

Intérêt des sources X pour la production en microélectronique

F. Rousseaux

Laboratoire de Microstructures et de Microélectronique, L2M/CNRS, 196 avenue Henri Ravera, BP 107, 92225 Bagneux Cedex, France

Résumé : La lithographie X par proximité peut être considérée comme une relève probable de la lithographie optique pour la production des circuits imprimés à très forte intégration ($< 0,1 \mu\text{m}$). Dans ce papier, nous présentons les possibilités de cette méthode comparée à la lithographie optique. Deux sources X compétitives sont présentées: synchrotron et plasma-laser. Les mérites de la lithographie X par projection sont également discutés. Enfin de nouvelles perspectives pour la lithographie X sont annoncées dans le domaine de la microfabrication.

Abstract : In this paper, proximity X-ray lithography (XRL) is presented as an alternative path to ultra-large-scale-integrated circuit (ULSI) with feature sizes of one tenth micrometer and below using synchrotron and laser plasma X-ray sources. Soft X-ray projection lithography is also discussed and compared with XRL. Finally prospects in microfabrication are given to justify the interest of XRL.

1. Introduction

La lithographie est une opération qui consiste à créer un dessin en relief dans une résine sensible à une radiation. Cette étape de transfert d'un motif géométrique de dimension contrôlée est indispensable dans la fabrication des composants électroniques et des circuits intégrés. Pour la fabrication d'un seul composant, cette opération se répète un grand nombre de fois, 10 à 15 fois, c'est donc une technologie dont le coût et l'efficacité a un grand impact sur le coût du circuit final. L'intégration de composants dans des circuits de plus en plus denses conduira vers la fin du siècle à des dimensions minimales de traits de l'ordre de $0,25 \mu\text{m}$. La production industrielle de circuits intégrés, actuellement basée sur la lithographie optique, aura besoin alors sans doute de recourir à d'autres méthodes de lithographie. Dans ce contexte la lithographie par rayons X peut être considérée comme une méthode alternative pour aborder le domaine des dimensions inférieures à $0,25 \mu\text{m}$. Depuis quelques années des programmes de recherche et développement existent dans différents pays en particulier en Allemagne, au Japon et aux Etats-Unis qui utilisent essentiellement le rayonnement synchrotron comme source de rayons X (RX). En France, une seule expérience a été mise en place par le laboratoire L2M sur l'anneau de stockage Super-ACO avec l'appui de Thomson-CSF au départ. Parmi les sources ponctuelles divergentes, les sources plasma-laser peuvent être compétitives vis à vis du rayonnement synchrotron. Elles présentent l'avantage de la compacité mais ne sont pas encore assez brillantes. Des efforts importants sont consentis dans ce domaine surtout aux Etats-Unis

2. Comparaison entre la lithographie optique et par rayons X

Parmi les différentes techniques de lithographie existantes, seules la lithographie optique et la lithographie par rayons X peuvent répondre aux besoins d'une production de masse. Ces

deux méthodes s'opèrent au travers d'un masque qui est constitué de parties transparentes et de parties opaques au rayonnement choisi. La lithographie optique utilise des optiques de réduction (N:1) ce qui permet d'utiliser des masques sur lesquels les motifs élémentaires sont d'assez grandes dimensions. Ceci facilite les problèmes d'écriture, d'inspection et de réparation de masques. Le domaine spectral utilisé est celui de l'UV et du "deep" UV (400 nm à 150 nm). La lithographie par rayons X utilise un domaine spectral très différent où les longueurs d'onde sont plus courtes (0,5 à 5 nm), elle se pratique donc en proche proximité puisque qu'il n'existe pas d'optiques X dans ce domaine spectral. La distance échantillon - masque reste inférieure à 100 μm . L'obtention de masques X de très forte résolution est la difficulté essentielle puisque que le transfert du motif dans la résine se fait dans un grandissement 1:1.

Le tableau 1 présente pour comparaison les propriétés respectives des lithographies optique et rayons X et met en évidence les possibilités réelles des RX. Il montre que le facteur résolution qui est toujours invoqué pour justifier la lithographie X n'est pas le seul argument significatif.

Tableau 1: Comparaison lithographie optique et RX

OPTIQUE	RAYONS X
. Rapidité	. Rapidité
. Grandes surfaces	. Grandes surfaces
. DOF- très petit	. DOF - grand
. Diffraction aux interfaces	. Pas de diffraction fort contraste
. Procédé multicouches	. Procédé monocouche simplicité
. Aberrations	. Pas de distorsions
. Résolution	. Résolution
0.8 μm /industrie	0.35 μm R&D
0.5 μm / R&D	0.15 μm Rech.
0.35-0.25 μm Recherche masques + phase	
. Contamination	. Insensible poussière

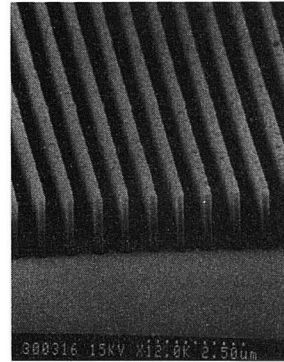


Fig.1: Traits de résine PMMA de 0,15 μm de large. Le facteur de forme est de 11

La grande profondeur de champ de la lithographie X permet d'obtenir des facteurs de forme excellents et un contrôle dimensionnel facile (Fig. 1, cliché L2M). L'absence de phénomènes de réflexion ou de diffraction aux interfaces résine-air et résine-substrat est un avantage notable. Ces effets qui sont dus à la variation de l'indice de réfraction pour chaque milieu sont très gênants dans le cas des UV et n'existent pas pour les RX puisque l'indice de réfraction est sensiblement le même pour tous les milieux et égal à 1 (c'est la raison pour laquelle il n'existe pas de lentilles réfractives pour les RX). En lithographie optique, pour pallier à cet inconvénient, il faut recourir à une technologie complexe de procédés multicouches tandis qu'un simple procédé monocouche suffit pour la lithographie X. L'insensibilité à la contamination, les poussières sont transparentes aux RX, est également un facteur très positif pour la lithographie X.

Lorsqu'on compare les résolutions respectives des deux méthodes on constate la supériorité des RX, cependant, les prévisions de résolution de la lithographie optique ne cessent de s'améliorer comme l'indique le tableau 2.

La résolution du système optique est donnée par $LW = K_1 \lambda / NA$ où λ est la longueur d'onde, NA l'ouverture numérique et K_1 un facteur qui dépend du procédé. La profondeur de champ est donnée par $DOF = K_2 \lambda / (NA)^2$. Pour augmenter la résolution, il faut diminuer λ mais ceci a une limite, qui se situe vers 150 nm, imposée pour que les masques restent suffisamment transparents. Diminuer NA permet également d'augmenter la résolution mais a

Tableau 2: Prévisions pour la lithographie optique

Intégration	Résolution	Maximum de production
16 M-bit	0,5 à 0,6 μm	1995
64 M-bit	0,35 à 0,45 μm	1998
256 M-bit	0,25 μm	2001

pour conséquence de réduire la profondeur de champ. Il y a donc également une limite.

En prenant les valeurs les plus performantes actuelles, on trouve ainsi une résolution $LW = 0,5 \mu\text{m}$ avec $\text{DOF} = 0,75 \mu\text{m}$ si $\lambda = 248 \text{ nm}$ (laser excimère KrF), $\text{NA} = 0,4$ et $K_1 = 0,8$. Une valeur aussi faible de la profondeur de champ conduit à des difficultés au niveau des procédés technologiques puisque sur une plaquette il existe des différences de niveau beaucoup plus importantes.

Pour atteindre les objectifs finaux du tableau 2, il va être nécessaire de réaliser un très gros effort technologique qui sera coûteux. Celui-ci porte sur la fabrication d'un nouveau type de masques optiques ayant un plus fort contraste, masques à déphasage, [1][2], et sur le développement de résines permettant de diminuer le facteur K_1 .

Les prévisions de la lithographie X sont moins précises puisque les choix des industriels ne sont pas encore totalement définitifs vis à vis d'elle. Des démonstrations ont été faites par NTT, oscillateur en anneau à $0,3 \mu\text{m}$ et par IBM, MOS à $0,5 \mu\text{m}$.

3. Lithographie X par proximité

Les performances de la lithographie X par proximité dépendent d'un ensemble de composantes qui doivent être optimisées de façon globale [3][4][5]. La recherche du meilleur compromis met en jeu le choix de la longueur d'onde, de la source X, de l'architecture du masque, des matériaux pour absorbants et membranes, de la résine, de la méthode d'alignement, etc....

Choix de la longueur d'onde λ

En dessous de 150 nm , longueur d'onde limite pour la lithographie optique, il faut atteindre le domaine des RX mous pour trouver des matériaux peu absorbants permettant de réaliser des membranes transparentes par transmission. D'où une première condition: $\lambda < 5 \text{ nm}$

La résolution est limitée par deux phénomènes physiques : la diffraction des RX (diffraction de Fresnel) au travers du masque et la diffusion des photoélectrons créés par l'interaction photons X - résine.

La diffraction dépend de la longueur d'onde λ et de la distance masque-échantillon g . La résolution varie comme $LW = \alpha (\lambda g)^{1/2}$ où α dépend du procédé et varie entre 0 et 2,5. De récents calculs ab-initio associés à des résultats expérimentaux ont montré [6][7] que la marge de manoeuvre est grande. Des résolutions de 100 nm sont facilement obtenues pour $0,5 \text{ nm} < \lambda < 1,5 \text{ nm}$.

L'interaction entre les photons X et la résine crée des avalanches d'électrons énergétiques de "cœur" et des électrons secondaires Auger qui sont responsables des changements chimiques des molécules. La description du processus de transfert d'énergie est complexe et ne peut être calculée qu'à partir de simulations Monte-Carlo. On peut néanmoins décrire grossièrement la portée de ces électrons par un "libre parcours moyen des photoélectrons". On s'attend à trouver des valeurs d'autant plus importantes que l'énergie de départ des RX est plus élevée. Des expériences récentes [8] ont montré que cette distance est égale à 5 nm pour les longueurs d'onde supérieures à $0,8 \text{ nm}$, $\lambda > 0,8 \text{ nm}$. Ceci est négligeable et représente la résolution ultime que l'on peut atteindre avec les rayons X dans le cas d'une lithographie par contact avec une résine ayant une excellente résolution.

Des facteurs complémentaires interviennent dans le choix de la longueur d'onde qui concernent la qualité des masques X et l'efficacité des résines.

La transmission à travers la membrane du masque doit être supérieure à 50% et l'absorption dans les motifs doit être supérieure à 90%. Les membranes sont faites avec des matériaux légers, Si, SiN_x , SiC. Leur épaisseur reste limitée à quelques microns dans la gamme spectrale 0,5-1,5 nm ce qui les rend fragiles. L'absorbant correspond à des matériaux lourds, Au, W, Ta. Les épaisseurs d'absorbants ne doivent pas être supérieures à 5 fois la dimension latérale du motif pour respecter un bon facteur de forme. Pour les petites dimensions latérales les longueurs d'onde un peu courtes sont à exclure. La gamme spectrale optimum pour l'absorbant serait donc 1-1,5 nm.

Le phénomène d'absorption dans la résine doit être raisonnable c'est à dire de 10 à 30% pour une épaisseur de résine de 0,5 μm . L'absorption est d'autant plus grande que la longueur d'onde est grande.

En prenant en compte toutes ces considérations, on peut considérer que la gamme spectrale optimum pour faire de la lithographie par proximité correspond à $0,7 \text{ nm} < \lambda < 1,5 \text{ nm}$

Sources X

Actuellement deux sortes de sources X peuvent être utilisées pour la lithographie X qui ont des puissances suffisantes pour que les temps d'exposition soient raisonnables (quelques secondes): le rayonnement synchrotron et les sources plasma-laser [4][9][10].

Le rayonnement synchrotron est la source idéale de part ses qualités intrinsèques de collimation, de flux intense, de polychromatisme. Des anneaux spécialement conçus pour la lithographie X fonctionnent aujourd'hui. Il en existe déjà une demi-douzaine au Japon et à aux Etats-Unis. Certains d'entre eux sont des anneaux à aimants conventionnels ("chauds") [11][12], d'autres des anneaux à aimants supra-conducteurs ("froids") ce qui permet une grande compacité au sol. La société Sumitomo Heavy Industries (SHI) vend un anneau compact réalisé à partir d'un seul aimant circulaire de 3 m de diamètre [13]. Des anneaux compacts du type "racetrack" avec deux aimants semi-circulaires et deux sections droites représentent une solution plus performante. L'un réalisé pour la société NTT est opérationnel depuis 1989 [14], l'autre réalisé pour la société IBM par Oxford Instruments [15] fonctionne depuis novembre 1991. Ces anneaux mesurent 6 m dans leur plus grande dimension.

Les sources synchrotron sont cependant relativement chères et exigent une réorganisation totale de l'usine qui doit être centrée autour de la source. Le faisceau étant émis dans le plan horizontal il est nécessaire de construire des aligneurs verticaux. De plus, compte tenu de la géométrie rectangulaire du faisceau synchrotron, il faut, pour agrandir le champ d'insolation soit déplacer l'ensemble masque-échantillon verticalement devant le faisceau, soit introduire dans la ligne de lumière un miroir oscillant, soit déplacer l'orbite dans son plan vertical. Toutes ces solutions ont été explorées et testées et conduisent à des résultats positifs.

Parmi les sources X ponctuelles et divergentes seule la source plasma-laser est compétitive pour l'application lithographie X où il faut conjuguer haute résolution et haut flux de photons

Dans le cas des sources ponctuelles, la résolution est dégradée par l'effet de pénombre ou flou géométrique $\rho = Sg/L$ qui dépend de la taille de la source S et de la distance source-échantillon L (Figure 2).

(Figure 2). Avec une source plasma-laser dont la taille est faible et de l'ordre de 200 μm , cet effet est très réduit. Un autre avantage de cette source réside dans sa stabilité en position et dans le temps ce qui n'est pas le cas des sources Z-pinch. Pour éviter d'autres défauts géométriques qui sont dus à la largeur du champ d'exposition (Figure 2) ($\delta = dg/L$) et à la variation du gap ($\Delta\delta = d\Delta g/L$), il est nécessaire de collimater le faisceau et de contrôler le gap à 0,2 μm

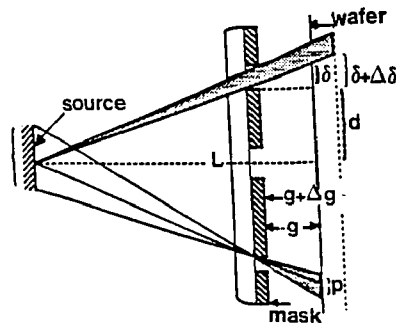


Fig.2: Défauts géométriques

Le flux arrivant sur l'échantillon est cependant plus faible dans le cas de l'émission plasma-laser (3 mW/cm^2) que dans le cas du synchrotron (50 mW/cm^2). Avec la source commercialisée par Hampshire Instruments [16], dont le pic d'émission se situe à $1,3 \text{ nm}$, et l'utilisation d'une résine sensible, le temps d'exposition est de 5 secondes, ce qui est réaliste. Pour le futur, il faut envisager d'augmenter le flux pour atteindre au moins 12 mW/cm^2 . Le principal effort est fait aux Etats-Unis à travers le programme DALP. Le grand avantage de telles sources est de pouvoir proposer des ensembles source+ aligneur couplés constituant de petits modules comparables à ce qui existe actuellement avec les sources UV pour la microélectronique.

Technologie de masque

La fabrication des masques est le challenge le plus sérieux pour la lithographie X car ils doivent répondre à de nombreuses spécifications. La résolution finale obtenue dans la réplication dépendra essentiellement de la qualité du masque. Actuellement ceux-ci ne sont pas commercialisés et chaque groupe développe sa propre technologie. De grands progrès ont été faits au niveau des matériaux constituant le masque tandis que le problème majeur à résoudre maintenant réside dans l'écriture des masques par faisceau d'électrons. La figure 4 présente l'architecture type d'un masque X.

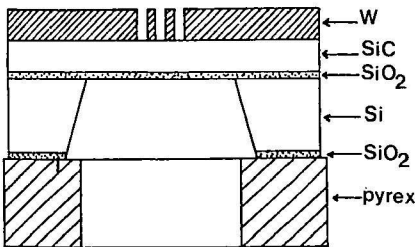


Fig.4: Architecture d'un masque X

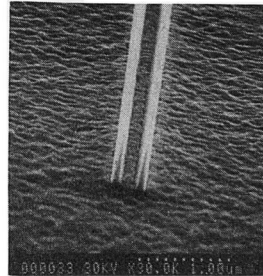


Fig.5: Double grille gravée dans $0,4 \mu\text{m}$ de W avec une résolution de 80 nm (cliché L2M)

Le film constituant la membrane est déposé sur un substrat de silicium standard qui est évidé ensuite par des méthodes de gravure chimique. Cette membrane doit être plane et tendue pour éviter les distortions hors plan des motifs. Ceci implique que l'on sache contrôler les contraintes dans le matériau. La membrane doit être transparente aux RX ($e < 3 \mu\text{m}$) et optiquement pour des contraintes d'alignement. Les matériaux à fort module d'Young, comme SiC et le diamant, sont donc préférables pour assurer une certaine solidité.

Sur cette membrane est ensuite déposé le matériau absorbant. Celui-ci ne doit pas comporter de contraintes internes afin d'éviter toute distorsion des motifs. Son épaisseur doit être optimisée par rapport à la dimension latérale du motif et la longueur d'onde utilisée de façon à obtenir un bon contraste de masque, typiquement fixé à 10 db. Il est judicieux de choisir des couples de matériaux membrane-absorbant ayant des coefficients de dilatation comparables entre eux et par rapport au substrat silicium. Dans cette optique le couple SiC-W est intéressant, c'est le choix du laboratoire L2M [17]. Tous ces matériaux doivent être insensibles aux effets d'irradiation et présenter d'une façon générale une bonne stabilité vis à vis des procédés ultérieurs qu'ils ont à subir (traitement thermique, écriture, gravure etc...).

L'écriture du masque est le challenge majeur dans la réalisation des masques. Elle est généralement réalisée par faisceau d'électrons. Actuellement on peut garantir un bon contrôle dimensionnel et une bonne précision de positionnement des motifs jusqu'à $0,5 \mu\text{m}$ de largeur

de trait. En-dessous, l'intégration à $0,1 \mu\text{m}$ impose une erreur de positionnement inférieure à 10 nm en 3σ sur un champ de 2 à 4 cm . Les masqueurs électroniques actuels ne le permettent pas. Des solutions sont proposées qui restent encore dans le domaine de la recherche [18]. Le contrôle dimensionnel du trait dans la résine dépend de l'existence d'électrons rétrodiffusés par le substrat et dont la répartition spatiale porte sur des distances allant de quelques μm à quelques dizaines de microns pour des énergies de 1 à 100 keV . L'insolation d'une ligne submicronique dépend donc de la répartition des motifs environnants : c'est l'effet de proximité. La maîtrise des dimensions dans le domaine très submicronique suppose que l'on contrôle la dose totale déposée en un point et que l'on prenne en compte la correction des effets de proximité. Dans la pratique, cette correction pose des problèmes de temps de calcul et de saturation de mémoires.

Le transfert du dessin écrit dans le matériau absorbant se fait suivant deux procédés différents. Si l'absorbant est l'or le procédé est dit additif, la résine servant de moule dans lequel on fait croître de l'or par électrodéposition. Si l'absorbant est soit W ou Ta , métaux réfractaires plus stable que l'or, le procédé est dit soustractif car le transfert se fait par gravure sèche (RIE) dans le métal. De très hautes résolutions sont atteintes comme l'indique la figure 5.

A la fin de cette série d'opérations, le masque de silicium est collé sur un anneau de pyrex dont les faces sont très parallèles et ont un poli optique. Ceci constitue une charpente solide pour le masque et oblige le silicium à épouser la planéité du pyrex. La géométrie de cet ensemble doit être aussi plane que possible pour assurer un bon parallélisme entre le masque et l'échantillon et donc un très bon contrôle du gap ($<1\mu\text{m}$).

Pour l'inspection et la réparation des masques X des solutions existent. L'inspection est réalisée par microscopie électronique par transmission à balayage et de haute énergie (100 keV). La réparation d'un masque est faite en utilisant des faisceaux d'ions focalisés qui peuvent soit usiner le métal (défauts "opaques") soit déposer du métal (défauts "clairs").

Duplication

Si la résolution est acquise sans difficulté, les systèmes d'alignement masque-échantillons ne sont pas encore suffisamment performants pour aborder le domaine d'intégration ULSI ($0,1 \mu\text{m}$). Des démonstrations à $0,25$ - $0,35 \mu\text{m}$ sont l'enjeu actuel. Cependant le domaine très submicronique (nanolithographie) est déjà abordé par les laboratoires de recherche dans la perspective d'étudier des phénomènes quantiques, ceci fait partie des enjeux du L2M. Des démonstrations de réalisations de composants comme les MOSFET et MODFET ont été essentiellement publiées [19] par le groupe de H.I.Smith qui pratique couramment des résolutions de $0,1 \mu\text{m}$ avec un microgap de 4 à $5 \mu\text{m}$ et 50 nm en contact [7]. La figure 6 donne un exemple de ce qui a été réalisé à Super-ACO par le L2M: des traits de 60 nm de large pour une période de $0,25 \mu\text{m}$ avec un facteur de forme de 8 dans la résine PMMA [20].

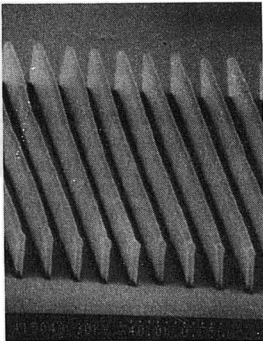


Fig.6: Réseau de traits de largeur 60 nm dans $0,45 \mu\text{m}$ de résine PMMA

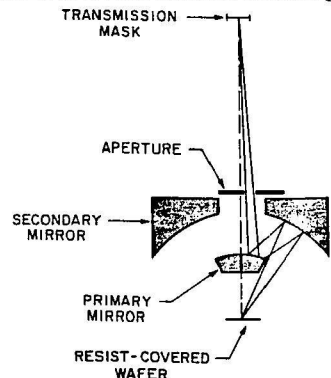


Fig.7: Schéma de lithographie X de réduction (AT&T Bell Lab.)

4. Lithographie X par projection

Avec les progrès réalisés dans le domaine de la fabrication de miroirs multicouches, il devient possible de réaliser des optiques X suffisamment performantes dans le domaine spectral 13-14 nm. Ceci a relancé un regain d'intérêt pour la lithographie X de réduction qui transposerait la méthode de projection d'un masque avec un facteur de réduction (N:1) utilisée en lithographie optique. Une démonstration spectaculaire a été publiée en 1990 par un groupe de AT&T Bell Laboratories [21-23] qui a pu réaliser des traits de 0,1 μm à partir d'une optique de réduction 20:1 du type "lentilles de Schwarzschild" sur un champ de 25x50 μm (Figure 7). Les miroirs multicouches utilisés correspondaient au couple Si/Mo dont le pic de réflectivité en incidence normale était de 65% pour $\lambda = 13$ nm. Cependant, cette expérience exemplaire met en évidence les difficultés inhérentes à cette méthode qui devront être surmontées pour que celle-ci soit crédible vis à vis de l'application lithographie X:

- le domaine spectral des 13 nm n'est pas très compatible avec les résines actuelles. Celles-ci sont trop absorbantes. En conséquence, l'épaisseur de résines insolées est très faible (10 nm) et oblige à recourir à des procédés complexes multi-couches comme en lithographie optique. Diminuer la longueur d'onde jusqu'à 4,5 nm qui est la fenêtre du carbone ne semble pas réaliste à l'heure actuelle: on ne sait pas faire de multicouches performantes dans ce domaine.
 - la profondeur de champ est très faible: même défaut qu'en lithographie optique.
 - pour travailler avec des champs d'insolation raisonnables, il faut réaliser des optiques avec des miroirs asphériques de grandes surfaces avec une précision de courbure de l'ordre de $\lambda/20$, c'est à dire 0,6 nm. Ceci est un challenge technologique. Il faut également limiter les distorsions dans le champ.
 - la configuration la plus propice consisterait à travailler par réflexion. Ceci conduit à développer une nouvelle technologie de masques.
 - pour assurer une production industrielle, la puissance des sources X actuelles, synchrotrons ou plasma-laser, n'est pas suffisante. Il faudrait la multiplier par un facteur 3 au moins.
- Toutes ces considérations montrent que cette méthode en est à ses débuts et ne peut en aucun cas concurrencer la lithographie X par proximité qui a achevé pratiquement l'étape développement technologique.

5. Conclusion

Il est très difficile de prévoir si et quand la lithographie X sera adoptée comme technique de production en microélectronique.

Ce qui est plus sûr c'est qu'elle semble avoir un avenir dans la microfabrication. En effet un nouveau procédé, appelé procédé LIGA, qui utilise la lithographie X dans le domaine des rayons X durs (2 nm) et l'électrodéposition permet de réaliser des structures à trois dimensions, de hauteur importante (<1mm) et aux formes bien définies (dimension latérale quelques μm). Ce procédé développé par W.Erhfeld [24-26] a déjà été utilisé pour fabriquer des microstructures dans les domaines de la micro-mécanique, de l'optoélectronique, des micro-capteurs, etc.... Dans ce procédé le moule de résine est rempli par galvanoplastie de métal et cette forme est ensuite utilisée pour faire un moule de fabrication. Les objets obtenus par un tel procédé ont des propriétés de surface exemplaires par rapport aux mêmes objets réalisés par micro-usinage mécanique de précision.

Références

- [1] K.Nakagawa et al, IEEE International Electron Devices Meeting, Dec 9-12, 1990, San Francisco, California
- [2] S. Tedesco et al, J.Vac.Sci.Technol. B9 (6), Nov/Dec 1991
- [3] A. Wilson, Proc.SPIE 537, 85 (1989)
- [4] A. Heuberger, J.Vac.Sci.Technol. B6 (1), Jan/Feb 1988
- [5] H.I.Smith, Semiconductor Materials and Processing Technologies, Editor J.M.Poate, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands (1992)
- [6] M.L.Schattenburg et al, J.Vac.Sci.Technol.B, Nov/Dec. (1991)
- [7] W. Chu et al., Appl. Phys. Lett. 59, (1991)
- [8] K. Early et al, Microelectronic Engineering 11 (1990)
- [9] H. Pépin et al, J.Vac.Sci.Technol. B5, (1987)
- [10] M. Chaker et al., J.Appl.Phys. 63 (3), 1 February 1988
- [11] K. Okada, J.Vac.Sci.Technol. A6 (3), May/June 1988
- [12] T. Tomimasu, Synchrotron Radiation News, Vol 1, n°4, 1988
- [13] H. Yamada, J. Vac. Sci. Technol.B 6, Nov/Dec 1990
- [14] T. Kitayama et al, SPIE vol. 1089 Electron, X-Ray, and Ion-Beam Technology: Submicrometer Lithographies VIII (1989)
- [15] M.N. Wilson, Microelectronic Engineering 11 (1990)
- [16] J. Frackowiak et al, J.Vac.Sci.Technol. B9 (6), Nov/Dec 1991
- [17] A.M.Haghiri-Gosnet et al, J.Vac.Sci.Technol.B8 (6), Nov/Dec 1990.
- [18] Henry I.Smith et al, J.Vac.Sci.Technol.B, Nov/Dec 1991
- [19] Henry I. Smith et al, Microelectronic Engineering 11 (1990)
- [20] F.Rousseaux et al, Microelectronic Engineering (1991)
- [21] J.E. Bjorkholm et al., J.Vac.Sci.Technol. B8 (1990)
- [22] T.E. Jewel et al, SPIE vol 1263 (1990)
- [23] G.D. Kubiak et al, J.Vac.Sci.Technol. B9 (6), Nov/Dec 1991
- [24] E.W. Becker et al, Microelectronic Engineering 4, (1986)
- [25] W. Ehrfeld et al, J.Vac.Sci.Technol. B 6 (1), Jan/Feb 1988
- [26] W.Ehrfeld et al., Nuclear Instr.and Methods in Phys.Research, A 303 (1991)