

Intégration d'un Polariseur Perpendiculaire dans une Jonction Tunnel Magnétique

Maria MARINS DE CASTRO SOUZA

Université Joseph Fourier

¹Laboratoire Spintec, CEA-INAC / CNRS / UJF-

Grenoble 1 / Grenoble-INP – UMR 8191

17, Rue des Martyrs

38054 GRENOBLE cedex 09

R. C. SOUSA¹, U. EBELS¹, B. RODMACQ¹,

S. AUFFRET¹, C. DUCRUET²,

I. L. PREJBEANU², C. PAPUSOI¹,

S. BANDIERA¹, C. PORTEMONT²,

M. T. DELAYE³, Y. DAHMANE¹,

J. HERAULT¹, B. DIENY¹

²Crocus Technology, 4 Place Robert Schuman, 38025
Grenoble Cedex, France

³CEA/Leti/Minatoc, 38054 Grenoble, France

Email : maria.marins-de-castro-souza@cea.fr

Résumé

Cet article montre l'intégration d'un polariseur à aimantation perpendiculaire aux plans des couches au-dessous d'une jonction tunnel magnétique classique à aimantation planaire. Dans des structures métalliques similaires, type vanne de spin, cette solution a permis une écriture en quelques centaines de pico-secondes et aussi une réduction du courant critique nécessaire à l'écriture, ce qui permet de réduire la consommation électrique. Dans un premier temps, nous avons développé une structure à forte anisotropie perpendiculaire dans le but d'augmenter la stabilité du système. Ensuite nous avons étudié l'interaction entre le polariseur perpendiculaire et la couche libre de notre jonction tunnel magnétique.

1. Introduction

A présent, les technologies mémoires associées à un microprocesseur d'ordinateur sont essentiellement des dispositifs à base de silicium semi-conducteurs: Static Random Access Memory (SRAM) et Dynamic Random Access Memory (DRAM). Ces mémoires sont rapides mais elles sont volatiles, en d'autres termes, les données sont perdues lorsque l'alimentation électrique est coupée. La mémoire FLASH offre l'avantage de la non-volatilité. En revanche elle a des cycles d'écriture de l'ordre de la micro-seconde et aussi un nombre de cycles d'écriture limitée. La mémoire magnétique Magnetic Random Access Memory (MRAM) est une technologie qui combine la rapidité, la non-volatilité et une faible consommation électrique.

L'élément de base des cellules mémoires MRAM est une jonction tunnel magnétique constituée de deux électrodes ferromagnétiques séparées par une fine couche isolante appelée barrière tunnel dont l'épaisseur est de l'ordre du nanomètre.

Le phénomène physique appelé magnétorésistance tunnel (TMR) est observé dans ces jonctions tunnel magnétiques. Pour expliquer ce processus, considérons que les spins des électrons qui traversent la jonction sont polarisés grâce à leur interaction avec l'aimantation de la

première électrode ferromagnétique. Ensuite ces électrons traversent la barrière par effet tunnel. La résistance de la jonction dépend de l'orientation relative des aimantations de deux électrodes magnétiques lors du passage des électrons d'après le modèle proposé par Jullière en 1975 [1]. En jouant sur l'orientation relative de deux électrodes magnétiques, il est possible d'induire deux états résistifs différents ce qui permet de coder le « 0 » (configuration parallèle) et le « 1 » (configuration antiparallèle) du code binaire qui est la base logique d'une cellule mémoire.

La TMR est liée à la différence relative de résistance entre les états parallèle et antiparallèle et est définie par :

$$TMR = \frac{R_{AP} - R_P}{R_P}$$

avec R_P et R_{AP} les résistances dans l'état parallèle et antiparallèle respectivement.

Il est important d'obtenir des TMR les plus grandes possibles pour préserver la lisibilité de l'information. Le bon fonctionnement d'une jonction tunnel magnétique dépend aussi de la capacité à bien contrôler l'aimantation des couches magnétiques. A cet égard, l'architecture recherchée est une couche dite « piégée » ou « de référence » dont l'aimantation est fixe et une couche dite « libre » ou « de stockage » dont l'orientation peut être modifiée pour induire les configurations parallèle et antiparallèle (Figure 1).

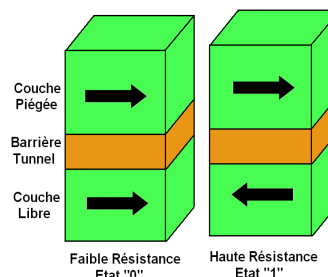


Figure 1. Cellule mémoire MRAM et les deux états résistifs : faible et haute résistance.

Récemment il a été démontré que la commutation magnétique d'une jonction tunnel magnétique pouvait être réalisée en utilisant le courant polarisé en spin issu de la couche ferromagnétique de référence [2] [3]. Dans un tel dispositif, la réduction du courant critique nécessaire à l'écriture est un élément essentiel vers la diminution de la consommation électrique. Le mode d'écriture par courant polarisé en spin peut être optimisé par l'adjonction dans la structure d'une couche ferromagnétique supplémentaire avec une aimantation orientée perpendiculairement aux plans des couches. L'ajout de ce polariseur supplémentaire permet de réduire le courant critique nécessaire à l'écriture d'un facteur 2 à 3 pour atteindre $2 \cdot 10^6 \text{ A/cm}^2$ [4]. Dans cette optique, nous avons réalisé une structure qui intègre un polariseur perpendiculaire aux plans de couches avec une jonction tunnel magnétique classique à aimantation planaire comme montré dans la Figure 2.

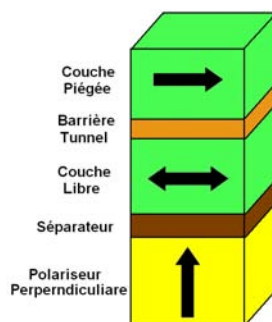


Figure 2. Intégration d'un polariseur à aimantation perpendiculaire et d'une jonction tunnel magnétique à aimantation planaire.

2. Développement de la barrière tunnel et du polariseur perpendiculaire

A part une grande amplitude de signal de TMR, un autre paramètre essentiel dans ces types de dispositifs est le produit résistance surface RxA . Effectivement à partir de la loi d'Ohm, nous pouvons écrire :

$$U = RxA \cdot j$$

où U est la différence de potentiel aux bornes de la jonction, RxA le produit résistance surface et j la densité de courant nécessaire à l'écriture de la cellule mémoire. Or la valeur de U est fixée à une valeur maximale au delà de laquelle il y a claquage électrique de la jonction. Donc dans le mode l'écriture par courant polarisé en spin, pour que le courant qui provoque la commutation magnétique puisse traverser la barrière tunnel sans provoquer le claquage électrique, il faut que le produit RxA soit de l'ordre de quelques $\Omega \cdot \mu\text{m}^2$. Ceci nécessite la réalisation de couches isolantes continues et très fines, d'épaisseur inférieure à 1nm. Nous avons optimisé des barrières à base d'aluminium oxydé naturellement qui présentent une TMR d'environ 25% et un produit RxA d'environ $10 \Omega \cdot \mu\text{m}^2$ après un recuit à 250°C pour 0.65 nm d'aluminium déposé par pulvérisation cathodique.

Le développement d'un polariseur avec une forte anisotropie perpendiculaire est un autre aspect de cette étude. Les mesures d'Effet Hall Extraordinaire (EHE) montrent que l'insertion d'une multicouche de Co/Pt en-

dessous d'un polariseur perpendiculaire à base de Co/Cu/Co augmente significativement la coercivité du système grâce à une augmentation de l'anisotropie d'interface (Figure 3a). La couche qui sépare le polariseur perpendiculaire et la jonction tunnel a également été étudiée. Une couche séparatrice à base d'oxyde d'aluminium entraîne une anisotropie perpendiculaire plus importante du polariseur par comparaison avec une couche métallique comme le cuivre (Figure 3b). Cela rejoint d'autres résultats de la littérature et met en évidence le rôle essentiel que joue l'interface dans les systèmes perpendiculaires [5] [6].

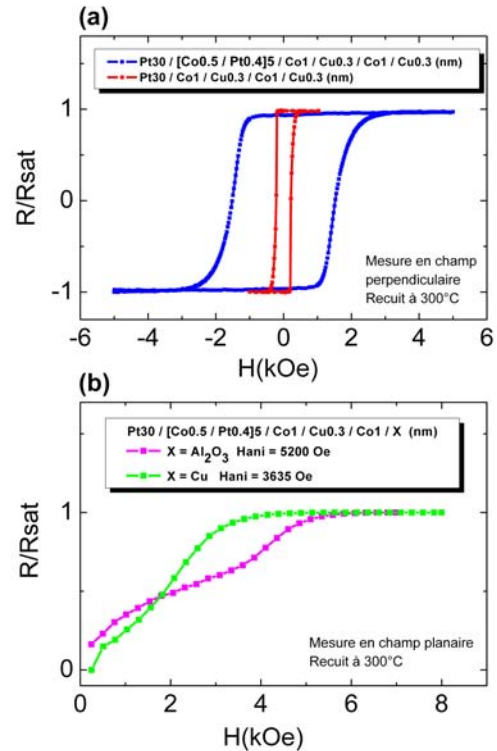


Figure 3(a) Coercivité d'une couche perpendiculaire avec et sans la multicouche à base de Co/Pt. 3(b) Anisotropie du polariseur perpendiculaire avec une couche tampon à base de Cu ou de Al_2O_3 .

3. Intégration d'un polariseur perpendiculaire dans une jonction tunnel magnétique

L'empilement que nous avons optimisé est donc du type polariseur perpendiculaire avec une multicouche Co/Pt et Co/Cu/Co et une jonction tunnel magnétique à base d'oxyde d'aluminium. Ces deux structures sont séparées soit par une barrière d'alumine, soit par une couche de cuivre. La structure complète a été déposée par pulvérisation cathodique et elle a été recuite à 250°C pendant 1h30 sous vide. Cela correspond à la température optimale à l'obtention d'un maximum de TMR avec une barrière tunnel à base d'alumine tout en gardant des bonnes propriétés d'anisotropie du polariseur perpendiculaire.

L'étude des propriétés magnétiques d'un tel système intégré permet de comprendre les interactions qui peuvent exister entre le polariseur et la jonction tunnel. Grâce à des mesures magnétiques à l'aide d'un Vibrating Sample Magnetometer (VSM), nous avons étudié le comportement magnétique d'un tel système. Sur la Figure

4a, le cycle magnétique du système est représenté en fonction du champ magnétique appliqué dans le plan des couches. Le détail montre le cycle d'hystérésis de la couche libre. Partant d'un champ appliqué de +3.5 kOe, on observe successivement la contribution du polariseur perpendiculaire, puis de la couche libre de la jonction (entre -0.4 et 0.4 kOe), puis de la couche piégée de la jonction (entre -0.4 et -1.2 kOe). La Figure 4b montre le signal magnétique obtenu pour une excursion de champ magnétique limitée à ± 100 Oe. On remarque que la forme du cycle magnétique de la couche libre est dans ce cas très proche de celui attendu pour une structure de type jonction planaire conventionnelle sans polariseur perpendiculaire. Cette différence s'explique par le fait que, dans le cas de la figure 4a, le champ planaire appliqué de 3.5 kOe est suffisant pour orienter dans le plan des couches l'aimantation du polariseur, initialement à aimantation perpendiculaire et mono-domaine en champ nul. Lors du retour en champ nul, l'aimantation du polariseur redevient perpendiculaire mais avec une structure en domaines (Figure 4c). Les domaines de fermeture du polariseur sont planaires et leur aimantation interagit alors celle de la couche libre de la jonction, en augmentant fortement son champ coercitif. Dans le cas de la Figure 4b, le champ appliqué n'est pas assez important pour perturber l'aimantation du polariseur, préalablement saturé en champ perpendiculaire. On retrouve alors pour la couche libre un champ coercitif classique de l'ordre de 5 Oe.

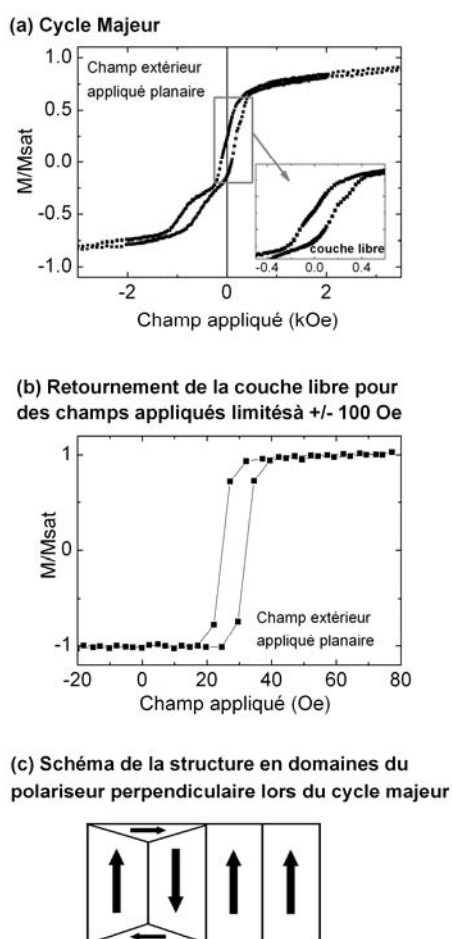


Figure 4. Réponse magnétique à un champ appliqué dans le plan des couches. 4(a) Cycle majeur. 4(b) Retournement de la couche libre. 4(c) Schéma polariseur perpendiculaire en domaines.

4. Conclusions

Dans le but de réduire le courant critique nécessaire à la commutation dans le cas d'une cellule mémoire MRAM, l'intégration d'un polariseur perpendiculaire au plan de couches avec une jonction tunnel magnétique classique à aimantation planaire a été étudiée. Dans un premier temps, nous avons étudié des systèmes présentant une forte anisotropie perpendiculaire. L'empilement de type multicouche de Co/Pt couplée à Co/Cu/CO est un bon candidat pour le polariseur perpendiculaire en raison d'une coercivité significative. En ce qui concerne la couche qui sépare le polariseur perpendiculaire et la jonction tunnel, l'anisotropie perpendiculaire du polariseur est renforcée si cette couche est un oxyde d'aluminium en comparaison avec une couche à la base de cuivre. Nous avons également étudié le système intégré avec un polariseur perpendiculaire et une jonction tunnel magnétique à aimantation planaire. On remarque que quand le polariseur perpendiculaire est en domaines, il existe une interaction magnétostatique entre les flux de fermeture du polariseur perpendiculaire et la couche libre de la jonction. Cette interaction disparaît si le polariseur est mono-domaine. La prochaine étape de cette étude est la caractérisation électrique de nano piliers pour l'évaluation électrique du courant critique lors de l'écriture de la cellule MRAM.

Références

- [1] M.T. Jullière, "Tunneling between ferromagnetic films", Phys. Lett A **54** (1975) pp 225-226
- [2] J.A. Katine, F.J. Albert, R.A. Buhrman, E.B. Myers, and D.C. Ralph, "Current-Driven Magnetization Reversal and Spin-Wave Excitations in Co/Cu/Co Pillars", Phys. Rev. Lett. **84** (2000) pp 3149-3152
- [3] J. Grollier, V. Cros, A. Hamzic, J.-M. George, H. Jaffrès, A. Fert, G. Faini, J. Ben Youssef, and H. Le Gall, "Spin-polarized current induced switching in Co/Cu/Co pillars", Appl. Phys. Lett. **78** (2001) pp 3663
- [4] Y. Huai, M. Pakala, Z. Diao, and Y. Ding, "Spin-transfer switching current distribution and reduction in magnetic tunneling junction-based structures", IEEE Trans. Magn. **41** (2005) pp 2621-2626
- [5] Y. Dahmane, S. Auffret, U. Ebels, B. Rodmacq, and B. Dieny, JEMS, "Perpendicular Magnetic Anisotropy induced at Co/Metal and Metal/Co interfaces" Joint European Magnetic Symposia **MR015** (2008)
- [6] Y. Dahmane, C. Arm, S. Auffret, U. Ebels, B. Rodmacq, and B. Dieny, "Oscillatory behavior of perpendicular magnetic anisotropy in Pt/Co/Al(Ox) films as a function of Al thickness" Appl. Phys. Lett. **95** (2009) pp 222514