CAPELLA : une source de rayonnement extrême UV à 13.5 nm par décharge capillaire

O. Sarroukh, E. Robert, T. Gonthiez, A.L. Thomann, R. Viladrosa, C. Fleurier, J.M. Pouvesle et C. Cachoncinlle

Groupe de Recherche sur l'Énergétique des Milieux Ionisés, GREMI-ESPEO, Université d'Orléans, 14 rue d'Issoudun, BP. 6744, 45067 Orléans cedex 2, France

Résumé : Au GREMI, nous étudions le fonctionnement d'une lampe de rayonnement Extrême Ultraviolet (EUV) émettant à 13.5 nm : CAPELLA. Cette lampe consiste en une décharge capillaire dans un flux de xénon continu à basse pression. L'utilisation de Xénon à basse pression dans cette décharge permet la production de photons de faible longueur d'onde dans l'EUV. Dans cet article, nous présentons l'étude et la caractérisation de cette lampe ainsi que ses principales performances, en particulier les résultats des analyses des débris émis par la lampe pendant quelques millions de tirs.

1. INTRODUCTION

La lithographie optique est utilisée pour la fabrication de composants microélectroniques intégrés. L'industrie de la microélectronique cherche en permanence à réduire la taille du plus petit motif inscriptible sur la résine. Actuellement, on utilise la lithographie dite à 193 nm pour produire des motifs de 120 nm et dans quelques années, la lithographie à 157 nm prendra la relève. Le prochain défi sera d'arriver à produire des motifs de dimension inférieure à 70 nm sur les résines. La source qui répondra aux demandes de cette nouvelle génération devra alors émettre dans l'Extrême Ultraviolet à 13.5 nm.

Il y a deux ans, le programme français PREUVE a été initié pour monter un Banc d'Essai pour la Lithographie (BEL) à 13.5 nm et pouvoir ainsi réaliser les premiers tests sur les résines par cette nouvelle technique. Dans ce programme qui regroupe plusieurs partenaires, dont le GREMI, nous avons développé CAPELLA (CAPillary EUV Lamp for Lithography Approach) qui est une lampe de rayonnement par décharge capillaire capable d'émettre dans le domaine spectral de l'EUV à 13.5 nm

Le principe de CAPELLA est basé sur une décharge pulsée dans un tube capillaire où circule de xénon à basse pression. Nous produisons un plasma chaud et fortement ionisé ayant des températures électroniques qui peuvent atteindre quelques dizaines d'eV (20 à 30 eV) et des densités électroniques très élevées de l'ordre de 10^{17} cm^{-3} [1]. Les ions ainsi formés sont capables d'émettre un fort flux de photons d'environ $10^{14} \text{ ph/4}\pi\text{sr/tir}$ dans les 0.3 nm de la bande passante à 13.5 nm des miroirs MoSi (2% BW à 13.5 nm).

2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le dispositif expérimental de CAPELLA a été présenté antérieurement en détail [2]. Il regroupe principalement quatre éléments : le capillaire, deux bancs de condensateurs, l'alimentation haute tension et le thyatron. Le capillaire utilisé est en Alumine Al_2O_3 (ayant un diamètre intérieur de 1-3 mm et 10-30 mm de longueur) où circule le xénon avec un débit de $0.25 \text{ cm}^3/\text{mn}$. Deux électrodes en tungstène thorié viennent s'insérer à chacune des extrémités du capillaire. Les deux bancs de condensateurs sont montés en une configuration de type Blumlein, ils ont une capacité totale de 16.4 nF. Ces condensateurs sont chargés par une alimentation haute tension de forte puissance (3 kW) au kilohertz. Le thyatron de faible inductance permet de déclencher la décharge. Il est commandé par une électronique développée au GREMI et qui lui permet de commuter à des fréquences allant jusqu'à 4 kHz.

L'énergie électrique est stockée dans les bancs de condensateurs. En déchargeant cette énergie (jusqu'à 3 J par tir) dans le circuit, nous créons un plasma chaud et dense de xénon dans le capillaire. Dans ce type de décharge, les ions de xénon ainsi formés peuvent atteindre des degrés d'ionisation assez élevés jusqu'à 11 fois ionisés [1]. Ils sont capables donc d'émettre dans le domaine spectral de l'EUV. Le rayonnement est analysé au moyen d'un spectromètre EUV en réflexion de type Jobin-Yvon PG500 couvrant le domaine spectral de l'EUV. Un intensificateur à galette de micro canaux est placé dans le plan focal du miroir du spectromètre et couplé à une caméra CCD intensifiée pour enregistrer les spectres.

Parallèlement, une photodiode rapide AXUV-12 est utilisée pour connaître l'évolution temporelle de la fluorescence dans l'EUV et la durée de l'impulsion de photons émise par la lampe. Pour s'affranchir du rayonnement de plus grandes longueurs d'onde auquel les photodiodes sont sensibles, nous utilisons un filtre en zirconium d'une épaisseur de 160 nm. Ce filtre présente une fenêtre de transmission de 50 % dans la bande passante de 10 à 16 nm.

3- DIAGNOSTIC DU RAYONNEMENT EUV EMIS PAR CAPELLA

3.1 Spectroscopie

Des mesures de spectroscopie ont été réalisées dans le plasma à différentes conditions de pression et de tension. La **figure 1** met en évidence l'effet de l'énergie injectée dans le plasma sur l'intensité du rayonnement émis.

Figure 1 : Spectres (non filtrés) du rayonnement émis dans la gamme de 9 à 24 nm pour trois différentes énergies appliquées

L'intensité des spectres dans la bande de 9 à 14 nm augmente avec l'énergie injectée dans le plasma. L'injection de fortes énergies entraîne aussi des émissions vers les plus grandes longueurs d'onde (19 à 24 nm) qui correspondent principalement à des raies d'oxygène provenant de l'ablation des parois intérieures du capillaire. Un meilleur rendement de la bande à 13.5 nm est observé pour une énergie injectée de 1.1 J. Pour nos applications, il n'est donc pas nécessaire de travailler à des énergies plus élevées qui favorisent plutôt la bande à 11 nm.

3.2 Analyse temporelle

Le flux de photons émis dans la bande de 10 à 16 nm est visualisé grâce à la photodiode XUV filtrée et placée à une distance de 65 cm de la source. La durée de l'impulsion de photons ne dépasse pas 70 ns (FWHM) et leur énergie dans les 0.3 nm de la bande passante à 13.5 nm des miroirs MoSi est de l'ordre de quelques mJ/4πsr/tir.

Figure 2 : Impulsion de photons émise par CAPELLA en fonction du taux de répétition

La **figure 2** montre l'évolution de l'impulsion de photons en fonction du taux de répétition de CAPELLA. L'impulsion est d'autant plus puissante que la fréquence de tir est élevée. En effet le temps séparant deux décharges n'est pas suffisant pour que le plasma se recombine complètement. Les charges résiduelles présentes dans le capillaire et provenant d'une décharge antérieure aident notablement la décharge suivante. Cet effet de préionisation rend notre source parfaitement adaptée pour un fonctionnement à haute cadence.

4. ETUDE DES DEBRIS

Une des grandes préoccupations des futurs utilisateurs de sources EUV par décharge capillaire sont les débris qui peuvent être éventuellement émis par la source lors de la décharge. Ces débris peuvent provenir des éléments constituant aussi bien le capillaire que les électrodes. Ils peuvent endommager les optiques EUV et limiter leur durée de vie. Nous avons réalisé plusieurs expériences qui consistaient à exposer des échantillons (wafer) en silicium devant la source pendant quelques millions de tirs à une distance de 30 cm. Le schéma de la **figure 3** montre la démarche suivie lors de nos expériences.

Figure 3 : Schéma de l'exposition des échantillons

Après exposition, les échantillons sont analysés par des techniques de Spectroscopie des Photoélectrons X (XPS), de Spectroscopie de Retrodiffusion Rutherford (RBS) et de Microscopie Electronique à Balayage (MEB). Les analyses des échantillons exposés nous permettent d'identifier les éléments déposés ainsi que de déterminer leur vitesse de dépôt. En **figure 4**, nous présentons un spectre d'analyse RBS effectué sur un échantillon exposé à 3 millions de tirs. Il donne la nature des éléments détectés sur la surface de l'échantillon ainsi que leur pourcentage respectif. Le dépôt est composé à 79 % de tungstène et à 1% de thorium provenant des électrodes de CAPELLA mais aussi à 20 % de Xénon, gaz de la décharge. La vitesse de dépôt pour cet échantillon est inférieure à une mono couche atomique pendant les 3 10^6 tirs ce qui correspond à une épaisseur de dépôt inférieure à 1 Å par million de tirs. Il faut signaler que des analyses réalisées sur la face arrière des échantillons ne mettent en évidence aucune pollution ce qui montre que le dépôt est dû à des débris balistiques.

Figure 4 : Spectre d'analyse RBS d'un échantillon exposé à $3 \cdot 10^6$ de tirs

Les résultats des analyses RBS sont en accord avec ceux obtenus par XPS qui ont confirmé la présence d'une très faible quantité de xénon et de tungstène. Parallèlement, l'imagerie par MEB, ayant une résolution de quelques nm, d'un échantillon témoin et d'un échantillon exposé à 3 millions de tirs ne montre aucune différence visible entre les deux surfaces. La morphologie du dépôt est complètement homogène à cette échelle.

5.CONCLUSION

Les sources EUV par décharge capillaire représentent un moyen simple et efficace pour produire un plasma dense et fortement émissif dans la gamme spectrale de l'EUV. Les études menées sur le fonctionnement de CAPELLA ont permis d'optimiser les différents paramètres de la décharge pour obtenir un meilleur rendement énergétique à 13.5 nm. La puissance du flux de photon émis dans la bande passante à 13.5 nm est supérieure à 1 Watt dans l'angle solide de 4π sr. Les analyses des débris effectuées sur les différents échantillons ont révélé la présence de tungstène (79%), de thorium (1%) et de xénon (20%). La vitesse de dépôt est inférieure à 1 Å par million de tirs. Au vu de ces résultats, il paraît nécessaire d'étudier le vieillissement des optiques EUV. En particulier, l'exposition à de forts flux de photons de 100 eV peut modifier la réflectivité des miroirs MoSi.

Remerciements

Ce travail est soutenu par le Ministère de la Recherche et Technologie (MRT) et également par le Secrétariat d'État à l'Industrie (MINEFI) dans le cadre du programme national français PREUVE et le programme européen EXTUMASK, MEDEA+.

Références

- [1] Cachoncinlle C., Robert E., Sarroukh O., Gonthiez T., Viladrosa R., Fleurier C., Pouvesle J.M., Vrba P., Vrbova M., Bobrova N. and Sasorov P. "Dynamics and emission characteristics of xenon capillary discharge", 8th Int. Conf. on X-Ray Lasers ; Aspen U.S. 27-31 mai 2002
- [2] S.R. Mohanty, E. Robert, R. Dussart, R. Viladrosa, J.M. Pouvesle, C. Fleurier and C. Cachoncinlle "Recent progresses of EUV source development work at GREMI, à paraître dans Special Issue of Microelectronic Engineering