

Dynamique de parois magnétiques induite par un courant polarisé en spin

Institut Néel - CNRS-UJF - Grenoble

SPINTEC - CEA - Grenoble

UMPhy CNRS-Thales - Palaiseau

Laboratoire de Physique des Solides - CNRS et Université Paris Sud - Orsay

Laboratoire de Photonique et de Nanostructures - CNRS- Marcoussis

La découverte de l'effet de "couple de transfert de spin" par lequel l'aimantation d'une nanostructure peut être manipulée par un courant électrique, a donné lieu à des développements importants de l'électronique de spin. Plusieurs études théoriques et expérimentales, motivées par des applications dans la logique magnétique et les mémoires, sont dédiées à l'étude du déplacement de parois magnétiques. Pour que les nanostructures à transfert de spin puissent être utilisées dans des dispositifs, les parois doivent se déplacer rapidement (> 100m/s) avec des densités de courant les plus faibles possible.

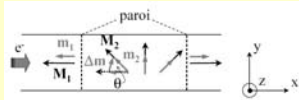
Le but du projet DYNAWALL est d'avancer dans la compréhension du phénomène de "spin torque" et de proposer des systèmes modèles dans lesquels l'efficacité du transfert de spin est importante.

Nous avons identifié trois systèmes prometteurs: les vannes de spin Co/Cu/FeNi à aimantation planaire (vitesses de déplacement très importantes - jusqu'à 400m/s - et densités de courant faibles); les couches Pt/Co/AlOx à aimantation perpendiculaire (vitesses importantes, fortes densités) et les couches GaMnAs à aimantation perpendiculaire (vitesses moyennes, très faibles densités de courant)

Mouvement de parois par courant polarisé

Le moment cinétique des électrons de conduction est transféré à l'aimantation locale : la paroi se déplace sous l'effet du courant polarisé

Berger, JAP 55, 1954 (1984)



Approche micromagnétique - équation LLG

$$\dot{m} = \gamma_0 H_{\text{eff}} \times m + \alpha m \times \dot{m} + \underbrace{(\mathbf{u} \cdot \nabla) m}_{\text{terme de transfert de spin adiabatique}} + \underbrace{\beta m \times [(\mathbf{u} \cdot \nabla) m]}_{\text{et non-adiabatique}}$$

$$u = \frac{J P g \mu_B}{(2e M_S)}$$

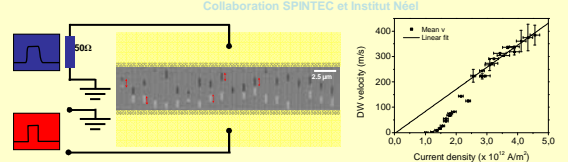
$$v_{DW} = \frac{\beta}{\alpha} u$$

Efficacité du spin torque

La vitesse de propagation des parois dépend de β/α

Pt/Co/AlOx à aimantation perpendiculaire

T. A. Moore, I. M. Miron, G. Gaudin, et al. Appl. Phys. Lett. 93 (2008) 262504.



Déplacement de parois dans des lignes de Pt(3nm)/Pt(0.5nm)/AlOx(2nm) de largeur 500nm visualisé par microscopie magnéto-optique Kerr polaire: deux parois dans chaque ligne se déplacent dans la direction du courant électrique après l'application de 10 impulsions de durée 1.5 ns et densité $j = 1.7 \times 10^{12}$ A/m². En variant la densité du courant, on met en évidence un régime de "creep" et un régime linéaire stationnaire de "flow" (confirmé par des simulations micromagnétiques) où l'on observe des vitesses record (400m/s).

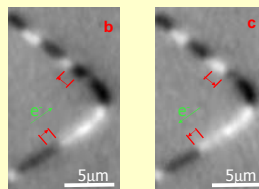
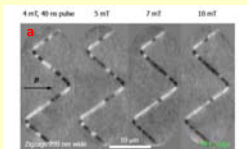
La très grande efficacité du spin torque est liée à la valeur de $\beta=1$. $\beta = \tau_{\text{ex}} / \tau_{\text{sf}}$
La présence d'un champ électrique E non compensé (champ Rashba) à l'interface Co/AlOx augmente l'efficacité du spin-flip.

Vannes de spin Co/Cu/FeNi

V. Uhler, S. Pizzini, J. Vogel, N. Rougemaille, V. Cros, S. Laribi, G. Faini et al

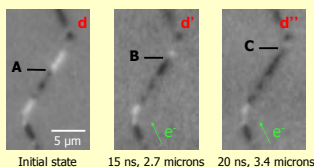
Collaboration Institut Néel, CNRS-Thales et LPN

Bandes de Co 7nm / Cu 8nm / NiFe 5nm de largeur 200-400nm



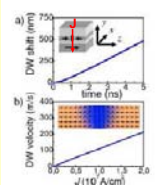
Les mesures XMCD-PEEM en fonction de l'amplitude du champ magnétique appliqué montrent que les parois sont très piégées par les défauts (a). Un courant $j = \pm 3.3 \times 10^{11}$ A/m² déplace deux parois dans des directions opposées (b,c). Le courant critique est plus grand pour les autres parois.

Pour des impulsions suffisamment courtes et en absence de fort piégeage, les déplacements sont linéaires avec la durée de l'impulsion de courant, et les vitesses sont très élevées (180m/s en d-d').



Rôle des courants de spin verticaux dans le déplacement de paroi par transfert de spin

A. Khvalkovskiy, V. Cros, J. Grollier, Phys. Rev. Lett. 102, 067206 (2009)



Les calculs de Khvalkovskiy *et al.* montrent que l'efficacité du spin torque augmente fortement dans le cas de géométrie CPP par rapport à CIP. Pour des courants verticaux, des vitesses de l'ordre de 200m/s sont prédites pour des densités $J = 2 \times 10^{11}$ A/m².



Dans nos structures (où le courant est majoritairement dans le plan des couches) des courants verticaux peuvent s'établir près d'une paroi magnétique grâce à l'accumulation de spin présente au niveau de la paroi. L'amplification de l'effet de transfert de spin due à ces courants verticaux peut expliquer les résultats des mesures des vitesses de parois par XMCD-PEEM.

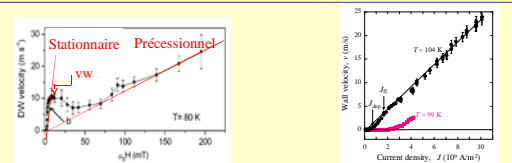
(Ga,Mn)As à aimantation perpendiculaire

J.-P. Adam, N. Vernier, J. Ferré, A. Thiaville, V. Jeudy, L. Thevenard, A. Lemaître, G. Faini

Collaboration Laboratoire de Physique des Solides et LPN



Déplacement de parois observé par microscopie magnéto-optique Kerr polaire, pour des bandes de GaMnAs de dimensions 4 μ m x 90 μ m à 104K. La durée des impulsions est 1.0ps et la densité de courant $J = 4.4 \times 10^{10}$ A/m². Le courant critique est très faible par rapport à des systèmes métalliques, grâce à l'aimantation faible et à la forte polarisation en spin.



L'analyse du déplacement d'un domaine d'aimantation retournée (comportant deux parois) permet de séparer la contribution du champ magnétique et celle du courant polarisé. En comparant nos résultats avec ceux obtenus dans des échantillons pleine plaque (figure de gauche), nous montrons que la composante dépendant du champ correspond à un régime stationnaire. L'existence du régime stationnaire implique une contribution non nulle de la composante non adiabatique du transfert de spin ($\beta \neq 0$). L'analyse de la composante dépendant du courant (figure de droite) nous permet de déterminer le rapport β/α . L'écart (d'un facteur 30) entre les valeurs du coefficient de dissipation α mesurées par résonance ferromagnétique et celles déduites des mesures de déplacement de parois suggère différents mécanismes de dissipation qui rendent difficiles les comparaisons avec des prédictions théoriques pour β .

Publications dans le cadre de DYNAWALL

Système Pt/Co/AlOx: T. A. Moore, I. M. Miron, G. Gaudin, G. Serret, S. Auffret, B. Rodmacq, A. Schuhl, S. Pizzini, J. Vogel, and M. Bonfim: Appl. Phys. Lett. 93 (2008) 262504.

Vannes de spin (théorie): - A.J.M. Ndjaka, A. Thiaville, J. Miltat: J. Appl. Phys. 105, 023905 (2009); - A. Khvalkovskiy, K. Zvezdin, Y. Gorbunov, A. Zvezdin, V. Cros, J. Grollier, A. Fert, A.K. Zvezdin: Phys. Rev. Lett. 102, 067206 (2009)

Vannes de spin (expérimental): - S. Pizzini, V. Uhler, J. Vogel, V. Cros et al. Appl. Phys. Express 2, 023003 (2009)