

Un réseau à revêtement multicouche alterné présentant des efficacités de diffraction élevées pour les rayons X tendres

François POLACK

Responsable Groupe Optique - Synchrotron SOLEIL, L'Orme des Merisiers, 91190 Gif-sur-Yvette

francois.polack@synchrotron-soleil.fr

Les expériences conduites autour d'une source de rayonnement synchrotron nécessitent généralement des faisceaux monochromatiques dont la largeur de bande spectrale est beaucoup plus fine que la largeur naturelle d'émission. La manière de réaliser cette sélection est très dépendante, d'un point de vue technologique, de l'énergie de photon.

Dans la gamme des rayons X durs (énergie supérieure à ~ 3 keV), on met à profit les propriétés de diffraction de cristaux parfaits, généralement silicium, qui réfléchissent sélectivement une énergie précise lorsque la condition d'accord de Bragg est satisfaite. Dans la gamme des X mous on utilise la diffraction de réseaux réfléchissant en incidence très rasante pour disperser la lumière ; la bande passante désirée est ensuite sélectionnée au moyen d'une fente au foyer d'un miroir de collection. Cependant, les rendements de diffraction décroissent très rapidement avec l'énergie de photon, et sont le plus souvent inférieurs à 1 % au-delà de 1,5 keV. Il y a donc une rupture technologique et pratique entre X durs et X mous avec un vide entre 1,5 et 4 keV, un domaine qu'on peut appeler X tendres. C'est ce vide que viennent combler les réseaux multicouches alternés (MCA), actuellement développés à SOLEIL en collaboration avec la société Horiba Jobin-Yvon (Palaiseau, Essonne), pour la gravure des réseaux et le laboratoire Charles Fabry (LCF) (Institut d'Optique, Palaiseau) pour les revêtements multicouches.

Principe

Le principe d'un réseau MCA est décrit à la figure 1. Une structure diffractante épaisse est construite à partir d'un réseau

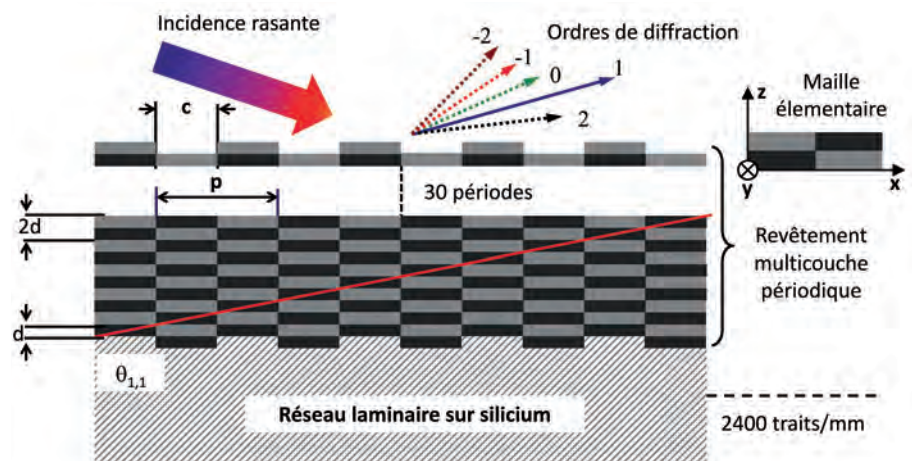


Figure 1. Structure d'un réseau MCA idéal. Il est constitué d'une multicouche B_4C/Mo_2C déposée sur un réseau laminaire de profondeur d . p et c sont respectivement la période et la largeur de la gravure. La ligne oblique montre l'orientation du plan de Bragg (1,1).

laminaire gravé dans le silicium. La surface est gravée pour présenter un profil de créneaux rectangulaires ayant même largeur de « creux » que de « bosse ». Sur cette surface on dépose un revêtement d'un grand nombre de périodes d'une bi-couche composée d'un matériau léger et d'un matériau lourd. La bi-couche idéale a une épaisseur égale pour chaque matériau, des interfaces parfaites, et sa période est exactement le double de la profondeur de gravure (d) du réseau de base. La structure ainsi générée est doublement périodique dans le plan horizontal (réseau) et vertical (multicouche). Sa section transversale, représentée (hors

échelle) à la figure 1, a une distribution en damier qui lui confère des propriétés de diffraction proches de celles d'un cristal. On remarque notamment l'existence de plans, distants d'environ $2d$ (car $h/p \ll 1$), sur lesquels la densité moyenne est maximale ou minimale. Le premier de ces plans est marqué par un trait rouge sur la figure 1. On peut montrer que, comme pour un cristal, la structure présente une forte réflectivité sur ces plans pour la longueur d'onde particulière satisfaisant à la condition de Bragg ($2d \sin \theta = \lambda/2$) et pour celle-là seule. La quasi-totalité de l'énergie diffractée est alors contenue dans un seul ordre de diffraction.

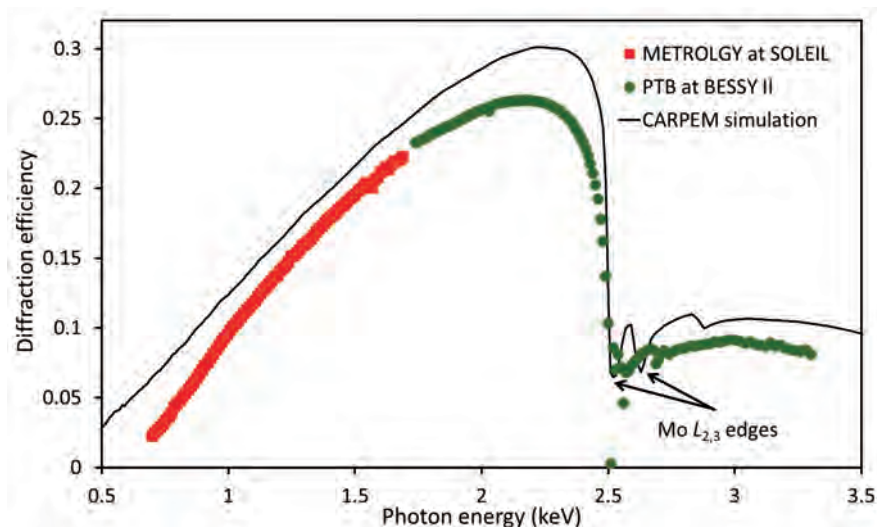


Figure 2. Courbes d'efficacité du réseau MCA Mo₂C/B4C réalisé pour la ligne DEIMOS de SOLEIL. En points rouges, les mesures effectuées sur la ligne Métrologie de SOLEIL ; en points verts, les mesures effectuées sur la ligne FCM du PTB à Bessy II ; en trait continu noir, l'efficacité théorique prédite par le modèle simplifié du code de calcul CARPEM.

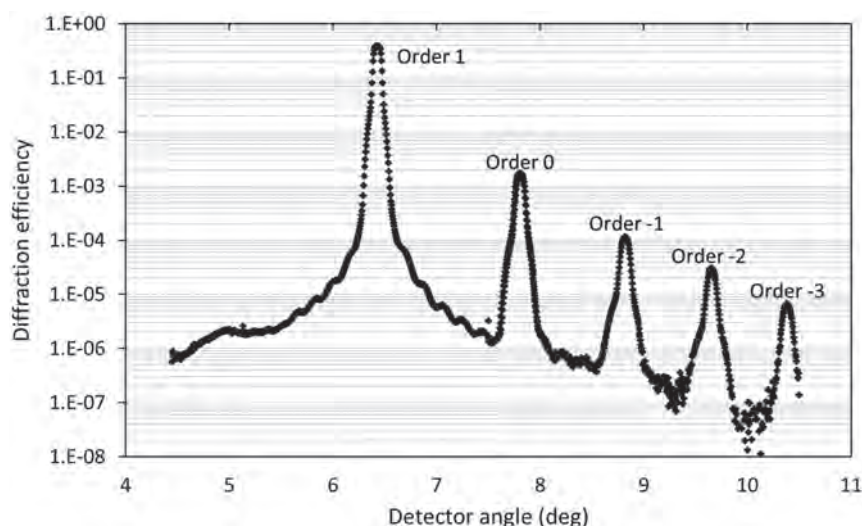


Figure 3. Spectre angulaire du rayonnement diffracté par le réseau dans ses différents ordres à 2200 eV.

Résultats

La *figure 2* montre l'efficacité de diffraction en fonction de l'énergie de photon du réseau MCA réalisé pour le monochromateur de la ligne de lumière DEIMOS de SOLEIL. Les mesures ont été effectuées sur la ligne de Métrologie et Tests à SOLEIL pour la partie basse énergie (700 – 1700 eV), et sur la ligne FCM du PTB à Bessy II pour les énergies supérieures à 1750 eV. Le réseau substrat a un pas de 2400 traits/mm, une profondeur de gravure de 2,51 nm et un rapport largeur gravée sur période, $c/p=0,48$, selon

la mesure AFM réalisée au Laboratoire de métrologie de SOLEIL. Sur ce substrat de silicium, 30 paires de couches de Mo₂C et B4C ont été déposées. Elles ont respectivement 2,72 et 2,64 nm d'épaisseur, selon la calibration effectuée en réflectométrie d'X rasants (à 8,54 keV) au LCF, soit une période de 5,36 nm. Avec ces paramètres, le code de simulation CARPEM de SOLEIL prédit, courbe continue, une réflectivité pic de 31 % à 2200 eV, alors que les mesures expérimentales ne trouvent que 27 %. La modélisation effectuée par CARPEM est toutefois imparfaite car le logiciel ne considère que des interfaces

parfaits entre deux couches, sans rugosité ni interdiffusion, et un profil parfaitement rectangulaire des traits du réseau. Ceci n'est pas réaliste pour des couches d'aussi faible épaisseur. Dans ces conditions, une différence de seulement 15 % en valeur relative entre modèle et réalisation est très satisfaisante. La *figure 3* présente le spectre angulaire de rayonnement diffracté par le réseau à la même énergie de 2200 eV. On constate que les ordres de diffraction autres que l'ordre 1 d'accord, sont atténués par rapport à celui-ci d'un facteur supérieur à 100.

Perspectives

Le réseau présenté ici a été installé dans le monochromateur de la ligne DEIMOS, où il est apparié à un miroir multicouche, Mo/B4C dans un montage optique à déviation angulaire nulle. C'est la seule ligne au monde équipée d'un tel dispositif. Il permet d'étendre le domaine spectral de la ligne vers les hautes énergies et d'atteindre les seuils d'absorption M4,5 de terres rares comme Gd, Tb, Dy. D'autres paires de matériaux permettent théoriquement d'atteindre des énergies et des efficacités pic encore plus élevées. Un réseau MCA basé sur le couple Cr/B4C a été réalisé récemment mais n'a pas encore été mesuré à la longueur d'onde d'utilisation. Des efficacités de l'ordre de 50 % vers 300 eV sont espérées. Le vide technologique entre optique X-mous et optique X-durs est donc en passe d'être comblé.

Référence

Fadi Choueikani, Bruno Lagarde, Franck Delmotte, Michael Krummy, Françoise Bridou, Muriel Thomasset, Evgueni Meltchakov, François Polack, High-efficiency B4C/Mo₂C alternate multilayer grating for monochromators in the photon energy range from 0.7 to 3.4 keV, *Optics Letters*, 2014, 39(7)

Remerciements :

Ce travail a bénéficié d'un financement du RTRA « Triangle de la Physique ».

La gravure du réseau substrat a été réalisée par la société Horiba Jobin-Yvon, Palaiseau.

Les développements multicouches ont été rendus possibles par la Centrale d'Elaboration et de Métrologie d'Optique X (CEMOX) de la fédération LUMAT (CNRS FR2764).