

## Multicouches nanométriques pour l'optique X : quelques exemples applicables aux lasers X

P. Boher et P. Houdy

Laboratoires d'Electronique Philips (LEP), 22 Avenue Descartes, BP.15, 94453 Limeil-Brévann Cedex, France

### Abstract

Nanometric multilayers have long been recognized as powerful devices to make optics in the soft X-ray range. X-ray laser application leads certainly to the most drastic requirements in terms of reflectivity and stability under high flux. State of the art results obtained using ultrahigh vacuum rf-sputtering technique are presented for various wavelength ranges. Above the silicon L- $\alpha$  line ( 127 Å ), *Mo/Si* system shows the higher reflectivity at normal incidence (  $R > 50\%$  ), in spite of the occurrence of thin silicide layers at each interface. Unfortunately, its thermal stability is very limited, since complete interdiffusion occurs above 400°C. *Si/SiN<sub>x</sub>* and *Si/SiO<sub>x</sub>* systems have a much better thermal stability (  $\approx 800^\circ\text{C}$  ), and a high selectivity which make them suitable for X-ray diagnosis. In the wavelength range 44 - 127 Å , carbon based multilayers have the best potentialities. Nevertheless the reflectivity is limited by the interface roughness due to the metallic layer crystallisation. *W/C*, *Cr/C* and *Mo/C* are certainly the best systems in terms of reflectivity and thermal stability. At short wavelength (  $< 44 \text{ \AA}$  ), interdiffused systems such as *W/Si* offer the possibility to reduced the layer thicknesses at very low value (  $d < 20 \text{ \AA}$  ). Its thermal stability is nevertheless limited to about 300°C.

### 1. Introduction

L'utilisation d'empilements multicouches à l'échelle nanométrique comme réflecteurs de rayons X mous et mi-durs a connu un grand développement ces dernières années. Parmi les applications concernées on peut citer la spectrométrie de fluorescence X, les utilisations du rayonnement synchrotron ou l'astronomie X. L'utilisation de ce type de miroirs pour réaliser une cavité laser dans la gamme des rayons X mous reste cependant très difficile malgré les nombreux efforts déployés à l'heure actuelle. Les contraintes imposées par cette application sont en effet extrêmement drastiques: grande réflectivité, incidence normale, stabilité sous haut flux, sans parler des optiques semi-transparentes sur substrats très minces. La situation est toutefois plus prometteuse dans le cas des optiques pour diagnostics où les spécifications sont moins sévères.

Après un bref rappel du principe des optiques multicouches et de l'effet des principales imperfections sur les performances des miroirs, cet article donnera quelques exemples de réalisations effectuées au LEP dans une gamme assez large de longueurs d'onde. L'évolution thermique des empilements sera en particulier précisée dans la perspective d'une utilisation de type laser X.

### 2. Principe des réflecteurs de Bragg et effet des principales imperfections.

Dans la gamme des rayons X mous (  $10 < \lambda < 400 \text{ \AA}$  ), les indices de tous les matériaux sont très peu différents de ceux du vide, ce qui conduit à des coefficients réflecteurs extrêmement faibles en dehors des incidences très rasantes. Comme l'a montré E. Spiller dès 1972 (1), l'alternance périodique de deux matériaux, l'un le plus absorbant possible et l'autre le plus transparent possible, permet cependant d'atteindre des coefficients réflecteurs de plusieurs dizaines de pourcents en situation

d'interférences constructives, c'est à dire quand la loi de Bragg ( $2d \sin \theta = \lambda$ ) est vérifiée. Les performances théoriques de ce type d'empilement à une longueur d'onde donnée ne dépendent que du contraste d'indice entre les deux matériaux par l'intermédiaire d'expressions analytiques très simples publiées par A. Vinogradov en 1977 (2). De ce fait, en utilisant les sections efficaces de diffusion de tous les éléments, tabulées en fonction de la longueur d'onde (3), il est facile de déterminer les couples de matériaux les plus efficaces à chaque longueur d'onde (4). Les meilleures combinaisons associent généralement un espaceur dont une des raies d'émission est proche de la longueur d'onde de travail et un élément métallique faisant office de réflecteur.

L'influence des imperfections structurales des empilements réels peut être simulée en utilisant la théorie des équations de Fresnel (5). L'épaisseur des couches doit être reproductible à mieux que 0.1% près pour éviter une perte sensible de réflectivité (6). L'interdiffusion entre matériaux ne devient par contre pénalisante que quand elle est du même ordre de grandeur que l'épaisseur des couches ce qui n'est souvent le cas que pour les périodicités très faibles ( $d < 30 \text{ \AA}$ ). Un autre défaut très fréquent est la rugosité d'interface qui accroît la diffusion et limite très rapidement la réflectivité pour les courtes longueurs d'onde. La manière la plus simple de prendre en compte ce défaut dans le calcul de la réflectivité théorique est d'introduire un facteur de Debye-Waller  $D(7)$  de la forme:

$$R = R_0 \times D = R_0 e^{-4k^2 \sigma^2} = R_0 e^{-\left(\frac{2\pi m \sigma}{d}\right)^2}$$

où  $R$  et  $R_0$  sont respectivement les réflectivités avec et sans rugosité d'interface,  $k$  est le module du vecteur de propagation du champ électrique,  $\sigma$  la rugosité,  $d$  la période de l'empilement et  $m$  l'ordre de Bragg considéré.

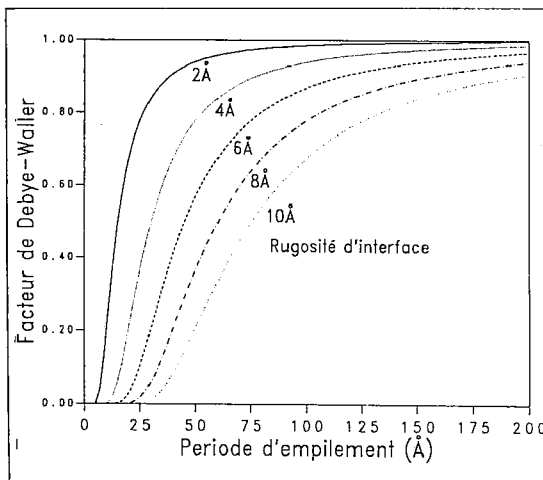


Figure 1: Facteur de Debye-Waller pour diverses valeurs de rugosité d'interface en fonction de la période des empilements.

### 3. Méthodes expérimentales.

Tous les systèmes multicouches décrits dans la suite ont été déposés par pulvérisation diode radiofréquence dans un bâti de dépôt ultraviolet spécialement conçu pour disposer d'un contrôle très précis des épaisseurs déposées et des interfaces. Un

Les variations du facteur  $f.D$  en fonction de la valeur de la période sont reportées sur la figure 1 pour différentes valeurs de rugosité d'interface. La figure montre que l'influence de la rugosité d'interface est prépondérante dans le cas d'empilements à courtes valeurs de période ( $d < 30 \text{ \AA}$ ) nécessaires à la réalisation d'empilement à incidence normale pour  $\lambda < 60 \text{ \AA}$ . Elle est par contre beaucoup moins importante dès que la période est supérieure à  $60 \text{ \AA}$ .

dispositif original de pulvérisation pseudo-réactive permet d'élargir les possibilités du système en autorisant le dépôt d'oxydes ou de nitrures à partir de cibles de métaux purs (8). Tous les paramètres de dépôt (pression totale, pression partielle tension d'autopolarisation des cibles), sont régulés très précisément tout au long d'une expérience et les temps de dépôt sont contrôlés à l'aide de volets rapides. Une mesure en temps réel par ellipsométrie cinétique permet de suivre les processus de formation des interfaces (9), autorisant ainsi une optimisation facile des conditions de croissance.

Les paramètres structuraux des empilements sont mesurés ex-situ après dépôt par réflectométrie de rayons X rasants à la raie K- $\alpha$  du cuivre (10). La cristallinité est évaluée par le même appareillage en configuration de diffraction "standard", ainsi que par microscopie électronique à transmission haute résolution (11). Les performances optiques sont mesurées soit à l'aide d'un tube classique à la raie d'émission de divers éléments légers (12), soit à l'aide du rayonnement synchrotron (13). La stabilité thermique est évaluée par recuits successifs d'un même échantillon sous atmosphère neutre et mesurée par réflectométrie de rayons X rasants.

#### 4. Résultats expérimentaux.

##### a) Grandes longueurs d'ondes ( $\lambda > 127 \text{ \AA}$ ).



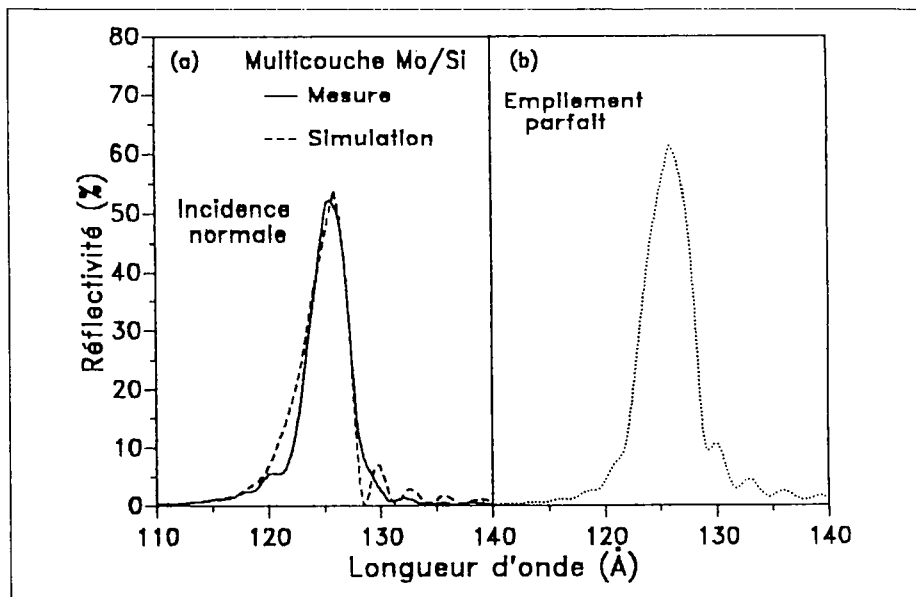
**Figure 2:** Cliché de microscopie électronique à transmission d'un empilement Mo/Si. L'échantillon déposé sur silicium a été préparé par microclivage. La présence de couches de siliciure amorphe à chaque interface est mise en évidence ainsi que l'état cristallisé des couches de molybdène.

##### Système Mo/Si.

Après optimisation des conditions de dépôt, le système Mo/Si présente toujours des couches interdiffusées aux interfaces comme le montre la photographie de microscopie à transmission de la figure 2. Dans ce cas, l'échantillon a été microclivé, ce qui exclut tout artefact de préparation. Les interfaces apparaissent avec une densité intermédiaire entre celle du molybdène et celle du silicium. Il s'agit en fait de couches

Au dessus de la raie d'émission L- $\alpha$  du silicium, le couple de matériaux donnant les plus fortes réflectivités, aussi bien théoriques qu'expérimentales, est Mo/Si. Le calcul de la réflectivité maximale en fonction de la longueur d'onde obtenue par la méthode de Vinogradov (2), donne en effet des valeurs de réflectivité de l'ordre de 80% à la raie d'émission du silicium. La sélectivité de ces empilements, optimisés en terme de réflectivité est par contre relativement faible ( $\lambda / \delta \lambda \approx 20$  en incidence normale). Dans la suite, nous décrivons des résultats expérimentaux obtenus avec ce système ainsi qu'avec les systèmes Si/SiN<sub>x</sub> et Si/SiO<sub>2</sub>, qui ont des sélectivités deux à trois fois plus importantes, et qui sont par conséquent potentiellement intéressants pour des applications de type diagnostic.

de siliciure de molybdène dont la composition est voisine de  $MoSi_2$ . Ces siliciures apparaissent spontanément au cours de la croissance, comment nous l'avons démontré pour la première fois par ellipsométrie cinétique in-situ (14). Les couches de siliciures sont asymétriques, la diffusion étant de l'ordre de 15 Å à l'interface "Mo sur Si" et de l'ordre de 8 Å à l'interface "Si sur Mo". Cette asymétrie constatée par d'autres auteurs (15), a été récemment simulée en prenant en compte la cristallinité des couches (16).



**Figure 3:** Réflectivité d'un empilement Mo/Si mesuré en incidence quasi-normale en fonction de la longueur d'onde. L'empilement inclut 40 bicouches de période moyenne 65 Å. La simulation inclut deux couches d'interface asymétriques d'épaisseur respective 6 et 13 Å et une dérive d'épaisseur de 1 Å d'un bout à l'autre de l'empilement. La suppression de ces imperfections donne  $\approx 60\%$  de réflectivité maximale (b) comparé aux 53% réellement mesurés (a).

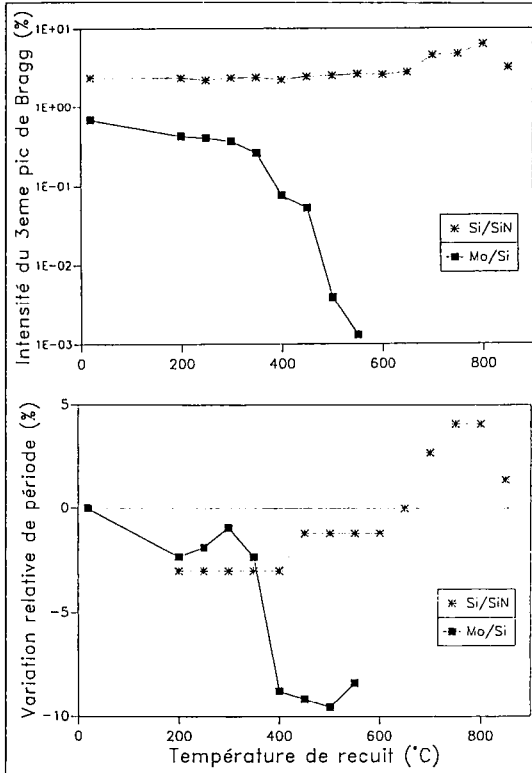
Un exemple de courbe de réflectivité obtenue en incidence quasi-normale à l'aide du rayonnement synchrotron est reportée sur la figure 3. Dans ce cas, la période moyenne de l'empilement est de l'ordre de 65 Å ce qui donne un premier ordre de réflectivité de Bragg très proche de la raie d'émission L- $\alpha$  du silicium. Le maximum de réflectivité mesuré ( $\approx 53\%$ ) est tout à fait comparable aux meilleurs résultats publiés (17). Ce résultat est en accord avec la présence des imperfections signalées ci-dessus, auxquelles s'ajoute une dérive d'épaisseur de l'ordre de 1 Å de bas en haut de l'empilement, et une rugosité d'interface de 2.5 Å. La perte de réflectivité due à l'ensemble de ces imperfections est toutefois relativement limité (cf. figure 3), en accord avec les prévisions théoriques précédentes (cf. figure 1).

#### Systèmes Si/SiN<sub>x</sub> et Si/SiO<sub>x</sub>.

Dans le cas des systèmes Si/SiN<sub>x</sub> et Si/SiO<sub>x</sub> la grande quantité de silicium présent dans les empilements permet d'obtenir une absorption moyenne relativement faible au dessus du seuil L- $\alpha$  du silicium. Un grand nombre de couches participe à la réflectivité et la sélectivité des miroirs est grandement améliorée (18). La réalisation pratique de ce type d'empilement par pulvérisation pseudo-réactive d'une seule cible

de silicium permet d'obtenir des interfaces extrêmement planes et une très bonne régularité des empilements. Les performances de ces miroirs dans la gamme des X mous sont tout à fait en accord avec les prévisions théoriques (réflectivité supérieure à 20% en incidence normale et sélectivité améliorée d'un facteur deux à trois par rapport au système classique  $Mo/Si$  (18))

#### Stabilité thermique comparée des systèmes $Mo/Si$ et $Si/SiN_x$ .



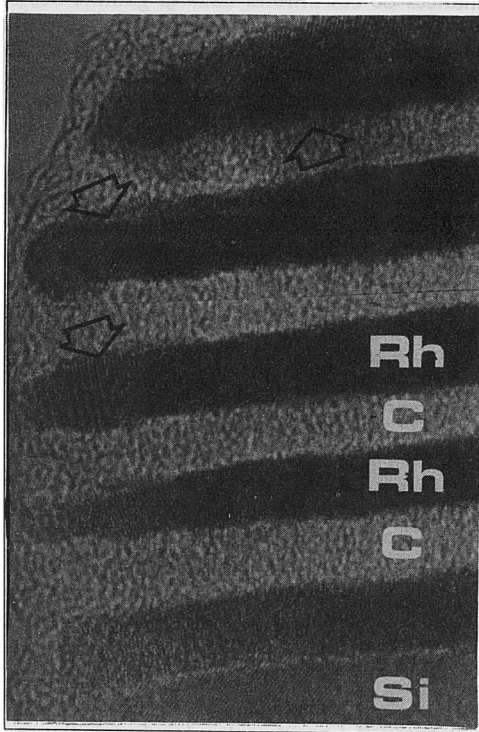
**Figure 4:** Evolution thermique des systèmes  $Mo/Si$  et  $Si/SiN_x$ . L'intensité du troisième pic de Bragg et la variation relative de période évaluées par réflectométrie de rayons X rasants sont reportées en fonction de la température de recuit.

#### b) Longueurs d'ondes moyennes ( $44 < \lambda < 127 \text{ \AA}$ ).

Dans cette gamme de longueurs d'onde l'espacur le plus adapté est le carbone du fait de son absorption relativement faible au dessus de son seuil d'émission  $K-\alpha$ . L'imperfection la plus pénalisante pour la réflectivité des miroirs est ici la rugosité d'interface qui doit être limitée à moins de  $3 \text{ \AA}$  dans le cas des miroirs à incidence normale. Le système le plus étudié est assurément  $W/C$  car il présente des interfaces relativement abruptes et une faible rugosité (6). De plus les couches de carbone déposées par pulvérisation produisent un lissage efficace de la rugosité d'interface (19). L'alternance avec un métal de transition comme Co, Fe, Cr donne toutefois les potentialités les plus importantes (4). D'autres systèmes tels  $Rh/C$  conduisent à des réflectivités théoriques élevées jusqu'à  $\lambda = 100 \text{ \AA}$ .

L'intérêt des empilements de  $Si/SiN_x$  se situe aussi au niveau de leur stabilité thermique exceptionnelle. En effet comme le montre la figure 4 où ont été reportées les évolutions thermiques comparées des deux systèmes, la structure multicouche se maintient après recuit à  $800^\circ\text{C}$ . Dans le cas du système  $Mo/Si$  au contraire la structure multicouche se dégrade progressivement dès recuit à  $200^\circ\text{C}$  et disparaît complètement après recuit à  $400^\circ\text{C}$ . Cette évolution est due à une interdiffusion progressive des couches et à une cristallisation des couches de silicure qui induit une contraction de période (cf. figure 4 et ref (18)). L'évolution thermique des empilement  $Si/SiN_x$  est très différente car la qualité structurale semble s'améliorer après recuit à  $800^\circ\text{C}$  et l'on constate une dilatation de période. Des études sont en cours pour préciser ce mécanisme.

### Cristallisation des couches métalliques.

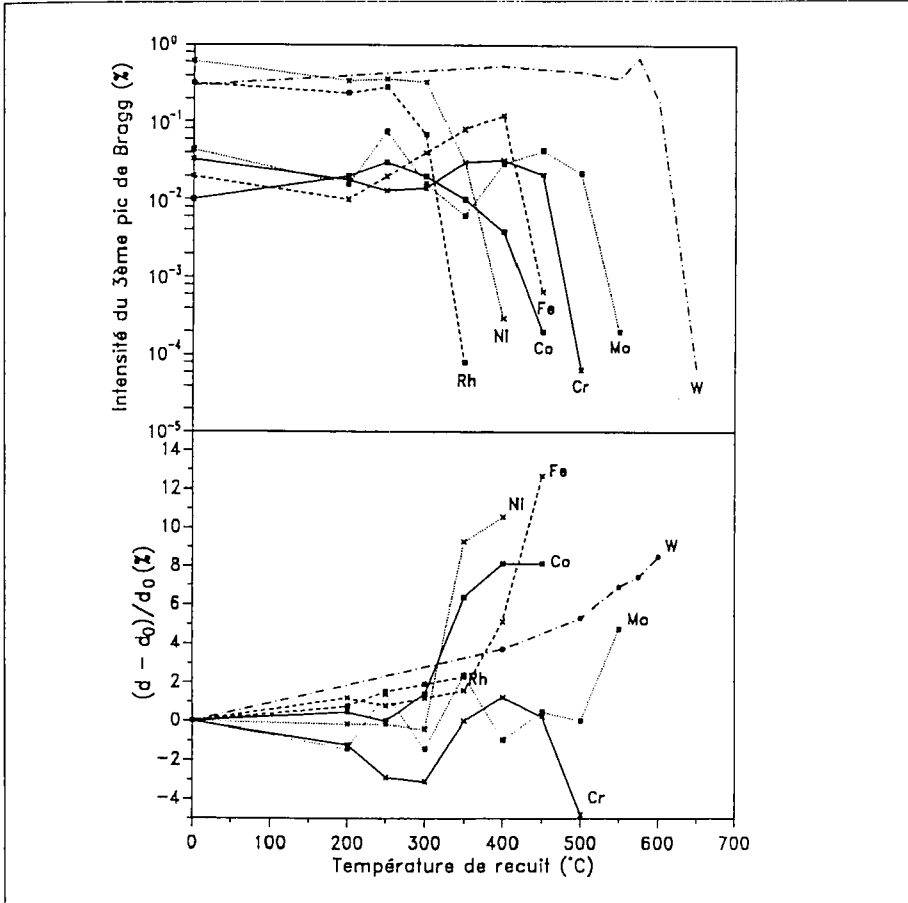


**Figure 5:** Cliché de microscopie électronique à transmission d'un empilement Rh/C. L'échantillon déposé sur silicium a été préparé par microclivage.

Dans beaucoup de cas, les imperfections structurales résultent de la cristallisation des couches métalliques. Ceci induit une rugosité importante et limite donc les performances, notamment lorsque les couches sont très minces. Ce phénomène est particulièrement important dans le cas du système Rh/C (20). L'observation par microscopie électronique à transmission d'un échantillon de test comportant des couches de carbone d'épaisseur fixe ( $\approx 50 \text{ \AA}$ ), et des couches de rhodium d'épaisseur variable (de 20 à 100  $\text{\AA}$ ), est révélateur du phénomène de cristallisation (cf. figure 5). Les couches de rhodium sont en effet d'autant plus cristallisées que leur épaisseur est grande, et l'on détecte même des cristaux de rhodium à l'intérieur des couches de carbone (flèches sur figure 5). Cet effet probablement dû à une trop grande quantité d'énergie présente à la surface peut être limité en adaptant les conditions de dépôt (21). Il conditionne toutefois l'évolution thermique de ces systèmes.

### Stabilité thermique comparée de plusieurs systèmes à base de carbone.

L'évolution thermique des systèmes W/C, Mo/C, Cr/C, Fe/C, Co/C, Ni/C et Rh/C est reportée sur la figure 6. Dans chaque cas, nous avons reporté l'évolution de l'intensité du 3<sup>ème</sup> pic de Bragg et la variation relative de période mesurée en réflectométrie de rayons X rasants en fonction de la température de recuit. La température de destruction à laquelle la réflectivité chute brutalement dépend de la nature de l'élément alterné avec le carbone: elle varie de 300°C pour les éléments les plus sensibles à la cristallisation comme le rhodium et le nickel, à plus de 600°C pour le tungstène. Toutes les évolutions thermiques à l'exception de celle du Cr/C, s'accompagnent d'une dilatation progressive des empilements. Cet effet déjà observé par plusieurs auteurs a été attribué à une dilatation des couches de carbone due à un changement de phase (22). Dans le cas du chrome il est probable que la formation de carbure de chrome, relativement facile au vue des données thermodynamiques, induit une évolution opposée. En tout état de cause, cette étude montre que le choix d'un miroir adapté pour une application de type laser X doit prendre en compte la stabilité thermique aussi bien que la qualité des interfaces réalisables.



**Figure 6:** Evolution thermique de plusieurs systèmes à base de carbone. L'intensité du troisième pic de Bragg et la variation relative de période, évaluées par réflectométrie de rayons X rasants, sont reportées en fonction de la température de recuit.

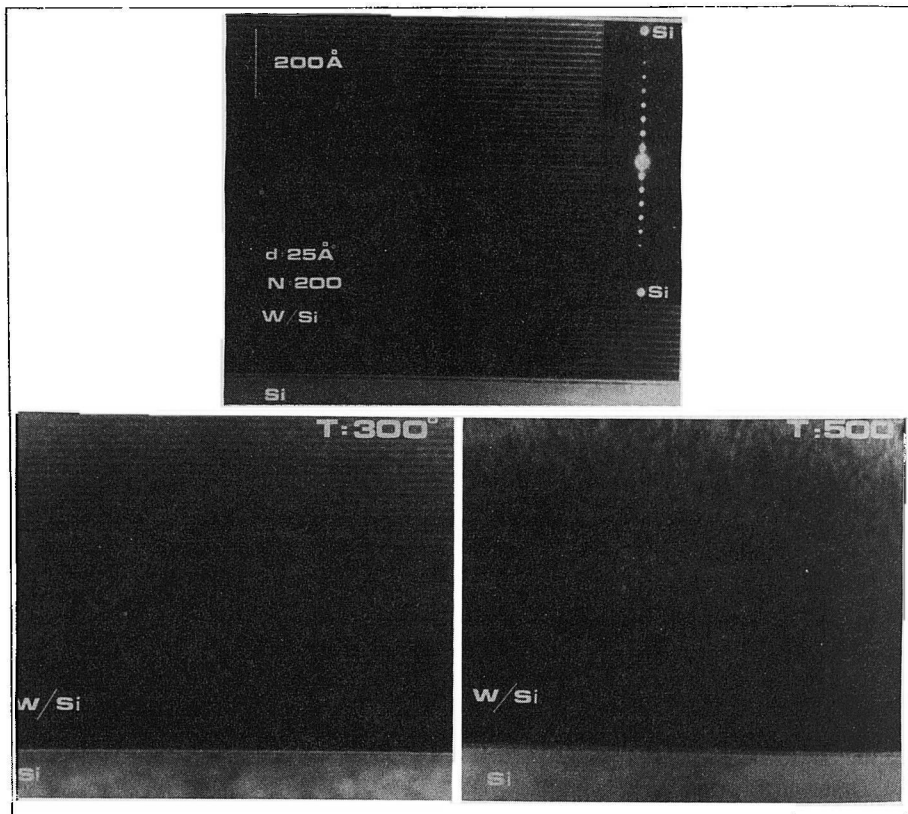
### e) Courtes longueurs d'onde ( $\lambda < 44 \text{ \AA}$ ).

Dans ce cas, la réalisation d'optiques de grande qualité sous incidence normale est pour l'instant hors de portée car les épaisseurs de couches nécessaires deviennent extrêmement faible. Toutefois, le système  $W/Si$  permet d'accéder à des périodes d'empilements relativement faible sans augmentation trop important de la rugosité d'interface (23). Ceci est dû à une forte interdiffusion entre le silicium et le tungstène qui évite des phénomènes de rugosification comme le cristallisation ou la croissance en îlots. La contrepartie à cet effet est un contraste d'indice réduit entre couches du fait de la présence de silicium dans les couches de tungstène et donc des réflectivités notablement plus faibles que ne le prévoit le modèle sans imperfection.

### Evolution thermique du système $W/Si$ .

Par recuit in-situ sous vide, à l'intérieur même d'un microscope à transmission à haute résolution, nous avons pu observer l'évolution structurale d'un empilement

$W/Si$  de période très faible ( $d \approx 25 \text{ \AA}$ ). Comme le montre la figure 7.a, l'échantillon après dépôt présente une bonne qualité structurale avec une rugosité d'interface relativement faible ( $\approx 2.5 \text{ \AA}$  par réflectométrie de rayons X rasants). L'épaisseur des couches de tungstène (sombres) apparaît plus grande que celle des couches de silicium (claires). Ceci est dû au processus d'interdiffusion car le rapport de composition calculé à partir des vitesses de dépôt est de l'ordre de 0.3. Après recuit à  $300^\circ\text{C}$  (cf. figure 7.b), la structure multicouche est conservée mais la rugosité d'interface a nettement augmenté. Cette évolution s'accompagne d'une contraction de période constatée par réflectométrie X, probablement due à un mécanisme d'interdiffusion et une cristallisation de la phase  $W_5Si_3$  déjà constatée par d'autres auteurs (23). Après recuit à  $500^\circ\text{C}$ , la structure multicouche est complètement détruite (cf. figure 7.c).



**Figure 7:** Evolution structurale d'une multicouche  $W/Si$  recuite in-situ dans un microscope à transmission. Les étapes suivantes sont observées: (a) après dépôt, (b) après recuit à  $300^\circ\text{C}$ , (c) après recuit à  $500^\circ\text{C}$ . La période d'empilement est de l'ordre de  $25 \text{ \AA}$  et l'empilement comporte 200 bicouches.

## 5. Conclusion.

Comme l'ont montré les exemples évoqués dans cet article, la réalisation de multicouches nanométriques pour les optiques X se heurte à de nombreux problèmes: rugosité d'interface, couches d'interdiffusion, stabilité thermique limitée... D'autre part, chaque longueur d'onde de travail nécessite l'étude de systèmes de matériaux différents, ce qui amplifie généralement les problèmes.

Pour les longueurs d'onde assez grandes ( $\lambda > 127 \text{ \AA}$ ), le système de matériaux le plus efficace obtenu jusqu'ici est *Mo/Si*, qui permet, comme nous l'avons montré, d'obtenir des réflectivités maximales supérieures à 50%. Ce système présente toutefois deux désavantages: sa stabilité thermique est très limitée du fait de l'interdiffusion relativement facile entre les matériaux; ses performances deviennent relativement mauvaise pour des longueurs d'ondes supérieures à 250  $\text{\AA}$  à cause de l'augmentation du coefficient d'absorption du silicium. L'utilisation de systèmes à base de nitrure comme *Si/SiN<sub>x</sub>* permet de régler en partie le premier problème en admettant toutefois une baisse de réflectivité. La résolution du second problème nécessite l'utilisation d'un autre espaceur. Nous avons obtenu des résultats prometteurs avec le siliciure de magnésium alterné soit avec du tungstène, soit avec du nitrure de silicium (24).

La gamme des longueurs d'onde moyennes ( $44 \text{ \AA} < \lambda < 127 \text{ \AA}$ ) est bien couverte par les empilements à base de carbone. Nous avons montré que le choix de l'autre matériau devait prendre en compte, à la fois la rugosité d'interface et la stabilité thermique. Dans ce contexte, les meilleurs systèmes semblent être des systèmes "classiques" comme *W/C* ou *Mo/C*. L'utilisation de carbure de bore à la place du carbone permet toutefois d'obtenir des résultats intéressants au dessus du seuil K- $\alpha$  du bore ( $67 \text{ \AA}$ ) (25).

Dans le domaine des courtes longueurs d'onde ( $\lambda < 44 \text{ \AA}$ ) la possibilité de déposer des couches très minces sans augmentation notable de rugosité devient indispensable. Dans cette optique, les meilleurs systèmes sont *W/Si* ou *W/Mg<sub>2</sub>Si* (24) qui présentent une interdiffusion marquée mais au prix d'une baisse du contraste d'indice et donc des performances. La stabilité thermique est d'autre part limitée toujours à cause des processus d'interdiffusion.

Les études futures semblent s'orienter suivant deux axes:

- ▶ Soit étudier des systèmes nouveaux plus complexes à base de matériaux en phase amorphe (des carbures par exemple).
- ▶ Soit s'intéresser à une approche "superéseaux" en essayant de réaliser des structures complètement épitaxiales.

qui devraient conduire à des progrès notables dans un futur proche.

*Les auteurs remercient les personnes suivantes qui ont participé activement à l'obtention des résultats: Mr. L. Hennet pour les études de stabilité thermique, Mr. P. Ruterana de l'Université de Caen pour les observations de microscopie électronique et Mr. M. Kühne du synchrotron BESSY à Berlin pour les mesures de réflectivité.*

## Références.

1. "Multilayer interference coating for the vacuum ultraviolet", E. Spiller, Appl. Phys. Lett., 20, 365 (1972)
2. "X-ray and Far UV multilayer mirrors: principles and possibilities", A.V. Vinogradov, B. Zeldovich, Appl. Opt., 16, 89 (1977)
3. "Low energy X-ray interaction coefficients", B.L. Henke, Atomic data and Nuclear data tables, 27, N°1 (1982)
4. "Reflecting properties of X-ray multilayer devices", A. Rosenbluth, Thesis, Rochester University, Rochester N.Y. USA (1982)
5. "Recherches sur la propagation des ondes électromagnétiques sinusoidales dans les milieux stratifiés. Application aux couches minces", F. Abelès, Ann. de Physique, vol. 5, 596 (1950)
6. "Performances of C-W multilayers as soft X-ray optics: high reflectivity in the range  $2d = 60$  to  $90 \text{ \AA}$ ", Ph. Houdy, V. Bodart, C. Ilily, P. Ruterana, L. Névot, M. Arbaoui, N. Alehyane, R. Barchewitz, SPIE, 733, 389 (1986)
7. "Contribution à l'étude de couches minces par réflexion spéculaire de rayons X", P. Croce, L. Névot, B. Pardo, Nouv. Rev. d'Optique Appliquée, 3, 37 (1972)

8. " *Diode rf sputtering of copper and copper oxide thin films and multilayers* ", P. Boher, Ph. Houdy, C. Schiller, L.J. Van Ijzendoorn, *Thin Solid films*, 174 (1989)
9. " *Kinetic ellipsometry applied to soft X-ray multilayer growth control* ", Ph. Houdy, *Revue de Physique Appliquée*, vol. 23, 1653 (1988)
10. " *Grazing X-ray reflection analysis of nanometric scale structure* ", P. Boher, Ph. Houdy, C. Schiller, *J. of Appl. Phys.*, 68, 6133 (1990)
11. " *Structure des interfaces, étude par microscopie à transmission* ", P. Ruterana, Thèse de Doctorat, Université de Caen (1987)
12. " *Versatile X-UV spectrogiometer with multilayer interference mirrors* ", M. Arbaoui, J.M. André, P. Couillaud, R. Barchewitz, *Rev. Sci. Instr.*, 56, 2055 (1986)
13. J. Fisher, M. Kühne, B. Wende, *Nucl. Instr. Meth.*, A246, 404 (1986)
14. " *Structural characteristics and performances of rf-sputtered Mo/Si and Co/Si multilayers for soft X-ray optics* ", P. Boher, Ph. Houdy, L. Hennet, M. Kühne, P. Müller, C. Scaillo, J.C. Joud, P. Ruterana, *Proc. SPIE*, 1547, 21 (1991)
15. " *Magnetic, X-ray and TEM studies of several multilayer systems* ", M.B. Stearns, C.H. Lee, C.H. Chang, *Metallic multilayers and Epitaxy*, Edited by M. Hong, The Metallurgical Society, 55 (1988)
16. " *Simulation of mixing at Mo/Si interfaces* ", D.B. Boecker, W.L. Morgan, *Physics of X-ray multilayer structures*, Jackson Hall, Wyoming, March 2-5 (1992)
17. " *Molybdenum-silicon multilayer mirrors for the extreme ultraviolet* ", T.W. Barbee, S. Mrowka, M.C. Hettrick, *Appl. Opt.*, 24, 883 (1985)
18. " *Silicon / silicon nitride and silicon /silicon oxide multilayers for X-UV optical applications* ", P. Boher, Ph. Houdy, L. Hennet, J.P. Delaboudinière, M. Kühne, P. Müller, *Optical Engineering*, 30, N° 8, 1049 (1991)
19. " *Analysis of the smoothing process observed during the soft X-ray multilayer deposition* ", Ph. Houdy, P. Boher, C. Hily, R. Barchewitz, N. Alehyane, M. Ouahabi, *SPIE*, Vol.984, 95 (1988)
20. " *Interface analysis of sputtered W/C, Rh/C and Ni/C multilayers for soft X-ray applications* ", P. Boher, Ph. Houdy, C. Schiller, *Thin Solid Films*, 176, 161 (1989)
21. " *Optimisation de multicouches nanométriques: nouvelles structures et nouveaux matériaux pour optiques à rayons X mous* ", L. Hennet, Thèse de Doctorat, Université Paris VI (1991)
22. " *Expansion of amorphous carbon in W/C multilayers after annealing* ", X.Jiang, D. Xian, Z. Wu, *Appl. Phys. Lett.*, 57, 24, 2549 (1990)
23. " *The structure of ultrathin C/W and Si/W multilayers for high performances in the soft X-ray optics* ", P. Ruterana, J.P. Chevalier, Ph. Houdy, *J. of Appl. Phys.*, 65, 3907 (1989)
24. " *Characteristics and thermal behavior of W/Si multilayers with well-defined interfaces* ", V. Dupuis, M.F. Ravet, M. Piccuch, B. Vidal, *J. of Appl. Phys.*, 68, 3348 (1990)
25. " *Magnesium silicide based multilayers for soft X-ray optics* ". P. Boher, Ph. Houdy, L. Hennet, Z.G. Li, A. Modak, D.J. Smith, M. Idir, T. Moreno, R. Barchewitz, M. Kühne, P. Müller, J.P. Delaboudinière, *SPIE*, Vol. 1546, 502 (1991)
26. " *A comparative study of carbon and boron carbide spacing layers inside soft X-ray mirrors* ", P. Boher, Ph. Houdy, P. Kaikati, R. Barchewitz, L.J. Van Ijzendoorn, Z.G. Li, D.J. Smith, J.C. Joud, *SPIE*, Vol. 1343, 39 (1990)