

Interfaces de jonctions tunnel magnétiques épitaxiées CoFe/MgO/CoFe (001)

K. March*, D. Imhoff, M. Walls, G. Krill, C. Colliex

Laboratoire de Physique des Solides, Université Paris-Sud, CNRS, UMR 8502, 91405 Orsay cédex

** ALTIS Semiconductor, MRAM Joint Development Project, 224 bd John Kennedy, 91105 Corbeil-Essonnes*

V. Serin, E. Snoeck

Centre d'Elaboration de Matériaux et d'Etudes Structurales-CNRS, UPR 8011, 31055 Toulouse cédex 4

F. Bonell, A. Bataille, C. Tiusan, S. Andrieu

Laboratoire de Physique des Matériaux, Université H. Poincaré-Nancy I, CNRS, UMR 7556, 54506 Vandoeuvre-lès-Nancy

Une jonction tunnel magnétique (JTM) est constituée de deux couches ferromagnétiques, de champs coercitifs différents, séparées par une fine couche électriquement isolante. Les électrons, polarisés en spin au passage de la première couche ferromagnétique, traversent la barrière par effet tunnel. Cette transmission, dépendante du spin, est directement liée à l'orientation relative de l'aimantation des deux couches ferromagnétiques : ceci se traduit par l'observation de la magnétorésistance tunnel (MRT).

La magnétorésistance tunnel des premières jonctions réalisées à partir de couches magnétiques polycristallines et d'une barrière d' Al_2O_3 amorphe atteignait 70%. En 2001, Butler *et al.* [1] ont montré, à partir d'une étude théorique, que le système Fe/MgO/Fe, épitaxié selon la direction (001) du Fe, pouvait présenter des MRT jusqu'à 1000% du fait de la polarisation en spin : totale pour les électrons *s* de symétrie Δ_1 et partielle pour les électrons *d* de symétrie Δ_5 du Fe. Les résultats expérimentaux obtenus sur des jonctions Fe/MgO/Fe, élaborées par Epitaxie par Jets Moléculaires (EJM), ont confirmé partiellement ces calculs : 180% de MRT ont été obtenus [2, 3]. Des MRT supérieures à 200% ont été observées sur des électrodes CoFe polycristallines [4] et, plus récemment, 340% pour des électrodes épitaxiées de Co CC pur [5]. Cette situation, plus favorable avec Co, s'explique par le décalage du niveau de Fermi dans la structure de bande conduisant au remplissage du canal de conduction Δ_5 qui n'est que partiellement polarisé [1].

Ces valeurs expérimentales de MRT sont encore bien inférieures aux prévisions théoriques. Ceci peut s'expliquer en premier lieu par le caractère imparfait des interfaces métal/MgO ou MgO/métal. De plus, le transport tunnel polarisé en spin peut être perturbé par des paramètres tels que la rugosité interfaciale, la présence d'impuretés ou de lacunes, une éventuelle interdiffusion... Si des mesures XPS, réalisées in-situ sur l'interface métal/MgO, sur une surface de quelques μm^2 , ont montré que l'hybridation Fe (ou Co)/O est très faible [6], on ne dispose d'aucun renseignement sur l'interface MgO/métal et encore moins d'informations locales. L'objectif premier de cette étude est d'examiner par des mesures locales l'hybridation éventuelle de Fe et Co avec MgO aux deux interfaces. En nous donnant accès à la fois aux paramètres structuraux (MEHR : Microscopie Electronique à Haute Résolution) et aux densités d'états inocuppées projetées sur un site (ELNES: Energy Loss Near Edge Structure), la microscopie électronique en transmission se révèle être un outil de choix.

Des jonctions tunnel Fe/MgO/Fe et $\text{Co}_{0.7}\text{Fe}_{0.3}/\text{MgO}/\text{Co}_{0.7}\text{Fe}_{0.3}$ ont été élaborées par EJM sur substrats de MgO au Laboratoire de Physique des Matériaux-Nancy selon la direction de croissance [001]. L'épitaxie a été contrôlée lors du dépôt par RHEED. Cette présentation concerne les premiers résultats de l'analyse de JTM de type CoFe/MgO/CoFe. Dans le cas de Fe/MgO/Fe [7], la rugosité des interfaces a été clairement mise en évidence grâce à l'utilisation de sondes électroniques de dimension atomique. La rugosité conduit à l'interpénétration locale de « marches » de Fe et de MgO. L'environnement du fer est alors constitué principalement d'atomes d'oxygène et cette signature peut être observée sur les seuils d'absorption de ces deux sites [7]. Il a été démontré que les interfaces Fe/MgO sont plus abruptes que celles MgO/Fe.

Des observations en MEHR de CoFe/MgO/CoFe ont été réalisées avec le microscope FEI Tecnai F20 S-Twin du CEMES-Toulouse équipé d'un correcteur d'aberration sphérique. Sur la figure *a*), sont illustrés les deux types de barrière de MgO : l'une fine (6 plans atomiques) et fonctionnelle, l'autre de 5 nm d'épaisseur destinée à l'analyse individuelle de chaque interface. Les clichés MEHR ne font pas apparaître de différences notables entre les interfaces supérieures et inférieures. La spectroscopie de pertes d'énergie des électrons (EELS) a été réalisée sur le microscope STEM VG HB-501 d'Orsay. Des cartographies chimiques ont été déduites de spectres-images (constitués de 128 x 16 spectres EELS). Un profil de concentration typique de cette série d'analyses est présenté sur la figure *b*). Aucun élément de transition n'est détecté dans la barrière de MgO. Les interfaces sont très abruptes : l'évolution des intensités des signaux des éléments Fe, Co et O dans la zone interfaciale est concentrée sur 1.5 nm (entre 20 et 80% de l'intensité) et nous analyserons de façon plus détaillée les écarts éventuels à la symétrie et les gradients des différents profils. Comme le montrent les figures *c*) et *d*) à la traversée des deux interfaces, les structures ELNES au seuil K de l'oxygène ne diffèrent significativement pas

* Auteur à contacter : march@lps.u-psud.fr – Tél : 01 69 15 53 61

du MgO de volume. En particulier, aucune manifestation de l'hybridation entre les métaux de transition et l'oxygène n'est détectée à l'apex de l'une ou l'autre interface. Cette hybridation se manifesterait essentiellement par l'observation de structures satellites à quelques eV au dessous du seuil K de l'oxygène. Symétrie et évolution des concentrations aux interfaces seront discutées.

Cette étude indique clairement les voies dans lesquelles doit se prolonger cette recherche : amélioration de la résolution spatiale et duplication des mesures sur un STEM doté d'un correcteur d'aberration, extension au cas de la jonction ultra-mince et développement des simulations des structures fines aux seuils (cf. calculs FEFF ou WIEN2k).

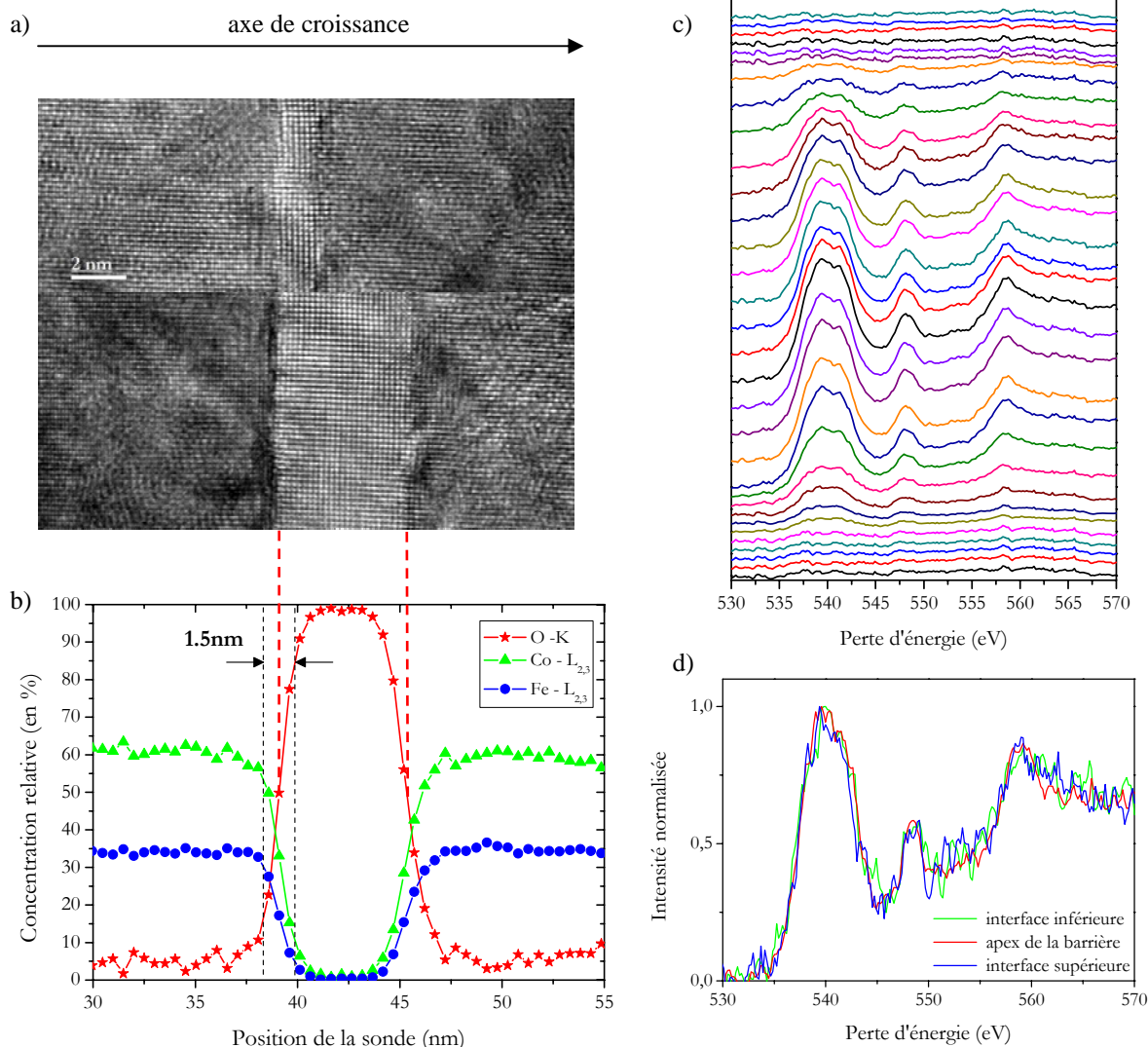


Figure – *a*) Images HRTEM de JTM CoFe/MgO/CoFe dont les épaisseurs de barrière sont respectivement de 1.2 nm et 5 nm. – *b*) Profil de concentration de O, Co et Fe, déduit d'un spectre-image de 128x16 spectres EELS (300 ms, 1 eV, taille du pixel : 0.5 nm), dont les intensités sont corrigées des sections efficaces puis normalisées à la somme des éléments. – *c*) Evolution des structures ELNES du seuil K de l'oxygène (après analyse en composantes principales - 3 valeurs propres) à la traversée de la barrière de MgO (10 s, 0.2 eV, distance entre spectres : 0.37 nm). – *d*) Seuils K de l'oxygène bruts normalisés en intensité : comparaison entre l'apex de la barrière et les deux interfaces.

Références

- [1] W.H. Butler *et al*, *Phys. Rev. B* **63** (2001) 054416.
- [2] M. Bowen *et al*, *App.Phys. Lett.* **79** (2001) 1655, J. Faure-Vincent *et al*, *App.Phys. Lett.* **82** (2003) 4507.
- [3] S. Yuasa *et al*, *Nature Materials* **3** (2004) 868, M. Sicot *et al*, *PhD thesis* (2005) Nancy University France.
- [4] S.S. Parkin *et al*, *Nature Materials* **3** (2004) 862.
- [5] S. Yuasa *et al*, *Appl. Phys. Lett.* **89** (2006) 042505.
- [6] M. Sicot *et al*, *Phys. Rev. B* **72** (2005) 144414.
- [7] V. Serin *et al*, en préparation (2007).