

Analyse combinée par réflectométrie de rayons X et fluorescence en incidence rasante pour la caractérisation d'empilements technologiques complexes

Bérenger Caby^a, Luca Lutterotti^b, Giancarlo Pepponi^c, Dieter Ingerle^d,
Emmanuel Nolot^a, Cristina Strelid, Patrice Gergaud^a, Magali Morales^e, Daniel
Chateigner^b

^a CEA Grenoble - Leti

^a Minatec Campus, 17 rue des Martyrs, 38054 Grenoble Cedex 9

^b CRISMAT

^b 6 boulevard du Maréchal Juin, 14050 Caen Cedex 4

^c Fondazione Bruno Kessler

^c Via S.Croce 77, 38122 Trento, Italie

^d AtomInstitut

^d Vienna University of Technology 6 Stadionallee 2, 1020 Vienna, Autriche

^e CIMAP

^e 6 boulevard du Maréchal Juin, 14050 Caen Cedex 4

Le développement de nouveaux matériaux et empilements complexes pour les applications en microélectronique avancée (CMOS, mémoires, électronique de puissance, photovoltaïque) exige la mise en œuvre de techniques de caractérisation et de métrologie toujours plus précises. Il est entre autres nécessaire d'accéder, de manière non destructive et avec une résolution sub-nanométrique, au profil de composition chimique et au profil de densité d'empilements de couches minces.

La fluorescence des rayons X en incidence rasante (GiXRF) est une technique prometteuse puisqu'elle répond à ces problématiques. En effet, une mesure de fluorescence réalisée en deçà de l'angle critique θ_c (mode TXRF) permet de sonder les premiers nanomètres d'un empilement et ainsi d'inspecter les phénomènes de surface tels que la contamination. Une mesure de fluorescence X à des angles d'incidence supérieurs à $3\theta_c$ nous permet quant à elle de connaître la composition en éléments d'intérêt dans un empilement complexe, et ce même pour des couches enterrées. L'analyse du profil angulaire en outre de remonter à la distribution en profondeur de ces éléments. Il est alors possible de combiner, sur un même échantillon, les informations sur le profil de composition chimique obtenu par GiXRF et le profil de densité électronique déduit de la réflectométrie X spéculaire (XRR). Le potentiel de cette technique d'analyse combinée reste cependant à explorer, de même que restent à valider les protocoles instrumentaux et les algorithmes ^{[1][2]} de traitement des données.

Après une présentation du formalisme relatif à l'analyse par fluorescence en incidence rasante, nous mettrons en évidence l'influence des dispositifs instrumentaux choisis sur les performances de la technique. L'impact de la configuration optique, de la longueur d'onde de travail, de l'environnement (vide, air, hélium), mais également de la méthodologie d'alignement seront ainsi présentés. L'analyse du profil angulaire complet des éléments d'intérêt peuvent être réalisés par traitement multi-spectres via PyMCA^[4]. Cependant, l'analyse quantitative des profils de composition requiert une connaissance précise de la

fonction instrumentale. Cette fonction instrumentale peut être soit déterminée par une métrologie rigoureuse de l'intégralité de la chaîne de mesure^[3] soit, de manière plus pragmatique, par la mesure d'échantillons judicieusement choisis. Nous montrerons l'intérêt de cette seconde approche dans le cadre d'une analyse multi-instruments. Nous avons mis en place, dans un premier temps, une méthodologie d'analyse combinée itérative. Les données de réflectométrie X permettent d'accéder à un premier jeu de données (épaisseurs, densités) pour l'empilement considéré. Comparés aux mesures de ~~dose de~~ fluorescence (Fig.1-a), ces résultats permettent de déterminer un empilement de référence simple. A partir de ce modèle, le profil angulaire complet de fluorescence peut être modélisé grâce aux logiciels MAUD ou guifitlayer^{[5][6]}. En utilisant la fonction instrumentale déterminée à l'aide d'échantillons de référence, nous montrerons, sur la base de plusieurs exemples, qu'il est possible d'accéder au profil de composition dans des empilements complexes, de mettre en évidence des phénomènes d'inter-diffusion (Fig 1.b) voire de caractériser la dose et le profil de concentration de couches implantées développées pour les jonctions ultrafines (Fig. 2). Il est envisagé, à terme, de réaliser une approche réellement combinée (et non itérative) des modélisations XRR et GiXRF, ce qui permettra d'accroître encore les performances de cette technique d'analyse très prometteuse.

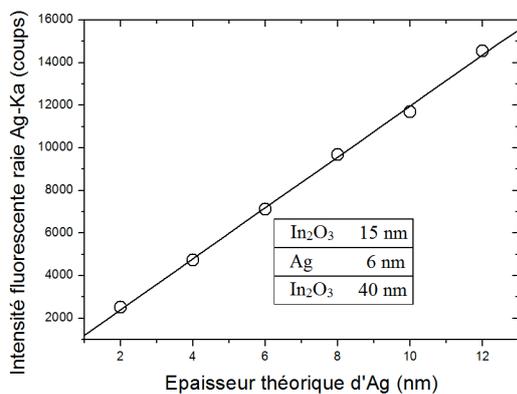


Fig.1-a : Dose d'argent (couche enterrée) déduite de l'analyse à angle élevé ($3\theta_c$)

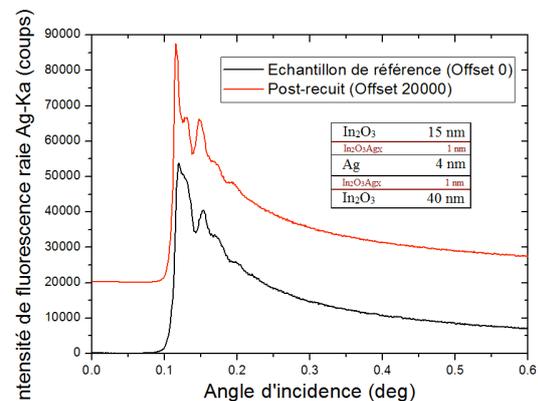


Fig.1-b : Mise en évidence de phénomènes d'interdiffusion dans un empilement complexe

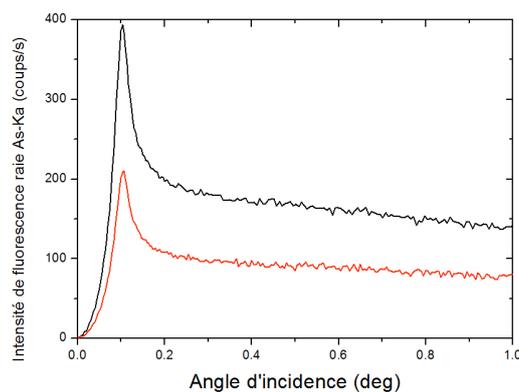


Fig.2 : Profil de fluorescence de l'As dans une jonction fine pour différentes conditions d'implantation

- [1] D. K. G. de Boer, Physical Review B, Vol. 44, Number 2 (1991).
- [2] J. Daillant, A. Gibaud, X-ray and neutron reflectivity : principles and applications
- [3] B. Beckhoff, Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis, Springer (2006)
- [4] V.A. Solé, E. Papillon, M. Cotte, Ph. Walter, J. Susini, Spectrochim. Acta Part B 62, 63-68 (2007)
- [5] L. Lutterotti, MAUD software, <http://www.ing.unitn.it/~maud/>

[6] D. Ingerle, N. Zöger, F. Meirer, G. Peponi, D. Giubertoni, P. Wobrauschek, C. Strelt, ECS 2009