

Applications des plasmas produits par le laser à excimères HERCULES-L : du recuit du silicium à la lithographie par rayons X

S. Bollanti, F. Bonfigli, P. Di Lazzaro, A. Faenov¹, F. Flora, G. Giordano, T. Letardi, T. Limongi², L. Mezi, D. Murra, T. Pikuz¹, L. Palladino², A. Reale, L. Reale², A. Ritucci², A. Scafati², G. Tomassetti², A. Vitali et C.E. Zheng³

ENEA, via E. Fermi 45, 00044 Frascati, Italie

¹ MISDC of NPO, VNIIFTRI, Institute of Moscow, Russie

² INFN of L'Aquila, Department of Physics and Department of Biology, Italie

³ EL.EN, Firenze, Italie

Résumé: Un laser à excimères de grand volume, HERCULES-L, a été développé dans le cadre d'un programme européen pour des applications industrielles concernant le traitement de surface du silicium et la génération de plasmas par laser. Les performances de ce laser sont particulièrement adaptées pour le traitement de grandes surfaces et pour la création de photons EUV ($h\nu \sim 100$ eV) par plasma assisté par laser.

1. LA SOURCE LASER ET LES OPTIQUES

Un laser à excimères XeCl de grand volume ($\lambda=308$ nm), dénommé Hercules, a été développé à l'ENEA - Frascati. Le laser est pompé par une décharge électrique photodéclenchée par une impulsion de rayons X de 60 keV. L'énergie par impulsion (10 J), sa durée (150 ns), ainsi que le taux de répétition (jusqu'à 10 Hz) et la grande section du faisceau rendent ce laser particulièrement approprié aux applications de traitement de surface et à la génération de rayons X mous par plasma laser.

Pour les applications de recuit de fines couches de silicium amorphe déposées sur un substrat de verre, Hercules est équipé d'une cavité plan – plan et l'uniformité de l'intensité sur la cible est assurée par un homogénéiseur de faisceau. Les écarts d'uniformité de la fluence, mesurée dans le plan focal de l'homogénéiseur, sont inférieurs ou égaux à 5% sur l'ensemble de la surface de la tâche laser (11x130 mm²). Des panneaux de silicium de surface 100x100 mm² sont ainsi irradiés par le faisceau spatialement homogénéisé à une fluence de 400 mJ/cm² environ. Avec une technique à pas d'incrémentement linéaire (recouvrement de 90 %), des dimensions de grains d'environ 500 nm ont ainsi été obtenues (voir fig. 1).

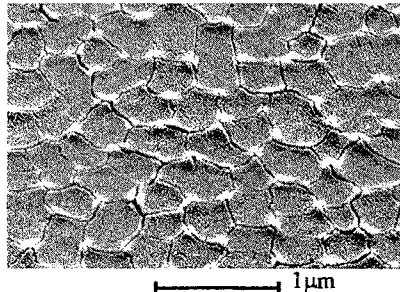


Figure 1. Photo montrant la recristallisation du silicium après avoir effectué 10 tirs.

Pour la génération de rayons X par plasma laser, Hercules est équipé d'un résonateur instable à branche positive (PBUR) de grandissement $M=7$, ou il est utilisé comme milieu amplificateur à 2 passages (2PA) pour un pulse court (10 ns) produit par un laser commercial XeCl Lambda-Physik. Dans ce dernier cas, l'énergie extraite est seulement 2 J (i.e. un facteur 3 plus faible que pour le cas PBUR) mais l'éclairement sur la cible est trois fois plus importante ($2 \cdot 10^{13}$ W/cm²) après focalisation du faisceau par une lentille triplet $f\# = 3$. Cette valeur d'irradiation est particulièrement bien adaptée à la génération de rayons X dans les domaines spectraux de la fenêtre de l'eau ($284 < h\nu < 532$ eV) et du keV [1].

2. GENERATION DE RAYONS X MOUS ET APPLICATIONS

Les figures 2a,b montrent les photos d'une leptolyngbya (algue verte composée d'une chaîne de cellules) et d'un moustique obtenues respectivement par microscopie de contact par rayons X dans la région de la fenêtre de l'eau [1] et par micro-radiographie monochromatique (à 0.98 keV) par projection [2].

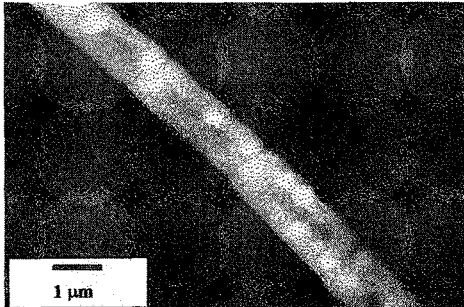


Figure 2a. Microscopie par rayons X d'une leptolyngbya.

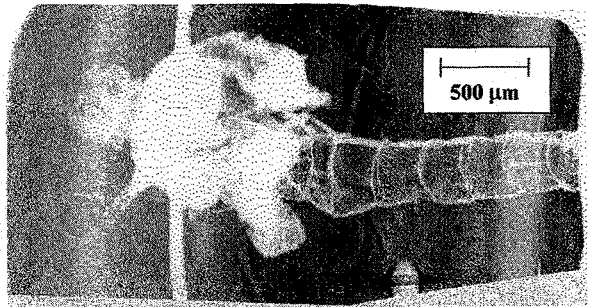


Figure 2b. Radiographie à 0.98 keV d'un moustique.

Dans les deux cas, nous avons utilisé l'impulsion laser de 10 ns (i.e le système 2PA) focalisée sur une cible de Ni avec un éclairement $I_L = 10^{13}$ W/cm².

Pour les applications de microlithographie EUV par projection ($h\nu \sim 100$ eV), l'impulsion longue obtenue avec le système PBUR est plus adaptée [1]. Lorsque la cible de tantale est placée 2 mm derrière le plan focal (d'où une réduction de l'éclairement jusqu'à 10^{10} W/cm²), l'efficacité de conversion énergétique et la stabilité tir à tir à 70 eV sont respectivement égales à $\eta = 0,7\%$ /eV sur 2π sr et 1,1% rms (voir fig. 3). Ces résultats correspondent respectivement à un gain d'un facteur 1.5 et 3 par rapport au cas d'une cible placée dans le plan focal. De plus, la température réduite du plasma induit un moindre taux d'émission de débris, qui est le principal problème pour la durée de vie du premier miroir de la chaîne optique utilisée en micro-lithographie [3]. En stoppant les débris à faible vitesse avec des diaphragmes en rotation, le bombardement de la surface du premier miroir (placé à 21 cm du plasma) pourrait ainsi être réduite (jusqu'à 6 débris/tir/sr/ J_{laser}) de manière à permettre une durée de vie du miroir de l'ordre de 10^7 tirs. Récemment, une version commerciale du laser Hercules (Hercules-L), développée dans le cadre d'un projet EU (FOTO), a été réalisée. Pour les applications de microlithographie, une source alternative basée sur une décharge capillaire dans des gaz rares (Z-pinch) est en développement afin de permettre une comparaison directe entre une source optimisée de rayons X par plasma laser et par Z-pinch qui présente l'avantage d'un coût beaucoup plus réduit.

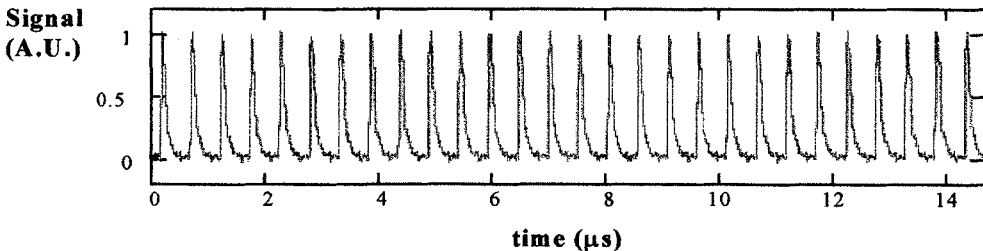


Figure 3. Série de 28 pulses X de @ 70 eV (réalisée à 0,5 Hz) obtenue par focalisation sur une cible de Ta placée 2 mm derrière le plan focal. Pour la compacité de la figure, l'échantillonnage est interrompu après chaque tir (laser: 120 ns - 4 J/tir).

Références

- [1] S. Bollanti et al., *Il Nuovo Cimento*, **20 D** (1998) 1685-1701.
- [2] T.A. Pikuz et al., "Large-field high resolution X-ray monochromatic microscope, based on spherical crystal and high-repetition-rate laser-produced plasmas", EUV, X-ray and Neutron Optics and Sources", Denver (Colorado) 21-23 July 1999, SPIE vol. 3767, pp.67-78.
- [3] S. Bollanti et al., "Toward a high average power and debris free soft X-ray source for microlithography , pumped by a long pulse excimer laser" EUV, X-ray and Neutron Optics and Sources, Denver (Colorado) 21-23 July 1999, SPIE vol. 3767, pp.33-44.