre 0. L'ellipsomètre est placé dans la DPS, ce qui permet de faire des mesures *in situ* et en temps réel. La vitesse d'acquisition élevée de l'ellipsomètre permet de d'obtenir les seize longueurs d'ondes avec une résolution temporelle de 0.5s. Ce qui rend l'équipement entièrement compatible pour le contrôle *in situ* et en temps réel de procédé de réduction de côte de résine qui dure généralement une dizaine de secondes.

L'ellipsomètre fournit les couples (I_s, I_c) pour seize longueurs d'ondes différentes allant de 248nm à 826nm, à incidence fixe 72.35°. Le faisceau lumineux à une forme elliptique 2x6mm. Il est beaucoup plus petit que la structure de test qui une zone de 10x10mm. Les mesures sont effectuées en temps réel dans la chambre de gravure.

5. Résultats et discussions:

Deux approches différentes peuvent être envisagées pour effectuer la validation des résultats scatterométrique par des mesures AFM.

La première approche consiste à utiliser une seule plaque et de faire interrompre le procédé de gravure à des instants différents, (20s, 40s, 60s, etc.) par exemple, et de comparer le résultat scatterométrique obtenu par cette plaque, avec une autre plaque identique à la première, mais sans interrompre le procédé de gravure. Nous avons expérimenté et testé cette méthode, mais nous avons remarqué que l'arrêt, puis la reprise du procédé de gravure induit des changements dans le réacteur de gravure. Ce qui rend le résultat obtenu sur les deux plaques incomparables. La deuxième approche consiste à utiliser différentes plaques d'un même lot. Ces plaques ont été gravées à des temps différents (20s, 40s, 60s, etc). Une comparaison des mesures AFM et scatterométrie obtenues dans les mêmes conditions sont présentées sur les figures 3 a et b, ces figure montre une comparaison de l'évolution du CD et de la hauteur des motifs de résine M78Y obtenu par la scatterométrie en fonction du temps pendant le procédé de réduction de cote, les mesure AFM sont données comme référence..

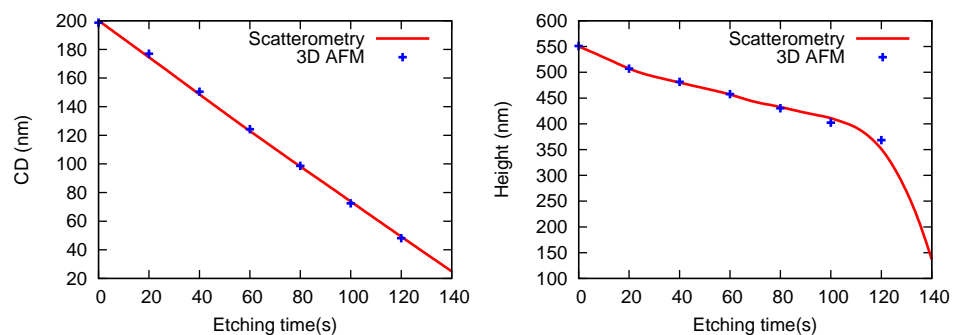


Figure 3. Comparaison des résultats scatterométrie temps réel avec des mesures AFM, « a » CD, « b » hauteur.

Ces résultats montrent que les mesures scatterométrique correspondent bien aux mesures AFM, pour le CD et la hauteur. Cette étude montre que la scatterométrie dynamique fournit des résultats fiables, et qu'elle possède un grand potentiel pour des applications de contrôle en temps réel de procédé de

gravure. Globalement, la correspondance entre les résultats AFM et scatterométrie est très bonne puisque la différence en largeur et en hauteur entre les deux métrologies est toujours inférieure à 3%.

6. Conclusions :

Nous avons présenté une application de la scatterométrie dynamique pour le contrôle *in situ* en temps réel de procédé de « resist trimming ». Lors de cette étude nous avons montré l'efficacité de cette technique dans le cas d'un plasma HBr/O₂. Cette première étude montre que la scatterométrie en temps réel est une technique à fort potentiel pour le contrôle *in situ* et temps réel. La comparaison des résultats AFM et scatterométrie montre une bonne concordance, avec une différence inférieure à 3%. D'autres travaux sont menés actuellement au laboratoire pour évaluer l'étendue du domaine de validité de cette technique très prometteuse pour le contrôle *in situ* en temps réel. Nous étudierons des applications de plus en plus complexes et agressives de procédés de gravure. Cela ouvrira d'autres challenges tels que l'examen de l'influence du plasma sur la résine, changement d'indices des matériaux étudiés.

7. Bibliographie.

1. C. J Raymond, M. Murnane, S. Prins, S. S. H. Naqvi, et al J.Vac.Sci. Technol. B 15(2), Mar/Apr 1997.
2. S. S. H. Naqvi, S. H Zaidi, et al J.Vac.Sci. Technol. B 12(6), Nov/Dec 1994
3. X.Nui, N. Jakatdar, J.Boa, C. Spanos, S. Yedur, Proc. SPIE, 1999
4. H. T. huang, F. L. Terry Jr, Thin, solid films 468 (2004) 339-346.
5. M. El kodadi et al., Microelectron. Eng. (2009), in press, doi:10.1016/j.mee.2008.12.
6. S. Soulan, M. Besacier, P. Schiavone; Proceedings of the SPIE conference on Modelling Aspects in Optical Metrology, vol. 6617, 2007
7. C. Y. Sin and B. H. Chen, J. Vac. Sci. Technol. B 20(5), Sep/Oct 2002.
8. E. Pargon and O. Joubert J. Vac. Sci. Technol. B 22(4), Jul/Aug 2004.
9. M.G. Moharam et al. J.Opt. Soc. Am, Vol. 72, p. 1385 (1982)
10. Lifeng Li. New formulation of the Fourier modal method for crossed surface relief gratings. J. Opt. Soc. Am. A, 14(10), Oct 1997
11. X. Niu, N. Jakatdar, J. Bao, and C. J. Spanos, IEEE transactions on semiconductor manufacturing, VOL. 14, NO.2, MAY 2001
12. J. Foucher and K. Miller, Proc. SPIE **5375**, Part 1, 444 (2004).
13. G. Dahlen, M. Osborn, N. Okulan, W. Foreman, A. Chand, and J. Foucher, J. Vac. Sci. Technol. B23, 2297 (2005).