

Miroir simple- ou multi-couches à courbure variable pour microfocalisation de rayonnement synchrotron X

E. Ziegler, O. Hignette, Ch. Morawe et R. Tucoulou

ESRF, BP. 220, 38043 Grenoble, France

Résumé: Une optique X focalisante de grande efficacité a été développée et testée. Elle se compose d'un miroir de petite dimension monté sur un courbeur mécanique à 2-moments à base de pivots flexibles. Les principaux avantages de ce système sont l'accordabilité en énergie, la conservation du flux et la possibilité d'interchanger le miroir. Une procédure de mise en forme du miroir en ligne a été développée pour minimiser la taille de la tache focalisée avec une précision inférieure au microradian. Un exemple de réalisation est présenté, dans lequel des multicouches à gradient latéral ainsi qu'un dépôt simple couche d'iridium ont été utilisés pour couvrir une gamme d'énergie entre 7 keV et 30 keV. Avec un facteur de dégrandissement de 128 (tests effectués sur la ligne BM5 de l'ESRF) des tailles de spot inférieures au micromètre ont été obtenues. Le gain maximal en flux à 20 keV était de 535 (688 à 13 keV).

1. INTRODUCTION

La production de micro-faisceaux de rayons X constitue un domaine de développement important pour l'utilisation du rayonnement synchrotron. En effet, la réduction de la taille du faisceau au niveau de l'échantillon est essentielle lorsqu'il s'agit d'étudier des échantillons de petit volume ou d'obtenir une résolution spatiale élevée[1]. L'apparition de sources synchrotron de troisième génération de faible émittance et forte brillance a permis d'envisager de nouveaux systèmes optiques tels que ceux basés sur les lentilles de Fresnel, Bragg-Fresnel ou les lentilles réfractives[2]. Toutefois, une taille de source et une divergence plus faibles sont également avantageuses pour les optiques X à base de miroirs ou de multicouches en incidence rasante, une empreinte du faisceau plus petite permettant des systèmes de focalisation plus compacts ou capables de fort dégrandissement sans sacrifier le flux de photons. Dans cet article nous décrivons un tel système, capable d'être courbé de manière dynamique pour satisfaire la demande fréquente d'accordabilité en longueur d'onde.

2. CONCEPTION DU MIROIR ET DU SYSTÈME DE COURBURE DYNAMIQUE

La surface stigmatique permettant de focaliser une source synchrotron lointaine (distance p) à une courte distance (distance q) est une ellipse dont on peut décrire le profil de pente Δ en tout point par un polynôme du troisième degré (approximation de Namioka)[3]:

$$\Delta(x) = \alpha x(2 + 3\beta x + 4\gamma x^2) \quad \text{avec} \quad \alpha = \frac{\sin \theta}{4p} \left(\frac{p}{q} + 1 \right); \quad \beta = \frac{\cos \theta}{2p} \left(\frac{p}{q} - 1 \right); \quad \gamma = \frac{1}{4pq} + \frac{5}{4}\beta^2 \quad (1)$$

Les surfaces envisagées ici sont en fait des cylindres à section elliptique car celles-ci permettent de modifier la courbure dynamiquement. Par réflexion du faisceau X sur 2 surfaces de ce type placées orthogonalement l'une par rapport à l'autre il est alors possible d'obtenir une focalisation bidimensionnelle[3]. Le profil de pente change avec l'énergie car l'angle de rasance θ_i varie (Eq. 1). Pour approcher une section elliptique particulière, des moments différents sont appliqués à chacune des extrémités du miroir. Afin d'appliquer les forces désirées avec une précision suffisante nous utilisons un courbeur mécanique à base de pivots flexibles (Fig. 1). La linéarité de déplacement des actionneurs (picomoteurs) est améliorée par de long bras de levier[4]. Alors que le terme d'ordre 2 dans l'expression de la pente Δ peut être compensé par l'application de moments adéquats, une variation linéaire de la largeur du miroir est nécessaire pour compenser le troisième ordre avec une bonne approximation. Dans ce cas des calculs montrent que l'erreur de pente maximale par rapport à l'ellipse stigmatique peut être inférieure à 0.4 μ rad dans le domaine d'énergie considéré (7 keV- 30 keV). Dans un tel système seules les erreurs de polissage du miroir limiteraient la qualité de focalisation.

Pour tester ce principe un miroir de forme trapézoïdale (longueur 170 mm, épaisseur 5 mm) a été réalisé par la compagnie General Optics. Les erreurs de pente du miroir mesurées avec un profilomètre

optique (LTP)[6], étaient de l'ordre de 1.1 μrad rms sur une distance de 120 mm. Cependant, une fois le terme d'ordre 3 retiré, cette erreur se réduit à 0.37 μrad rms (erreur de forme: 1.6 nm rms). Les mesures LTP montrent que les erreurs induites par serrage et courbure sont faibles. Dans le cas le plus sévère, c'est à dire à faible énergie (6 keV) et donc à fort angle d'incidence (2.2°), le rayon varie de 11 m à 22 m sur une longueur de 150 mm et l'erreur de pente peut alors atteindre 1.77 μrad .

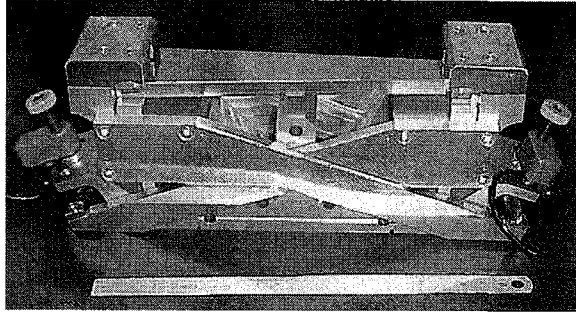


Fig. 1: Courbeur mécanique à base de pivots flexibles équipé d'un miroir de forme trapézoïdale. La linéarité de déplacement des picomoteurs dans le cas de forte courbure a nécessité l'usage de bras de levier importants (200 mm).

3. DÉPÔTS SIMPLE COUCHE ET MULTICOUCHE

A condition de rester dans les limites imposées par les erreurs de pente, un angle θ_i important favorise un fort dégrandissement et permet, soit d'accepter un faisceau plus large, soit de réduire la taille de l'élément optique. Dans le système présenté ici, 3 dépôts ont été réalisés l'un à coté de l'autre au moyen d'une technique de masquage. Une couche mince de forte densité électronique (Ir, épaisseur 60 nm) a été déposée par pulvérisation cathodique[7] en vue de servir de filtre passe-bas en énergie. La rugosité d'interface a été estimée à 0.5 nm et une énergie de coupure E (keV) = $85/\theta_i$ (mrad) a été confirmée expérimentalement. Pour les autres bandes des dépôts multicouches ont été réalisées en vue de fournir une bande passante large pour des expériences de microfluorescence et de diffusion aux petits angles [8]. Deux dépôts ont été nécessaires pour couvrir efficacement la bande d'énergie entre 8 keV et 30 keV. B_4C a été choisi comme espaceur parce que ce matériau présente une faible couche interfaciale, en comparaison du silicium, avec de nombreux métaux. Pour la gamme d'énergie entre 8 keV et 22 keV c'est une multicouche Ru/ B_4C de 150 périodes qui a été choisie. La distance inter-réticulaire artificielle est de l'ordre de 2.68 nm. Pour travailler en-dessous de 8 keV ou au-dessus de 22 keV une multicouche Ni/ B_4C de 134 périodes a été fabriquée, avec une distance inter-réticulaire de 2.84 nm. Chaque bande de dépôt a une largeur de 6 mm et couvre toute la longueur du miroir. La rugosité d'interface (valeur rms) a été obtenue à partir de simulations des mesures de réflectivité spéculaire ($\theta-2\theta$) effectuées à une énergie de 8 keV: 0.22 nm pour Ni et Ru, entre 0.25 nm et 0.40 nm pour B_4C . La résolution en énergie, mesurée à 8 keV est de l'ordre de 1.5% pour Ru/ B_4C et de 1.76% pour Ni/ B_4C . Elle est à peu près constante sur l'ensemble du spectre considéré.

Un fort dégrandissement (forte asphérisation) étant désiré, la période de la multicouche doit varier d'un bout à l'autre du miroir afin de satisfaire la loi de Bragg en tout point. Ce gradient est indépendant de l'énergie et fixé par la distance focale. Un contrôle précis de la période et du gradient de la multicouche sont nécessaires pour adapter l'énergie du rayonnement à la géométrie du montage. Par une technique de fabrication décrite dans une publication antérieure[7] un gradient non-linéaire de 20.2% sur une longueur de 120 mm, correspondant à une focale q de 0.31 m, a été réalisé pour les 2 dépôts décrits ci-dessus. L'erreur de gradient était inférieure à 0.14% rms sur une distance de 150 mm.

4. MONTAGE EXPERIMENTAL, MISE EN FORME ET CARACTERISATION

Les tests ont été réalisés sur la ligne de lumière BM5 de l'ESRF. Le montage expérimental est montré en figure 2. A 26.5 m et 37 m de la source, des jeux de fentes (primaires et secondaires) limitent les dimensions géométriques du faisceau. Le faisceau est monochromatisé par réflexion sur une paire de cristaux parfaits de silicium orientés (111). La présence d'harmoniques d'ordre supérieur ($n \geq 3$) est réduite par désaccord du deuxième cristal par rapport à l'angle de Bragg (111) et par l'efficacité

décroissante de la multicouche lorsque n augmente. Cette pureté spectrale facilite le calcul de l'efficacité du système optique. Le centre du miroir était placé à $p=39.6$ m de la source et sa surface était horizontale afin de dégrandir la dimension verticale de la source ($80\mu\text{m}$ FWHM).

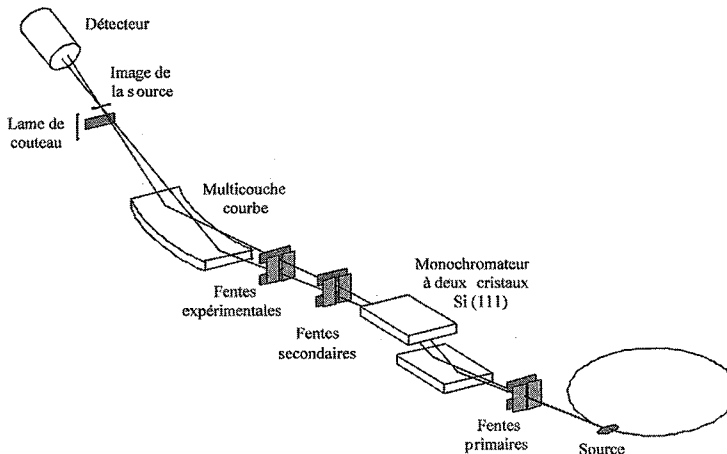


Fig. 2: Montage expérimental sur la ligne de lumière BM5 de l'ESRF.

La mise en forme du miroir a été obtenue en ligne, la procédure consistant à minimiser la différence entre le front d'onde après le miroir et le front d'onde sphérique centré sur le plan focal. La forme du front d'onde est obtenue par intégration de la carte des pentes, cette dernière étant générée par une technique de tracé de rayons utilisant les rayons X. Les détails de la méthode sont donnés ailleurs[6,9]. Brièvement, alors qu'une fente défile dans un plan choisi en amont du miroir et loin du plan focal, les positions de cette fente et de l'impact du pinceau de rayons X sur une caméra CCD située au plan focal sont enregistrées simultanément. A partir de ces données un algorithme d'optimisation linéaire permet de trouver les positions des actionneurs qui minimisent la dimension de la tache focale. La relation entre l'erreur de pente sur la surface du miroir et les déplacements c_1 et c_2 des actionneurs est donnée par la matrice d'interaction, notée H , suivante:

$$\begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix} = (H^T H)^{-1} H^T \delta y \quad (2)$$

où T symbolise l'opération transposée de matrice et δy représente le vecteur déplacement.

Un tel algorithme de minimisation par la méthode des moindres carrés a été utilisé avec un nombre d'actionneurs pouvant atteindre 6 unités et peut être employé avec des données de front d'onde bidimensionnelles. En pratique 3 à 4 itérations sont suffisantes pour atteindre un optimum, ce nombre dépendant de l'état initial du miroir.

Une fois le miroir optimisé, la taille du faisceau est mesurée par balayage d'une lame de couteau au travers du faisceau, l'intensité étant enregistrée au moyen d'une diode silicium placée en aval du couteau. La largeur à mi-hauteur du faisceau focalisé est obtenue soit en simulant directement le signal mesuré avec une fonction erreur, soit en mesurant la largeur à mi-hauteur du signal dérivé. Pour mesurer correctement la largeur du foyer linéaire la lame du couteau est orientée parallèlement à la ligne focale au moyen d'une platine de rotation. La taille minimale du foyer est atteinte en réalisant une série de balayages du couteau autour de la position q attendue pour le meilleur foyer.

5. MESURES EXPERIMENTALES, PERFORMANCE DU SYSTEME

Seuls les résultats obtenus avec la bande multicouche Ru/B₄C seront présentés ici. Pour estimer les erreurs de pente pour les différentes ellipses (p , q , énergie) désirées sur la ligne de lumière, la procédure de mise en forme du miroir a d'abord été effectuée avec un LTP. Pour une énergie de 20 keV ($\theta=11.8$ mrad) une erreur de pente rms de $0.82 \mu\text{rad}$ (différence de forme: 6.5 nm) a été obtenue, de laquelle un programme de tracé de rayons a prédit une tache focalisée de $1.37 \mu\text{m}$ pour un faisceau

incident de 1.3 mm de large. Le miroir a ensuite été mis en forme avec les rayons X (ligne BM5). Lorsque le miroir est éclairé sur une longueur de 10 mm, la taille de la tache focalisée est de l'ordre de $0.7 \mu\text{m}$ (FWHM). Cette valeur est proche de la limite géométrique théorique de $0.63 \mu\text{m}$ déduite par simple dégrandissement de la dimension verticale de la source par le rapport des distances p/q . La dimension de cette tache augmente avec la longueur d'illumination (Fig. 3) pour atteindre la valeur de $1.64 \mu\text{m}$ lorsque une longueur de 120 mm (faisceau incident: 1.4 mm). Ceci correspond à une ellipse présentant une erreur de pente de l'ordre de $1 \mu\text{rad}$. Le gain en flux (efficacité du miroir inclue) augmente linéairement avec la taille du faisceau pour atteindre un maximum de 535, alors que les valeurs maximales attendues seraient de 688 à partir des données LTP et de 1083 si l'on supposait une courbure parfaite (voir section 2). Il est à noter que pour une source onduleur située sur une section droite à valeur β élevée de l'ESRF, l'acceptance d'un faisceau d'une dimension de 1.4 mm correspond à la collection complète du faisceau horizontal (vertical) lorsque l'optique est placée à 49.5 m (81.5 m) au plus de la source. Des résultats similaires ont été obtenus avec le miroir courbé pour focaliser à 13 keV. La dimension maximale du faisceau incident collecté était alors de 1.95 mm.

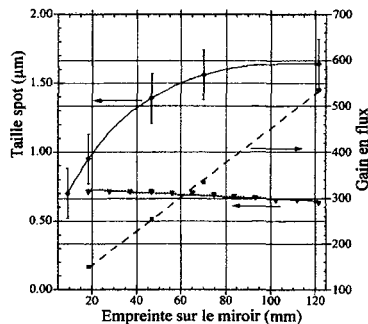


Fig. 3: Performance à 20 keV pour la multicouche Ru/B4C déposée sur un miroir de forme trapézoïdale. La largeur a mi-hauteur de la tache, l'efficacité du dépôt et le gain en flux sont représentés en fonction de la hauteur de faisceau collecté.

6. CONCLUSION

Un ensemble de microfocalisation, équipé d'un miroir multibandes courbable dynamiquement, a été développé et testé. Une méthode de tracé de rayons permet de minimiser au moyen d'un pinceau de rayons X l'erreur de forme par rapport à la surface stigmatique. La focalisation bidimensionnelle (montage de Kirkpatrick-Baez) et l'obtention de facteurs de dégrandissements supérieurs par réduction de la distance focale font partie de nos directions de développement futures.

Remerciements

Nous remercions R. Hustache, E. Chinchio, A. Rommeveaux, J.Ch. Peffen et G. Rostaing pour leur support technique, U. Lienert pour son aide dans l'analyse des données, L. Claustre et D. Fernandez pour le contrôle informatique et le groupe ID22 pour avoir stimulé le développement du système présenté ici.

Références

1. U. Lienert et al., J. Synchr. Rad., vol. 5, 226-31 (1998).
2. Voir SPIE Proceedings vol.3449, I. McNulty Ed. (1998).
3. J. Susini, SPIE Proceedings vol. 1740 (1992).
4. L. Zhang et al., J. Synchr. Rad., vol. 5, 804-7 (1998).
5. O. Hignette, A. Freund, et E. Chinchio, SPIE Proc. vol. 3152, 188-99 (1997).
6. Ch. Morawe et al., SPIE Proc. vol. 3773, 90-99 (1999).
7. E. Ziegler et al., ICPE Proceedings, vol.3, 285-91, Osaka (1999).
8. O. Hignette et al., SPIE conference, San Diego, CA, July 2001 (to be published).