

Miroirs multicouches apériodiques à large bande passante (2–10 keV) pour les diagnostics d'imagerie X à haute résolution spatiale

Ph. Troussel¹, H. Maury¹, F. Bridou², F. Delmotte², R. Rosch¹, C. Reverdin¹
et E. Meltchakov²

¹ CEA, DAM, DIF, 91297 Arpajon, France

² Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique, CNRS, Université Paris-Sud,
Campus Polytechnique, RD128, 91127 Palaiseau Cedex, France

Résumé. Les miroirs multicouches interférentiels, constitués d'un empilement alternant des couches minces de matériaux lourds et légers, permettent, par un phénomène d'addition en phase des rayons réfléchis à chaque interface, d'obtenir des pouvoirs réflecteurs élevés dans le domaine des rayons X. Malheureusement les largeurs spectrales accessibles avec des multicouches périodiques sont peu étendues, de l'ordre de quelques centaines d'eV aux énergies de photons de quelques keV et sont incompatibles avec le fonctionnement large bande envisagé pour certains microscopes X que nous développons. Les supermiroirs ou en anglais «Depth – graded X ray mirrors» sont une alternative intéressante pour accroître la bande passante du miroir par «superposition» de la contribution des différentes périodes présentes dans l'empilement. Cet article précise les résultats expérimentaux qui ont permis la mise au point d'un supermiroir de qualité exceptionnelle travaillant entre 2 et 10 keV sous une incidence rasante de 0,7°.

1. INTRODUCTION

Dans le cadre des recherches sur la fusion par confinement inertiel (FCI) menées au Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives, notre laboratoire conçoit et réalise des diagnostics d'imagerie de rayons X. Ils seront utilisés et installés sur la future installation Laser Méga-Joule (LMJ) près de Bordeaux [1] pour mesurer les grandeurs physiques des plasmas. Le développement et la réalisation de multi imageurs à rayons X (multi tores en l'occurrence), représente un enjeu important pour notre laboratoire. Ils seront en effet les premiers diagnostics d'imagerie utilisés sur le LMJ [2]. Ce papier concerne la mise au point d'un revêtement optique de multicouches apériodiques de type W/SiC qui prolonge la zone de réflexion totale jusqu'à 10 keV. Il a été conçu pour les miroirs toriques travaillant sous incidence rasante de 0,7°. Ces «supermiroirs» ont été conçus et réalisés au Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique (LCFIO) en collaboration avec le CEA-DAM [3]. Ils ont une réflectivité de 35% quasi constante sur tout le domaine spectral de 2 à 10 keV. L'empilement est constitué de 32 couches alternées de W et SiC d'épaisseurs variant entre 2 et 5 nm. Ces multicouches ont été caractérisées au LCFIO par réflectométrie de rayons X rasant à 8 keV (0.154 nm) et sur la ligne de métrologie X de BESSY [4]. Les résultats expérimentaux montrent un bon accord avec les simulations théoriques utilisant les codes XR-vision* ou TFcalc. Nous présentons une étude d'imagerie réalisée auprès d'un générateur X avec un système composé d'un seul miroir torique utilisant ce dépôt.

1.1. Position du problème

Dans le domaine X, la réfraction des matériaux est très faible car les indices optiques sont très légèrement inférieurs à l'unité. Il n'existe donc pas de matériaux très transparents et très réfringents

* T. Moreno, Caminotec

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial License 3.0, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any noncommercial medium, provided the original work is properly cited.

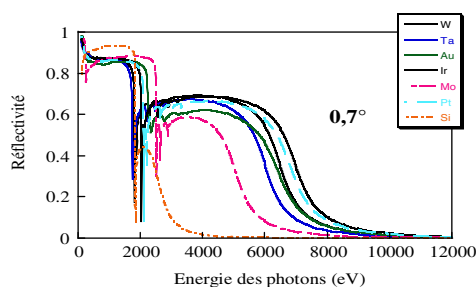


Figure 1. Réponse spectrale de différents matériaux en couche mince, à un angle d'attaque de $0,7^\circ$.

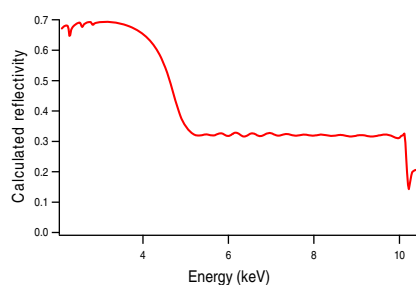


Figure 2. Réponse spectrale d'un miroir envisageable sous un angle d'attaque de $0,7^\circ$.

permettant la fabrication de lentilles. Ce constat implique de se tourner vers l'utilisation d'optiques réfléchives dans le domaine du rayonnement X pour lequel il existe deux méthodes. La première est basée sur l'utilisation du phénomène de réflexion totale, caractérisé par un angle critique, en dessous duquel le rayonnement incident est totalement réfléchi. L'angle limite étant inversement proportionnel à l'énergie du rayonnement, il existe une valeur seuil de l'énergie à partir de laquelle la réflectivité décroît rapidement. Pour illustrer ce phénomène, nous présentons sur la figure 1 la réponse spectrale de différents matériaux, à l'angle d'attaque de $0,7^\circ$ choisi pour les miroirs toriques. Il apparaît que même des matériaux à Z élevé ne réfléchissent plus après 7 keV. La deuxième méthode pour réfléchir le rayonnement X est basée sur l'utilisation des interférences constructives à l'aide de miroirs interférentiels multicouches, classiquement constitués d'un empilement périodique alternant deux matériaux. L'un des matériaux est absorbant, l'autre est transparent pour le domaine spectral envisagé. Le matériau absorbant est généralement un élément métallique lourd, par exemple le molybdène ou le tungstène, le matériau transparent un élément léger comme le silicium, le bore ou le carbone. Ce type de réflecteur fonctionne ainsi par interférences constructives selon la loi de Bragg :

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

où d est la période de l'empilement, θ l'angle d'attaque et n l'ordre de diffraction. La longueur d'onde λ réfléchi par la multicouche est donc directement dépendante de la périodicité du milieu réflecteur.

Pour accroître la bande passante de réflectivité, il faut empiler des bicouches de périodes différentes, judicieusement choisies, correspondant à chacune des longueurs d'ondes que l'on veut réfléchir. Mais cette désadaptation de la période "detuning" ne peut se faire qu'au détriment d'une diminution de la réflectivité. Cette méthode a été appliquée depuis fort longtemps dans le cas de la lumière visible avec des matériaux très peu absorbants [5]. Sur le même principe et dès 1977, F. Mezei a réalisé des supermiroirs à neutrons [6]. Plus récemment, C. Morawe et E. Ziegler [7] ont calculé et réalisé des supermiroirs. C'est ce type de système qui a été mis au point dans le cadre de notre étude.

1.2. Design

Le design constitue l'étape préliminaire de l'étude : choix des matériaux et détermination par simulation numérique d'une formule initiale de la multicouche. Les critères de sélection des matériaux dépendent non seulement des propriétés optiques de ces matériaux mais aussi de leurs propriétés physiques et chimiques. Les meilleures paires de matériaux seront celles qui auront de forts contrastes optiques et une absorption minimale et qui formeront des multicouches avec des interfaces abruptes et sans rugosité. Notre choix s'est ainsi porté sur le couple tungstène (W) et carbure de silicium (SiC).

La formule initiale du *design* a été déterminée avec un programme d'optimisation d'épaisseur développé à l'Institut d'Optique [8]. La figure 2 montre le pouvoir réflecteur calculé à partir d'une formule initiale comprenant 32 couches. La réponse spectrale du miroir répond pleinement aux spécifications, avec plus de 30% de réflectivité en moyenne sur une bande passante présentant une très bonne homogénéité.

2. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

2.1. Système de dépôt

Les échantillons ont été réalisés par pulvérisation cathodique dans un appareil décrit par ailleurs [9]. Cette technique ainsi que les conditions de dépôt ont été publiées³. Elle permet l'élaboration de dépôts facilement mis en œuvre, reproductibles et de plus, avec un contrôle d'épaisseur très précis. On a vérifié que l'épaisseur de la couche est spatialement constante sur les dimensions requises du miroir (10 mm × 50 mm) à près de ±1%.

2.2. Caractérisation du supermiroir

La première étape de calibration concerne la vitesse de dépôt de chaque matériau en fonction des paramètres optimaux qui seront utilisés (puissance de la source, pression de dépôt). Cette étape permet également de vérifier les indices optiques des matériaux à la raie $K\alpha$ du cuivre, c'est-à-dire 1,54 Å. L'étalonnage des dépôts s'effectue en réalisant plusieurs échantillons à différentes vitesses de passage ; les épaisseurs sont ensuite mesurées par réflectométrie en X rasants. La seconde étape concerne la calibration des matériaux en couple (W/SiC) pour déterminer les vitesses de dépôt de chaque matériau en prenant en compte les effets d'interface. Le but est de comprendre les propriétés physico-chimiques et morphologiques du W et du SiC lorsqu'ils sont en contact, de manière à bien appréhender les problématiques d'interface dans le miroir aperiodique. Il ressort de cette étude que l'épaisseur de la période est plus basse que la somme des épaisseurs du SiC et de W, avec une contraction de période de 0,56 nm (diminution de SiC entre 0,8 et 1 nm et augmentation entre 0,2 et 0,3 nm pour le W). Prenant en compte ces données, un premier miroir aperiodique a été réalisé avec les corrections sur les épaisseurs et indices apportées. La figure 3 représente la courbe de réflectivité expérimentale superposée à la courbe théorique. Les résultats expérimentaux étaient déjà assez prometteurs : la bande passante expérimentale atteint la réflectivité théorique et la planéité est bonne jusqu'à 8,5 keV. Egalement, nous avons mesuré à BESSY la réflectivité du miroir en fonction de l'angle d'attaque à 6 et 9,5 keV, laquelle, comparée au fit théorique, a apporté de nouvelles informations importantes : d'une part, les indices et rugosités sont légèrement différents de ceux supposés initialement et d'autre part, l'échantillon est globalement trop épais. A partir de l'ajustement des deux mesures précédentes, nous avons déterminé de nouveaux indices et de nouvelles rugosités et défini un deuxième miroir aperiodique améliorant la planéité de la bande passante après 8 keV sans dégradation de la valeur de réflectivité. La dernière itération a consisté à analyser les courbes de réflectivité de ce deuxième miroir aperiodique. A ce stade, nous avons une connaissance précise de tous les paramètres optiques et structuraux du deuxième miroir aperiodique. Nous avons ainsi proposé une dernière formule théorique. Les épaisseurs des couches de

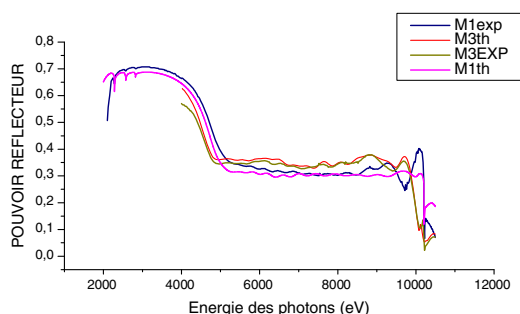


Figure 3. Comparaison des courbes du pouvoir réflecteur expérimental et calculé du 1^{er} miroir aperiodique et du 3^{eme} miroir.

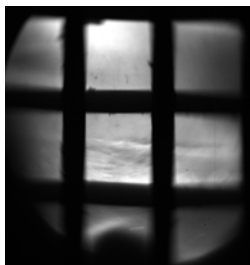


Figure 4. Image de radiographie d'une grille de pas 50 μm obtenue avec un miroir torique.

cette formule présentent alors des différences notables avec celles mesurées dans le deuxième miroir aperiodique. Cette comparaison a permis de corriger l'épaisseur de chaque couche dans nos calibrations, de manière à s'approcher le plus possible des valeurs de la dernière formule théorique. Cette correction est effectuée pour chaque couche lors du dépôt du troisième miroir aperiodique. Nous mesurons alors en réflectométrie en X rasants au PTB l'épaisseur de ses couches ; la comparaison avec la dernière formule théorique nous montre une réelle amélioration (Figure 3).

2.3. Tests en Imagerie X

Nous avons choisi pour la réalisation du microscope multi images du LMJ des systèmes multi tores (1 miroir torique par voie). Les montages toriques présentent des avantages de compacité et de luminosité par rapport aux imageurs classiques de type KB (2 miroirs cylindriques croisés) [2]. Les performances de ce microscope ont été mesurées expérimentalement à partir d'images de mires (grilles) radiographiées avec un générateur dans le domaine X. Les images obtenues correspondent à la convolution de la mire par la fonction de transfert du système optique. Les images ont été réalisées sur des miroirs de rayon de courbure $R = 92 \text{ m}$ et $r = 20 \text{ mm}$. Elles ont été obtenues avec une collimation de 0,5 mm verticale \times 0,5 mm horizontale et donnent accès à la résolution spatiale évaluée à 35 μm pour un champ objet de 3 mm \times 3 mm. Un exemple est donnée à la figure 4. La résolution spatiale RMS représente 68% de l'énergie encerclée dans un spot image gaussien. L'analyse des images montre que la résolution est équivalente dans la plage de grandissement (entre $\times 2,4$ et $\times 4,5$) pour des frontales (distance source – miroir) respectives entre 820 et 946 mm. La résolution spatiale n'est pas dégradée par le revêtement multicouche.

Références

- [1] Maury, Ph. Troussel, J.-Ph. Champeaux, Proc. SPIE, 7430 (2009) 74300Q.
- [2] R. Rosch et al, article même Colloque UVX.
- [3] H. Maury, F. Bridou et al, Nucl. Instr. and Methods in Physics Research A (2010) 242–246.
- [4] M. Krumrey, G. Ulm, Nucl. Instr. Method A 467–468 (2001) 4475.
- [5] E. Pelletier, M. Klapisch, P. Giacomo, Le Vide , 1971, 2, n°5.
- [6] F. Mezie and A Dagleish, Communication on Physics, 2 : 41–43, 1977.
- [7] C. Morawe, E. Ziegler et al, Nucl. Instr. and Methods in Physics Research, A 493 (2002) pp 189–198.
- [8] F. Bridou, B. Pardo, J. of Optics (Paris), 21, (1990), n°4, pp. 183-91.
- [9] J. Gautier, F. Delmotte, M. Roulliay, F. Bridou, M.-F. Ravet, A. Jérôme, Appl. Opt., 44, (2005) 384–390.