

Miroirs pour l'UV lointain (VUV) entre 80 et 130 nm

F. Bridou¹, M. Cuniot-Ponsard¹ et J.-M. Desvignes¹

¹ Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique (LCFIO), UMR 8501 du CNRS de l'Institut d'Optique et de l'Université de Paris Sud, Centre Scientifique, Bât. 503, 91403 Orsay Cedex, France

Résumé. Dans le domaine spectral entre 80 et 130 nm situé dans le VUV (“Vacuum Ultra-Violet”), les matériaux ne sont ni transparents, ni vraiment réfléchissants. Il est difficile de réaliser des systèmes optiques et, en conséquence, de déterminer les constantes optiques des matériaux. Les écarts entre la réflectivité calculée à partir des indices référencés dans les tables et la réflectivité expérimentale nous ont conduits à penser que certains de ces indices n'étaient pas exacts. Nous avons développé une méthode expérimentale de détermination des constantes optiques à partir des mesures de réflectivité au voisinage de l'incidence normale, en fonction de la longueur d'onde. A partir des valeurs ainsi déterminées, des composants tels que miroirs ou polariseurs peuvent être conçus et réalisés.

1. INTRODUCTION

Le domaine de longueurs d'onde situé entre 80 et 130 nm (VUV) a été peu exploré jusqu'à présent. Il est cependant d'un grand intérêt pour les astrophysiciens car il comprend des raies d'émission caractéristiques d'atomes présents dans les zones chaudes de la haute chromosphère solaire (Hydrogène: séries de Lyman de 121.5 nm à 91.2 nm, C III 97.7 nm, S VI 94.0 nm, O VI 103.2 nm). Les systèmes optiques nécessaires impliquent la réalisation de miroirs optimisés. Or dans ce domaine spectral, les matériaux ne sont ni transparents ni très réfléchissants. Leurs constantes optiques sont par voie de conséquence très mal connues. Seul l'aluminium pur présente en théorie une réflectivité importante (80%) mais qui se réduit à 10% en présence d'air par suite de la formation d'une fine couche d'alumine en surface. Une solution classique consiste à protéger l'aluminium de l'oxydation par MgF_2 ce qui permet d'obtenir une réflectivité suffisante (>70 %) pour $\lambda > 115$ nm. En théorie, LiF pourrait convenir à plus courte longueur d'onde, mais ses propriétés hydrophiles en font un matériau peu utilisable. En deçà, pour $\lambda = 90$ nm par exemple, la meilleure réflectivité obtenue expérimentalement par Larruquert [1] avec un empilement de 3 matériaux ($B_4C/MgF_2/Al$) ne dépasse pas 34 %. En nous fondant sur les indices publiés [2, 3, 4], nous avons pu mettre en relief l'intérêt de B_4C en couche unique qui présente une réflectivité quasi-constante de 28% entre 80 et 140 nm (figure 1) [5].

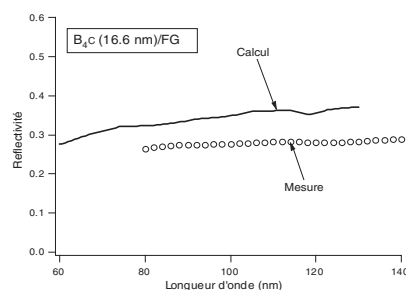


Figure 1. Calcul et mesure de la réflectivité d'une couche de B_4C / verre.

Pour améliorer la réflectivité des miroirs dans le domaine VUV, des solutions nouvelles doivent être explorées. Cela impose de connaître les constantes optiques des matériaux. Or dans le domaine VUV, le plus souvent, celles-ci sont, sinon inconnues, parfois incohérentes d'un auteur à l'autre. C'est pourquoi nous avons développé une méthode de détermination des indices adaptée à ce domaine spectral, à partir de mesures de réflectivité d'empilements de différentes épaisseurs. La méthode est présentée dans son principe, puis appliquée à la détermination des indices complexes de ZnSe, MgF₂ et AlF₃.

2. DÉTERMINATION DES CONSTANTES OPTIQUES PAR MESURE DE RÉFLECTIVITÉ

2.1 Principe de la méthode

Si l'on calcule la réflectivité d'un matériau massif en fonction de ses constantes optiques n et k , on obtient un faisceau de courbes représenté figure 2a. A l'inverse, pour une réflectivité donnée, il existe une infinité de solutions pour n et k . Un autre diagramme d'iso-réflectivité peut être obtenu de la même manière : on calcule la réflectivité d'une couche d'épaisseur connue de ce matériau (n, k) déposé par exemple sur de l'aluminium dont l'indice est connu (figure 2b). On voit que si l'on mesure la réflectivité dans chacun de ces deux cas on pourra sélectionner deux courbes d'iso-réflectivité sécantes entre elles, en général en deux points, définissant deux solutions possibles pour n et k . Trois courbes d'iso-réflectivité au moins sont donc nécessaires pour déterminer l'indice complexe sans ambiguïté.

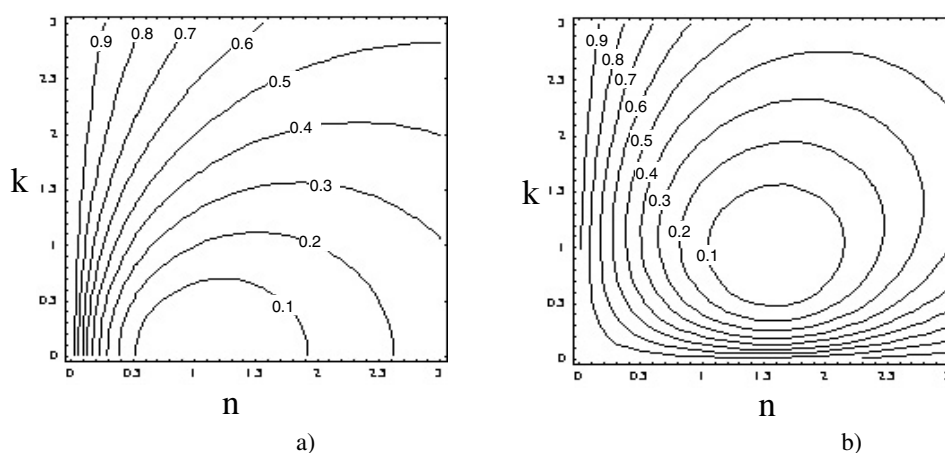


Figure 2. Courbes d'iso-réflectivité a) d'un matériau massif en fonction de ses constantes optiques (n, k); b) d'une couche de 5 nm de ce même matériau (n, k) déposé sur une couche très épaisse d'aluminium ($\lambda = 90 \text{ nm}$).

2.2 Mise en œuvre expérimentale

Les empilements des différents films sont réalisés par évaporation dans un bâti de dépôt sous ultra-vide (10^{-8} mbar) équipé d'un canon à électrons et de quatre cibles. La vitesse de dépôt et l'épaisseur sont contrôlées par un quartz programmable refroidi.

Les épaisseurs des films déposés, ainsi que les rugosités interfaciales et les indices à la longueur d'onde de mesure de $\lambda = 0.154 \text{ nm}$ sont déterminés à partir de l'analyse de la réflectivité sous rayons X rasants [6].

Les réflectivités, dans la gamme spectrale qui nous intéresse, sont mesurées au PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt in Berlin) à partir d'un faisceau synchrotron dispersé spectralement.

3. APPLICATION DE LA DÉTERMINATION DES INDICES DE ZNSE, MGF₂, ALF₃

3.1 Étude de ZnSe

3.1.1 Préliminaires expérimentaux

Afin de caractériser optiquement et chimiquement le matériau, une couche épaisse de ZnSe a été déposée sur un substrat de MgO. La mesure des indices par spectrophotométrie en transmission entre 250 et 3000 nm donne des résultats en accord avec les valeurs indiquées dans les tables de Palik [2]. L'analyse par microsonde électronique montre que le matériau déposé correspond bien à un composé stoechiométrique de densité 5.4 (à comparer à 5.42, densité connue du cristal). Aucune impureté n'a été détectée. Le spectre de diffraction enregistré sous rayons X rasants permet de comparer les pics obtenus avec ceux de ZnSe référencés dans les tables JCPDS (Joint Committee for Powder Diffraction Studies). De l'ensemble de ces résultats, on peut conclure que le matériau évaporé est stoechiométrique, polycrystallin et de densité normale.

3.1.2 Détermination des constantes optiques

Quatre films de ZnSe ont été réalisés, le premier en couche relativement épaisse (286 nm) sur float-glass, les trois autres en couches minces (respectivement 9.3, 6.5 et 4 nm) sur Al. La réflectivité $R(e)$ de ces échantillons a été mesurée au PTB entre 80 et 140 nm. La figure 3a montre un exemple des courbes d'iso-réflectivité obtenues pour $\lambda = 90$ nm. Il n'existe pas dans ce cas de point d'intersection commun pour toutes les courbes.

Certains auteurs ont montré que même sous une pression aussi faible que 10^{-8} mbar, l'aluminium peut se recouvrir d'une mince couche d'oxyde avant le dépôt du film protecteur de fluorure [7,8]. Nous avons repris le calcul avec cette hypothèse. Il existe une valeur de l'épaisseur d'alumine à l'interface entre Al et ZnSe qui rend les 4 iso-courbes sécantes en un seul point, et ce, quelle que soit la longueur d'onde. Pour des valeurs inférieures ou supérieures à cette valeur (1 nm), les points de concours entre les différentes courbes sont obtenus dispersés. La figure 3b illustre le résultat obtenu à $\lambda = 90$ nm; le point d'intersection détermine l'indice complexe de ZnSe pour cette longueur d'onde: $n = 0.73$ et $k = 0.79$.

Pour chaque longueur d'onde la même procédure est utilisée. Les indices ainsi déterminés entre 80 et 140 nm sont représentés figure 4. Les incertitudes sont estimées graphiquement à partir des dispersions

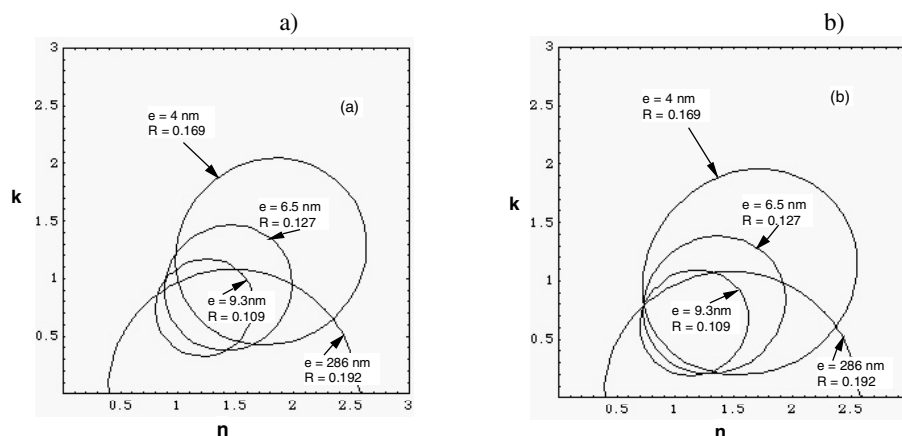


Figure 3. Iso-réflectivités calculées pour a): 4 échantillons de ZnSe d'épaisseurs différentes sur float-glass ($e = 286$ nm) et Al; b) calculées avec l'hypothèse d'une couche interfaciale de 1 nm d'alumine entre Al et ZnSe.

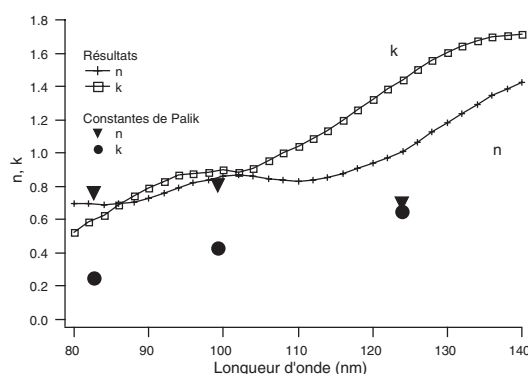


Figure 4. Constantes optiques de ZnSe déterminées entre 80 et 140 nm, comparées aux valeurs des tables de Palik.

entre les valeurs des points d'intersection des courbes prises deux à deux. Dans toute la gamme de mesure, elles restent inférieures à 0.02 pour Δn et à 0.03 pour Δk . On note une nette différence avec les constantes optiques indiquées dans les tables de Palik, notamment en ce qui concerne le facteur d'atténuation k . Par contre les constantes obtenues ici sont en très bon accord avec celles publiées par d'autres auteurs qui utilisent des méthodes différentes [9].

3.2 Étude de Fluorures : MgF_2 et AlF_3

3.2.1 Détermination des constantes optiques

Cette méthode a été utilisée pour étudier MgF_2 et AlF_3 , les fluorures étant de bons candidats pour protéger les matériaux de l'oxydation. Par exemple, à 121.6 nm, on a représenté les courbes d'isométrie obtenues pour MgF_2 avec cinq échantillons d'épaisseurs variables, sur verre ou Al (figure 5a). Comme dans l'exemple précédent, une épaisseur interfaciale d'alumine de 0.8 nm a été ajoutée dans le calcul, de manière à optimiser les coïncidences dans toute la gamme spectrale de mesure. Malgré cela on note que la courbe notée 1 ne coïncide pas parfaitement avec les autres. Ce phénomène est attribué au fait que la couche épaisse de MgF_2 est encore suffisamment transparente pour laisser voir le verre dont les constantes optiques sont mal connues. La simulation du substrat de verre par SiO_2 montre ses limitations à cette longueur d'onde. Cependant, la bonne coïncidence des autres intersections permet de déterminer $n = 1.70$ et $k = 0.04$ pour MgF_2 à 121.6 nm. Dans les tables de Palik [2], on ne trouve pas de valeur pour k (valeurs nulles) entre 113.7 nm et 4800 nm.

Dans la littérature, il n'existe pas de valeurs d'indices pour AlF_3 dans cette gamme de longueur d'onde. Sept échantillons d'épaisseurs différentes ont été réalisés et mesurés. De même que dans le cas précédent, on a calculé les courbes correspondantes d'isométrie avec l'hypothèse d'une mince couche d'alumine de 0.8 nm aux interfaces (figure 5b). Les courbes correspondant aux dépôts sur verre font apparaître le défaut de connaissance des constantes optiques du substrat. Malgré cela les indices de AlF_3 peuvent être déterminés graphiquement. On obtient $n = 1.53$ et $k = 0.05$.

3.2.2 Application au calcul de composants optiques

A partir de ces valeurs, des composants optiques constitués de miroirs revêtus des matériaux précédents peuvent être calculés et optimisés. On donne à titre d'exemple (figure 6), le résultat du calcul d'un polariseur par réflexion à 121.6 nm, dont le miroir serait constitué de $MgF_2/AlF_3/SiO_2$. Pour un angle d'incidence de 68° , on obtient une excellente valeur de l'extinction : $R_p = 910^{-5}$, avec $R_s = 0.54$.

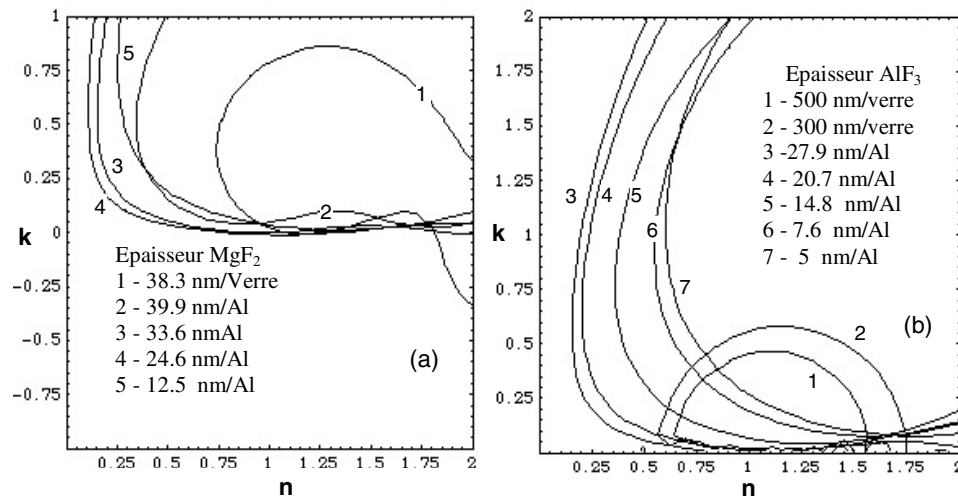


Figure 5. Diagramme d'iso-réflexivité à 121.6 nm pour a): MgF₂ sur verre ou Al, b): AlF₃ sur verre ou Al.

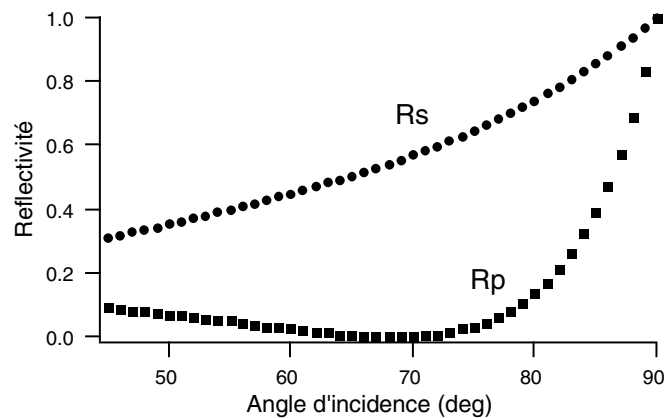


Figure 6. Calcul d'un polariseur optimisé à 121.6 nm à partir des indices mesurés.

4. CONCLUSION

Nous avons développé une méthode de mesure des constantes optiques de matériaux dans un domaine de longueur d'onde (80-130 nm) peu exploré jusqu'à présent, malgré son intérêt dans l'étude de raies d'émission solaires. La méthode présente l'avantage d'être auto-cohérente : un défaut dans les hypothèses ou les mesures fait disparaître la coïncidence des intersections et la détermination de n et k n'est plus possible.

La connaissance de ces indices dans le domaine VUV permet la conception et l'optimisation de composants optiques tels que miroirs et polariseurs.

Remerciements

Cette étude a bénéficié l'aide du CNES. Les mesures de réflectivité sous incidence normale ont été réalisées par M. Richter au PTB.

Références

- [1] J. I. Larruquert, R. A. M. Keski-Kuha, *Appl. Optics*, **38** (7) (1999) 1231-1236.
- [2] Handbook of Optical Constants, E. D. Palik, G. Ghosh, (CD Rom), (Academic Press, 1999).
- [3] <http://cletus.phys.columbia.edu/~windt/>
- [4] J. I. Larruquert, R. A. M. Keski-Kuha, *Applied Optics* **39** (10) (2000) 1537-1540.
- [5] F. Bridou, M. Cuniot-Ponsard, J. M. Desvignes, *Proc. Of SPIE*, **5250** (2004) 627-636.
- [6] F. Bridou, B. Pardo, *J. Optics* **21** (4) (1990) 183.
- [7] J. Kim, J. J. Weimer, M. Zukic, D. G. Ton, *J. Vac. Sci. Technol. A* **12** (6) (1994) 3062.
- [8] J. J. Weimer, J. Kim, M. Zukic, D. G. Ton, *J. Vac. Sci. Technol. A* **13** (3) (1995) 1008.
- [9] J. L. Freeouf, *Phys. Rev. B* **7** (8) (1973) 38 10.