

Méthode originale d'amplification régénératrice avec un laser XeCl : application à la lithographie EUV

S. Branly et M. Makarov

Sopra-sa, 26 rue Pierre Joigneaux, 92270 Bois-Colombes, France

Résumé : Il semble désormais acquis que pour suivre la loi de Moore et atteindre la résolution de 70 nm en 2006, la nouvelle génération de lithographie devra utiliser des sources d'illumination émettant autour de 13 nm. Différentes sources sont d'ores et déjà envisagées dont les plasmas générés par laser. Les lasers excimères actuellement utilisés pour la lithographie à 248 et 193 nm auront encore leur chance pour la lithographie à 13 nm à conditions de s'adapter aux nouvelles exigences de la production de wafers. Ils devront pouvoir délivrer 1800 watts de puissance moyenne à près de 10 kHz. Une méthode originale d'amplification générant des trains d'impulsions nanosecondes est décrite. Elle permet d'augmenter artificiellement le taux de répétition du laser et se révèle très efficace pour extraire l'énergie stockée dans l'amplificateur.

1. INTRODUCTION

Afin d'augmenter le taux d'intégration et la rapidité des circuits électroniques, l'industrie de la lithographie s'évertue à diminuer la taille du plus petit motif inscriptible sur la résine (180 nm à ce jour) qui est essentiellement limitée par la diffraction. Aujourd'hui les sources d'illumination utilisées sont les lasers excimères KrF ($\lambda = 248$ nm) et ArF ($\lambda = 193$ nm). Pour atteindre l'objectif d'une résolution de 70 nm vers 2006, il est nécessaire de diminuer la longueur d'onde du rayonnement utilisé pour insoler la résine. Il semble aujourd'hui acquis que la source devra émettre dans l'extrême ultraviolet (EUV) autour de 13 nm. Les sources en concurrence sont les petits synchrotrons, les décharges capillaires, les plasmas focus et enfin les plasmas laser auxquels on s'intéresse ici ; ce sont d'intenses sources d'EUV obtenues par focalisation d'un faisceau laser sur une cible métallique ou un jet d'agrégats de gaz rare (entre autres exemples) avec une densité de puissance supérieure à 10^{11} W/cm².

Du fait du faible rendement de conversion « laser→EUV » obtenu à ce jour, typiquement 0,3 % dans 2π sr et dans une bande passante de 0,13 nm, le laser devra délivrer 1800 W de puissance moyenne à près de 10000 Hz pour satisfaire aux contraintes de production de l'industrie lithographique (~ 60 wafers de 300 mm par heure et une uniformité d'insolation de la résine meilleure que 0,5 %).

Seuls deux types de lasers semblent en mesure de pouvoir atteindre un jour ces performances extraordinaires : les sources solides YAG et les lasers excimères auxquels on consacre cet article.

2. CARACTERISTIQUES DU SYSTEME LASER REQUIS

Comme on l'a dit, le système laser doit générer des impulsions d'une centaine de millijoules à une cadence de plusieurs milliers de hertz. De plus, pour que le plasma émette efficacement du rayonnement EUV, le laser doit être focalisé sur une tâche de ~ 100 μ m de diamètre avec une densité de puissance voisine de 10^{12} W/cm². Toutes ces conditions imposent une durée d'impulsion laser de 1 à ~10 nanosecondes.

Des expériences de génération d'EUV à 13,9 nm menées avec des lasers excimères (XeCl et KrF) par Sopra et l'Institut de physique des plasmas FOM (Pays-Bas) d'une part [1] et FOM et le Rutherford

Appleton Laboratory (RAL - Grande-Bretagne) d'autre part [2], ont permis de valider l'efficacité accrue d'impulsions de laser excimère de 2 à 30 ns comparée à celle d'impulsions très longues (150 ns) ou très courtes (10 ps). Ainsi, avec une impulsion de 2 ns, des rendement de conversion de 0,3 % (dans 2π sr et dans une bande passante de 0,13 nm) ont été obtenu sur des cibles en cuivre, contre respectivement 0,2 % et 0,17 % avec des impulsions de 10 ps et 150 ns.

De plus, lors des expériences du RAL et de FOM (impulsions de 10 ps), il a été montré que le rendement de conversion « laser→EUV » pouvait être multiplié par $\sim 2,5$ lorsque deux impulsions séparées d'environ 10 ns se succédaient sur la cible.

L'ensemble de ces impératifs industriels et de ces résultats expérimentaux semble suggérer qu'un système laser délivrant des trains d'impulsions séparées d'une dizaine de nanosecondes, ayant chacune une durée de quelques nanosecondes et une énergie d'une centaine de millijoules, serait un candidat intéressant pour la lithographie. Ce système de train d'impulsions permettrait donc, à priori, d'augmenter encore le taux de conversion et aussi le taux de répétition pour une cadence de tir donnée du laser. Nous nous sommes donc attachés à développer un tel démonstrateur mais délivrant des impulsions de seulement 10 mJ du fait de la taille réduite des lasers à notre disposition.

3. METHODE ORIGINALE D'AMPLIFICATION REGENERATIVE AVEC UN LASER XeCl

3.1 Conditions d'amplification dans un amplificateur XeCl

On rappelle que les lasers excimères sont des lasers continus mais pompés de façon impulsionnelle. Par conséquent, l'énergie maximale pouvant être extraite d'un amplificateur est proportionnelle au temps durant lequel l'impulsion injectée le sollicite (car il n'y a pas de stockage de l'énergie). Si on définit g_0 comme le gain à faible signal et l la longueur du milieu amplificateur, on peut montrer que, pour optimiser l'efficacité avec laquelle une impulsion injectée extrait l'énergie, il faut que le produit $g_0 \times l$ vérifie :

$$g_0 \times l < 15 \quad (1)$$

Si une même impulsion traverse n fois le milieu amplificateur, la relation devient :

$$g_0 \times n \times l < 15 \quad (2)$$

Le fort gain et la courte durée de vie de l'état supérieur de la transition laser sont malheureusement très favorables au développement de l'émission spontanée amplifiée (ASE). Pour prévenir tout effet d'écrantage de l'impulsion laser lors de la génération de plasma, il est important de limiter à 10^8 - 10^9 W/cm² la densité de flux due à l'ASE au niveau de la cible. Pour limiter l'ASE et donc conserver un contraste suffisant entre l'ASE et l'impulsion laser, il convient de solliciter le milieu amplificateur à des intervalles de temps Δt tels que :

$$\Delta t \approx 2 \times \tau_u \quad (3)$$

3.2 Méthode originale d'amplification régénératrice

3.2.1 Les sources lasers

Un système oscillateur-amplificateur a été développé à partir de deux lasers excimères XeCl existants à Sopra. L'oscillateur délivre une impulsion de ~ 1 mJ et 1,7 ns. En mode oscillateur, le laser utilisé comme amplificateur, délivre 45 mJ en 26 ns avec un volume de décharge de $1 \times 1 \times 30$ cm³. En régime à faible signal son gain g_0 est de 0,14 cm⁻¹ et la durée de vie τ_u de l'état supérieur de la transition laser est d'environ 1,5 ns. La durée de pompage par la décharge électrique est de 85 ns.

3.2.2 Principe de la chaîne amplificatrice

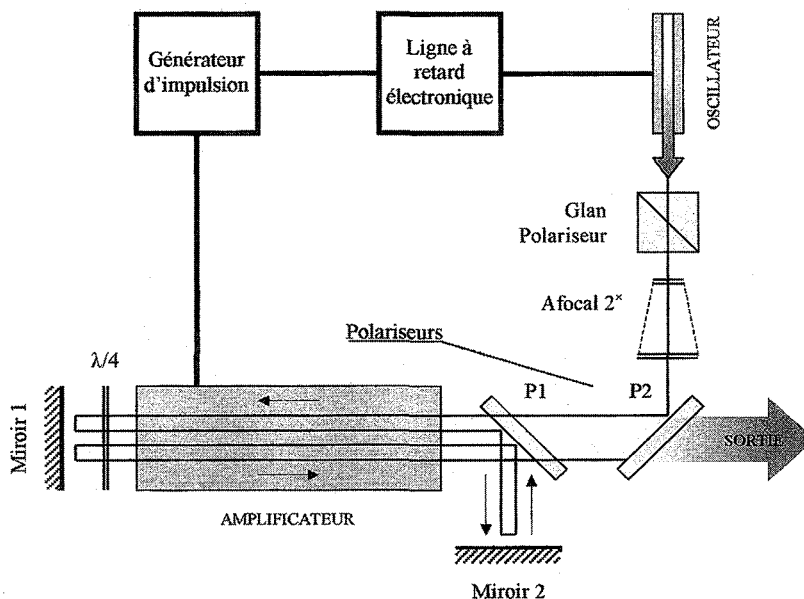


Figure 1 : Schéma du système d'amplification régénératrice.

Après la traversée du prisme de Glan en calcite de $1 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$, le faisceau laser acquiert une polarisation P très pure avec un contraste supérieur à 10^5 . La taille du faisceau est augmentée grâce à un afocal Galiléen de grandissement $2\times$ afin de solliciter toute la section de la décharge de l'amplificateur.

Les deux lames polarisantes P1 et P2 sont constituées d'un substrat en silice UV supportant sur une face un empilement de couches diélectriques. Les mesures effectuées pour des angles d'incidence de 55° à 63° , montrent que le coefficient de réflexion R_S de la polarisation S reste très proche de 100 % tandis que la transmission T_P de la polarisation P passe de 30 à 93 % sans jamais atteindre 100 % à cause des imperfections des lames polarisantes. En faisant l'hypothèse raisonnable que les lames polarisantes n'absorbent pas, on peut déduire $R_P = 1 - T_P$ et $T_S = 1 - R_S$. Une lame quart d'onde de faible ordre, en quartz, avec un traitement anti-réfléchissant à 308 nm sur les deux faces est utilisée pour changer la polarisation du faisceau.

Les deux miroirs M1 et M2 sont en silice synthétique UV recouverte d'un traitement multicouches diélectriques totalement réfléchissant à 308 nm en incidence normale.

PREMIÈRE ÉTAPE INJECTION

En traversant le prisme de Glan, l'impulsion issue de l'oscillateur acquiert une polarisation rectiligne P. Une fraction $1 - T_{P2}$ de l'énergie est réfléchi par la lame polarisante P2 puis injectée dans l'amplificateur après avoir traversé la seconde lame polarisante P1. On a utilisé une imperfection de la lame polarisante P2 comme un avantage pour injecter l'impulsion sans avoir recours à un commutateur optique tel qu'une cellule de Pockels.

Deuxième étape AMPLIFICATION

Après avoir traversé P1, l'impulsion est amplifiée une première fois. La polarisation du faisceau est modifiée ($P \rightarrow S$) après un double passage à travers la lame quart d'onde. Le faisceau est amplifié une seconde fois puis réfléchi par la lame polarisante P1 et le miroir M2 et encore une fois amplifié. Grâce à la lame quart d'onde la polarisation change de nouveau ($S \rightarrow P$). L'impulsion est amplifiée une quatrième fois (la relation (2) est satisfaite) puis sort de la cavité à travers P1 puis P2. Ainsi une fraction $T_{P1} \times T_{P2}$ du faisceau est extraite de la cavité amplificatrice. La distance entre les miroirs 1 et 2 a été optimisée à 95 cm et satisfait ainsi la relation (3).

Troisième étape REGENERATION

Lorsque l'impulsion amplifiée quitte la cavité à travers P1, une petite fraction $[1-T_{P1}]^2$ du faisceau reste dans la cavité grâce à l'imparfaite transmission de la lame polarisante P1. Cette fraction joue le rôle d'un nouveau faisceau d'injection qui est à son tour amplifié quatre fois et ainsi de suite.

En conclusion, à partir d'une unique impulsion injectée, un train d'impulsions est généré. Seule la chute du gain dans l'amplificateur (fin de la décharge) provoque la fin du train d'impulsions.

L'amplificateur est sollicité à des intervalles de temps typiquement égaux à $2\tau_u$ (crête à crête), suffisamment longs pour que lors de chaque passage l'impulsion puisse profiter à priori de 86 % du gain initial, mais suffisamment courts pour que l'ASE ne bénéficie en moyenne que de 57 % du gain initial.

3.2.3 Résultats

Un train de quatre impulsions séparées de 12 ns a été généré de façon très simple à partir d'une impulsion unique. L'énergie des deux plus fortes impulsions est de 8,6 mJ et 10 mJ pour une section d'amplificateur de 1 cm² (Figure 2). Le taux d'extraction de ce système est excellent puisque plus de 60 % de l'énergie disponible en mode oscillateur a été extrait. Le contraste entre les impulsions et le fond continu dû à l'ASE est supérieur à 10 ; si la qualité du faisceau injecté est suffisamment bonne (~ 70 μ rad) par rapport à celle de l'ASE (~ 5 mrad), on peut, après focalisation, limiter la densité de puissance de l'ASE sur la cible à 10⁸ W/cm².

Ce système requiert peu d'optiques, pas de cellule de Pockels pour la génération d'impulsions courtes, est simple à aligner et permet de multiplier artificiellement le taux de répétition par quatre voire plus.

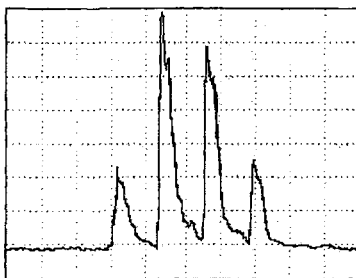


Figure 2 : Exemple de train d'impulsions auto-généré (10 ns/carreau) .

4. CONCLUSION

En utilisant un amplificateur avec une section de ~ 10 cm², délivrant en mode oscillateur 500 Watts à un taux de répétition de 500 Hz, il serait possible d'obtenir un système capable de fournir 2000 à 2500 impulsions de plus de 100 mJ par seconde soit plus de 250 Watts de puissance moyenne. En associant six de ces systèmes les spécifications requises pour la lithographie EUV pourraient être atteintes. Il reste cependant à valider expérimentalement le surcroît d'efficacité d'un train de 4-5 impulsions pour la génération d'EUV.

Références

1. S. Branly, Thèse de doctorat de l'Université Paris XIII, 1999.
2. R. Stuijk, I. Turcu, in *CLF Annual Report*, 1997/1998.