

La sonde atomique tomographique : applications aux nanotechnologies et nanosciences

Marion Descoins^{1*}, Federico Panciera^{1,2}, Khalid Hoummada¹, Mike El Kousseifi¹, Carine Perrin¹, Alain Portavoce¹, Dominique Mangelinck¹

¹ IM2NP, Aix Marseille Université, CNRS, Case 142, 13397 Marseille Cedex 20, France

² STMicroelectronics, 850, rue Jean Monnet, 38926 Crolles cedex, France

* marion.descoins@im2np.fr, Téléphone : 0491288954 ; Fax: 0491288775

1. INTRODUCTION

L'essor des nanosciences et des nanotechnologies repose en grande partie sur le développement de nouveaux outils d'élaborations, d'observations et d'analyse. En effet ces nouvelles méthodologies de caractérisation sont nécessaires pour appréhender la complexité et les dimensions très réduites des matériaux et dispositifs associés. La sonde atomique tomographique (SAT) est devenue un outil essentiel pour l'étude des matériaux à l'échelle atomique. Cette technique a bénéficié de plusieurs améliorations instrumentales au cours de ces dix dernières années. En particulier, l'utilisation d'un laser pour l'analyse des semi-conducteurs et des matériaux isolants offre de nouvelles perspectives pour leur caractérisation. Une large gamme de matériaux peut être ainsi étudiée, allant des alliages pour l'industrie nucléaire et l'aéronautique, aux semi-conducteurs et composants des nanosciences. Les capacités et les performances de la SAT seront illustrées par des exemples associés aux nanosciences (îlots de SiGe) et aux nanotechnologies (transistors, nanofils, ...).

2. RESULTATS

2.1 Conditions expérimentales

Les échantillons, sous forme de pointe, sont préparés par un système à double faisceau comprenant un système à faisceau d'ions focalisé (FIB) couplé à un microscope électronique à balayage (MEB) haute résolution, en utilisant la technique de lift-out [1]. Les analyses sont classiquement réalisées à 50 K, avec un laser de longueur d'onde 532 nm, la fréquence de l'impulsion laser de 100 kHz, en utilisant une puissance de laser de 0,5 nJ et une vitesse d'évaporation de 0,5 ions par impulsion, dans une chambre où règne une pression de $5 \cdot 10^{-11}$ Torr. Un volume moyen de $150 \times 150 \times 200 \text{ nm}^3$ est obtenu.

2.2 Résultats associés aux nanotechnologies

La SAT est le seul microscope analytique capable de produire des cartes en trois dimensions de la distribution des espèces chimiques, avec une résolution atomique, à l'intérieur d'un matériau [2-5]. Les figures 1.a-b) montrent deux images MEB d'une pointe composée d'une grille de transistor N-MOS pris dans une cellule SRAM. La figure 1.c) représente le volume SAT reconstruit d'un transistor [6-8].

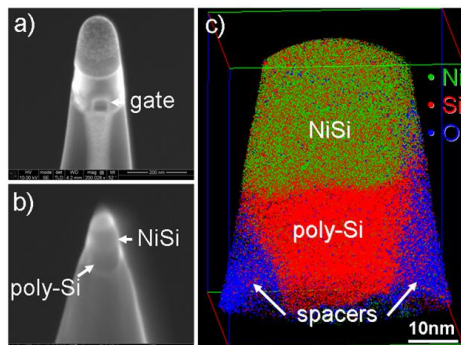


Figure 1. a) Image MEB d'un transistor au cours de la préparation par faisceau d'ions focalisés d'une pointe ; (b) Image MEB de l'étape finale de préparation d'un transistor en bout de pointe ; (c) volume SAT reconstruit, d'un transistor, $50 \times 50 \times 60 \text{ nm}^3$ dans lequel les atomes de Ni, Si et O sont représentés.

Cette analyse a permis de mieux comprendre la formation de contact à base de siliciure dans les transistors ainsi que la redistribution du Pt (élément d'alliage) et de l'As (dopant).

2.3 Résultats associés aux nanosciences

Les alliages Si(Ge) offrent de forts potentiels dans les futurs dispositifs de la microélectronique avec les nano-fils et les îlots Si(Ge) qui sont développés pour la fabrication de structures avancées en microélectronique. La SAT permet ainsi de fournir des mesures directes et quantitatives de la distribution 3D des atomes de Ge dans les îlots de Ge obtenus par croissance par jets moléculaires sur des substrats Si(001) [9]. La Figure 2. présente la vue en coupe d'une tranche de 24 nm d'épaisseur. La distribution non homogène du Ge (ségrégation sur certaines facettes, cœur riche en Ge) permet de fournir des informations quantitatives pour les simulations et les modèles.

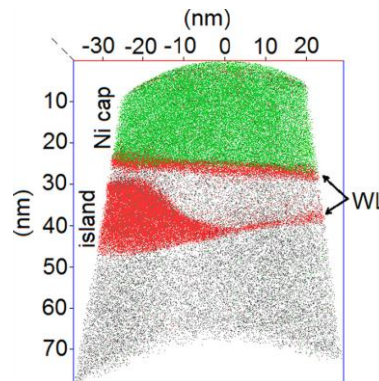


Figure 3. Volume 3D SAT reconstruit d'un îlot de Ge vu en coupe, dans lequel les atomes de Ni, Si et Ge sont représentés en verts, gris et rouges respectivement

3. CONCLUSION

La SAT représente le seul microscope analytique résolu à l'échelle atomique fournissant des informations en trois dimensions en donnant accès à la nature chimique et à la distribution des atomes présents dans le matériau. Les nouvelles générations de sonde atomique tomographique assistée par laser permettent aujourd'hui la caractérisation des matériaux isolants et semiconducteurs, ce qui était impossible avec la génération de sonde précédente qui se limitait aux matériaux métalliques. La SAT est ainsi devenue un outil incontournable pour la résolution de nombreux problèmes ainsi qu'à l'avancée en sciences des matériaux, en particulier dans le domaine des nanotechnologies [10]. La SAT s'avère être la méthode de caractérisation d'objets nanométriques en 3D nécessaire pour l'étude et le développement dans la miniaturisation des composants élémentaires, dont les enjeux sont considérables pour les nouvelles générations d'ordinateurs.

REFERENCES

1. Miller MK, Russell KF, Thompson GB, Ultramicroscopy **102**, 287–298 (2005).
2. Kelly TF, Miller MK, Rev. Scien. Inst., **78**, 031101, (2007)
3. Kelly TF, Larson DJ, Thompson K, et al, Annual Rev Mater Res., **37**, 681-727, (2007)
4. Miller M.K., Cerezo A., Hetherington M.G., and Smith G.D.W., Atom Probe Field Ion Microscopy, Oxford University Press, Oxford, (1996)
5. Gault B., Moody M. P., Cairney J. M., Ringer S. P., Atom Probe Microscopy, Springer-Verlag, New York, (2012).
6. Panciera, F.; Hoummada, K.; Gregoire, M., et al. Microelectronic Eng. **107**, 173-177 (2013)
7. Panciera F, Hoummada K, Gregoire M, Juhel M, Bicaïs N, Mangelinck D, Appl. Phys. Lett. **93**, 261912 (2010).
8. Panciera F, Baudot S, Hoummada K, Gregoire M, Juhel M, Mangelinck D, Appl. Phys. Lett. **100**, 201909 (2012)
9. Portavoce A, Hoummada K, Berbezier I, Ronda A, Mangelinck D, Appl. Phys. Lett. **100**, 164105 (2012)
10. Mangelinck D, Panciera F, Hoummada K, El Kousseifi M, Perrin C, Descoins M, Portavoce A, Microelectronic Eng. **120**, 19-33, (2014)