

Analyses microstructurales de mémoires non volatiles et métrologie des couches ultraminces par microscopie électronique en transmission (MET)

A. Demolliens^{1,2}, Ch. Turquat¹, L. Fares², G. Haller², C. Ducruet³, L. Prejbeanu³,
C. Maunoury³, J-P. Nozières³, Ch. Muller¹

¹ Laboratoire Matériaux et Microélectronique de Provence (L2MP), UMR CNRS 6137, BP 20132, 83957 La Garde Cedex – France

² STMicroelectronics, ZI Peynier Rousset, BP 2, 13106 Rousset Cedex – France

³ Crocus Technology, 5 Place Robert Schumann, BP 1510, 38025 Grenoble Cedex 1 – France

Résumé – La tendance actuelle à la miniaturisation des dispositifs à base de semi-conducteurs nécessite l'utilisation de techniques de caractérisation physique avancées telles que la microscopie électronique en transmission (MET) permettant des analyses microstructurales très localisées.

Un des principaux challenges en microélectronique concerne l'observation des couches minces et en particulier les oxydes "tunnel" intégrés dans les cellules mémoires EEPROM (Electrical Erasable Programmable Read Only Memory) ou dans les jonctions magnétiques des mémoires MRAM (Magnetoresistive RAM). Pour ces analyses par MET, la qualité des observations est fortement dépendante de la préparation des échantillons et des performances du microscope. L'objectif du travail en cours consiste donc à adapter et optimiser les techniques de préparation d'échantillons et d'observation par MET en vue d'une métrologie des couches minces.

1. Imagerie d'oxyde de grille de cellules EEPROM fabriquées à STMicroelectronics

Tout d'abord, il est important de bien noter que le travail présenté se déroule dans un contexte industriel, avec toutes les contraintes qui en résultent. En effet, les analyses par MET menées à STMicroelectronics doivent impérativement respecter les délais de production et ce malgré une montée en volume du nombre d'analyses.

Les analyses MET sont généralement réalisées après une localisation électrique de zones de défaillance. Afin d'en trouver l'origine, il est nécessaire de préparer une lame MET précisément dans le ou les transistors défectueux et ainsi pouvoir identifier les défauts impliqués. Une importance particulière est donc accordée à la préparation FIB (Focused Ion Beam) permettant une localisation précise et rapide des zones d'intérêt, et pouvant, de surcroît, être automatisée. Cependant, l'implantation ionique engendrée pendant la découpe FIB crée sur chacune des faces de la lame une couche amorphe qui dégrade la qualité des images en mode haute résolution. Nous avons mesuré une épaisseur de couche amorphe de 24 nm en venant extraire une lame dans une boîte FIB usinée avec un faisceau d'ions de 30 keV d'énergie.

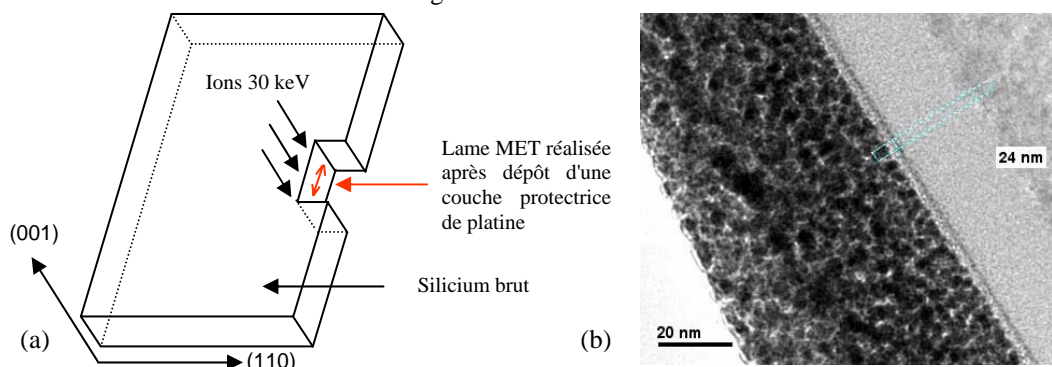


Figure 1 – (a) schéma de principe de la préparation de l'échantillon (b) image MET de la couche de silicium rendue amorphe suite à la préparation FIB (faisceau d'ions de 30 keV)

D'après la littérature, il est possible de diminuer l'épaisseur de la couche amorphe en abaissant la tension d'accélération des ions. Pour un faisceau de 5 keV d'énergie, on mesure une couche amorphe dont l'épaisseur est de l'ordre de 2 à 3 nm. Les amincisseurs ioniques tels que le PIPS (Precision Ion Polishing System) permettent de travailler à basse tension et de préparer des échantillons de bonne qualité, mais la localisation précise de la zone d'intérêt reste très difficile et le temps de préparation relativement long (environ 8 heures).

Nous avons préparé deux échantillons dans des structures identiques (oxydes tunnel de cellules mémoires EEPROM) en utilisant les deux méthodes de préparation (FIB 30 keV et PIPS 5 keV) afin de les comparer directement. Un troisième préparé par amincissement mécanique (préparation dite "Tripod") a servi de référence. En effet, les échantillons "Tripod" sont exempts de couche amorphe et d'implantation ionique et sont donc de meilleure qualité. Néanmoins, cette technique de préparation n'est utilisée qu'occasionnellement en milieu industriel car elle est longue et délicate dans sa mise en œuvre et la localisation des zones d'intérêt reste ardue.

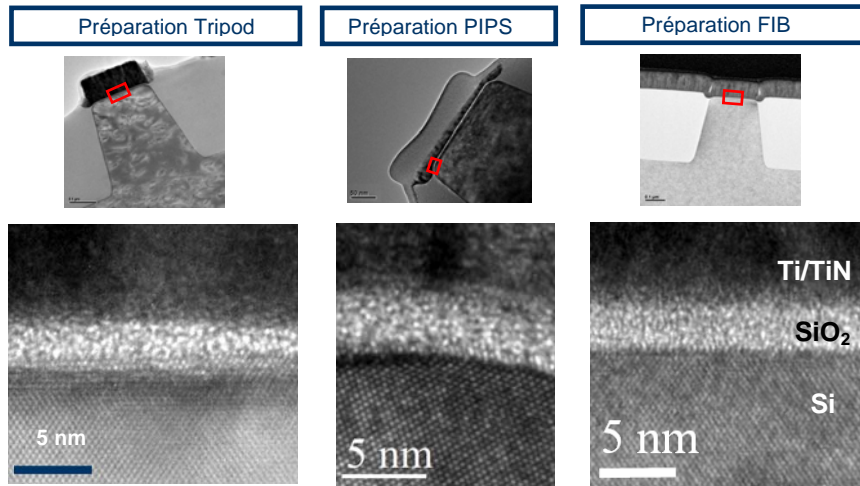


Figure 2 – Images MET d'oxydes de grille obtenues après différentes méthodes de préparation.

Les images présentées sur la figure 2 permettent une comparaison directe des trois techniques de préparation. Par rapport au polissage mécanique, la préparation d'échantillon par faisceau d'ions conduit à une observation légèrement moins nette des colonnes atomiques du silicium. On note toutefois une qualité sensiblement supérieure des lames préparées par PIPS par rapport à celles obtenues par FIB. La meilleure observation de l'orientation cristallographique du silicium reste toutefois celle obtenue après une préparation Tripod même si on constate une forte rugosité des interfaces probablement liée à l'application prolongée du dernier feutre de polissage, celle-ci empêchant une mesure précise de l'épaisseur de la couche d'oxyde. En effet, de par ces interfaces irrégulières, il est difficile de savoir si l'on travaille à la bonne focalisation. De ce fait, non seulement on perd en résolution, mais on s'écarte aussi des conditions permettant de limiter les phénomènes de délocalisation d'images et de franges de Fresnel, ce qui accroît davantage l'incertitude sur la mesure d'épaisseur de l'oxyde. Il peut donc être intéressant de chercher les moyens de corriger ou contourner ces problèmes notamment grâce à la correction de l'aberration de sphéricité – soit à partir d'une série focale soit par l'utilisation d'un microscope équipé d'un correcteur de Cs – ou l'utilisation d'autres techniques de microscopie électronique telles que l'imagerie en champ sombre annulaire à grand angle HAADF (High Angle Annular Dark Field).

2. Imagerie d'un empilement de type "jonction magnétique tunnel" pour les mémoires MRAM

Les cellules mémoires MRAM conventionnelles sont basées sur la propriété de magnétorésistance géante d'une jonction magnétique tunnel. Ce mécanisme est lié au passage d'électrons, par effet tunnel, à travers un oxyde ultramince pris en sandwich entre deux alliages ferromagnétiques. Afin de limiter les courants de programmation, la start-up Crocus Technology et le laboratoire CEA/CNRS Spintec ont développé une cellule TAS-MRAM dans laquelle le basculement d'aimantation est assisté thermiquement par l'injection d'un courant. Des premières analyses MET ont été menées par le L2MP sur des dépôts "pleine plaque" constituant l'empilement de base des jonctions magnétiques tunnel (JMT). L'objectif était de faire la métrologie des épaisseurs, d'observer les interfaces oxyde tunnel/couches magnétiques et de caractériser l'oxyde tunnel (uniformité, épaisseur, orientation). Les premières sections transverses ont été obtenues sur des lames préparées par FIB à 30 keV (Fig. 3a). L'épaisseur importante associée aux numéros atomiques élevés des couches de l'empilement n'ont pas permis une observation correcte. Afin d'améliorer la qualité des lames, un nettoyage FIB à 5 keV a suivi une préparation classique à 30 keV. Avec ce nettoyage, il a alors été possible d'observer la microstructure des différentes couches (Fig. 3b) et de déterminer une épaisseur d'oxyde tunnel de 1,2 nm.

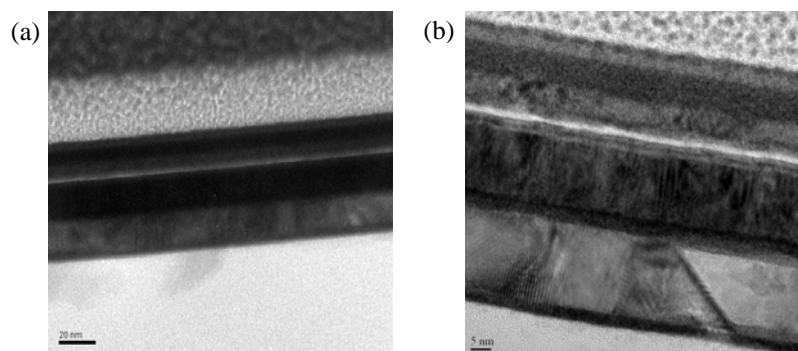


Figure 3 – Images MET d'un empilement pleine plaque de couches permettant de réaliser une JMT (a) préparation FIB 30 keV (b) préparation FIB 30 keV + nettoyage final à 5 keV