

Propriétés de couches magnétiques à anisotropie en hélice

M. GLOANEC - S. DUBOURG - F. DUVERGER - D. PLESSIS - A. BONNEAU-BRAULT / CEA – Le Ripault

Les couches minces magnétiques sont employées dans des dispositifs hyperfréquences pour les applications de télécommunications (substrats d'antennes, inductances planaires, filtres). Leurs performances sont intimement liées à l'homogénéité de leurs propriétés obtenues pendant la phase d'élaboration. Le cas typique d'une couche mince avec une anisotropie « en hélice » imposée pendant la fabrication est présenté ici. Une méthode originale d'évaluation de la dispersion d'aimantation générée a été développée. Elle démontre le très bon accord entre les cas expérimentaux et les cas calculés *via* un modèle micromagnétique 1D.

Le développement de matériaux magnétiques avec de forts niveaux de perméabilité, μ , sur une large gamme de fréquence, est un des principaux challenges pour le développement d'applications hyperfréquences. L'idéal est de pouvoir piloter leurs propriétés *via* un champ électrique. Cette agilité fréquentielle est obtenue dans des matériaux multi-ferroïques naturels ou artificiels présentant des propriétés ferroélectriques et magnétiques liées.

Pour autant, développer des matériaux « traditionnels » ferromagnétiques reste d'un grand intérêt. Parmi eux, les matériaux amorphes ou nanocristallins compensent leur manque d'agilité par de fortes perméabilités. Leur fréquence de résonance, F_r , qui détermine la fréquence de travail du dispositif, se situe entre 1 et 2 GHz. Cette fréquence dépend directement d'une grandeur appelée anisotropie magnétique. Elle est représentée par un vecteur \vec{H}_k , fonction de la nature du matériau, de sa structure, et plus généralement de son histoire (mode de dépôt,

traitement thermique...). Son orientation est la direction privilégiée de l'aimantation et son intensité impose la fréquence de résonance. Dans le cas d'un échantillon parfaitement homogène, cette dernière s'exprime par : $F_r = \bar{\gamma} \sqrt{4\pi M_s H_k}$ où $\bar{\gamma} = \frac{\gamma}{2\pi}$, avec γ le rapport gyromagnétique de l'électron, et M_s l'aimantation de saturation.

Pour aller au-delà de 2 GHz, ces matériaux doux sont associés à d'autres matériaux (isolants ou métalliques, paramétriques ou antiferromagnétiques) dans des structures multicouches [1]. Cette stratification accroît l'anisotropie par des couplages de surface. Les valeurs de perméabilités atteintes se dégradent rapidement lorsque le matériau doux est hétérogène, notamment lorsque son anisotropie fluctue en orientation ou en intensité.

Pour aller en deçà de 1 GHz, peu de solutions existent. Les plus efficaces consistent à pratiquer un recuit de la couche mince sous un champ magnétique tournant dont la fonction est de rendre aléatoire et isotrope la répartition des champs d'anisotropies locaux [2]. Ainsi distribués, ils se compensent et génèrent une anisotropie « effective » moins intense. Contrairement aux matériaux dédiés aux applications à hautes fréquences, la dispersion d'anisotropie est alors recherchée.

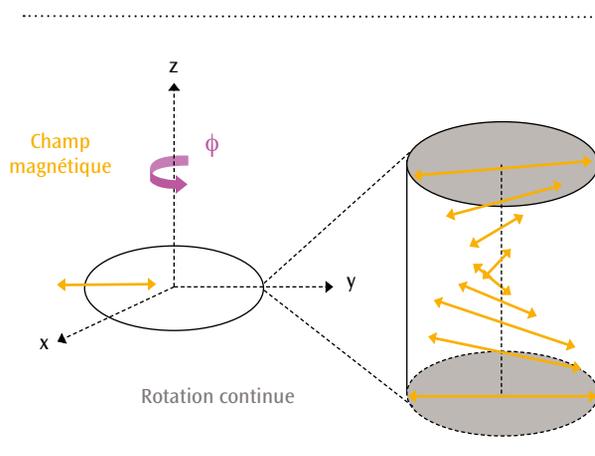


Figure 1. Profil d'anisotropie en hélice induit lors de l'étape de dépôt.

Un système modèle et une analyse originale de sa dispersion

Dans cette étude, nous avons fabriqué des couches magnétiques amorphes avec une anisotropie tournante dans l'épaisseur de la couche. Celle-ci a été obtenue par une rotation continue du substrat pendant l'étape de dépôt (figure 1). L'axe d'anisotropie est imposé par un champ magnétique extérieur fixe induisant un profil d'anisotropie en hélice. Chaque échantillon mesure 800 nm d'épaisseur tandis que le nombre de rotations effectuées varie de 0 à 16 tours.

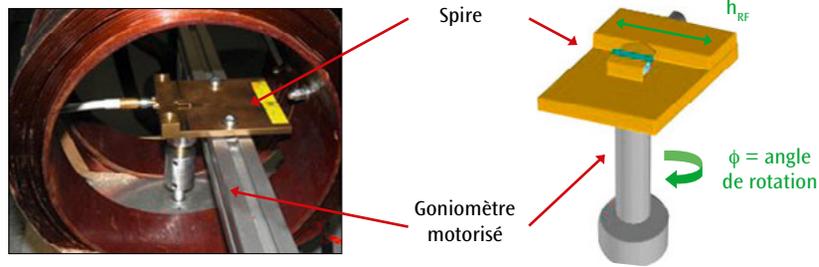


Figure 2. Photo et schéma de principe de la spire en rotation.

Les objectifs étaient multiples [3]:

- ▶ réduire l'anisotropie « effective » de la couche;
- ▶ valider une nouvelle méthode très générale pour mesurer la dispersion d'aimantation;
- ▶ corrélérer ces résultats avec un modèle micro-magnétique 1D.

La perméabilité des échantillons a été mesurée par la méthode de perturbation de spire sur laquelle a été implémenté un goniomètre motorisé de manière à effectuer une succession de mesures à différents angles dans le plan (figure 2). On montre que la variation angulaire de l'intégrale de la partie imaginaire de la perméabilité μ'' pondérée par la fréquence f se décrit simplement à partir de deux termes notés a_2 et b_2 , soit:

$$I(\phi) = \int_0^f \mu''(\phi, f) f df \approx I_{\max} [1 - a_2 \cos(2\phi) - b_2 \sin(2\phi)] / 2$$

De ces deux termes, on déduit la direction de l'anisotropie « effective » égale à $\arctan(a_2/b_2)$ et un terme de dispersion angulaire de l'aimantation $D = (a_2^2 + b_2^2)^{1/2}$. D tend vers 1 pour une couche dont l'aimantation est parfaitement alignée dans la même direction en tout point, et vers 0 pour une répartition d'aimantation isotrope.

Comparaison expérience et modèle

Sur la figure 3 sont présentées les mesures de la dispersion en fonction du nombre de tours [1]. Pour un nombre de rotations faible, l'aimantation suit

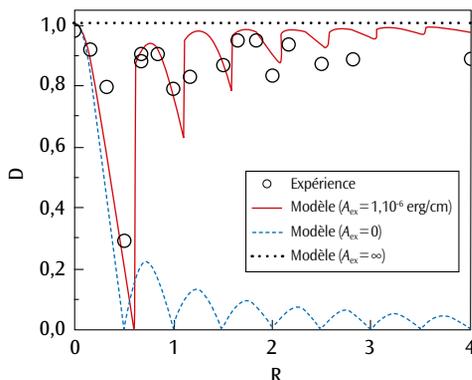


Figure 3. Dispersion angulaire mesurée et calculée en fonction du nombre de rotations.

parfaitement le profil en hélice imposé par l'anisotropie, et le terme D diminue progressivement. La dispersion de l'aimantation est optimale pour environ une demi-rotation pendant le dépôt. Pour un nombre de tours élevé, la dispersion s'estompe et D retend vers 1. Ce résultat est en accord avec le calcul micro-magnétique 1D (courbe rouge de la figure 3) qui tient compte de l'ensemble des énergies du système, c'est-à-dire l'énergie d'anisotropie en hélice qui distribue les axes d'anisotropies, et d'un terme, dit d'échange, qui force au contraire l'aimantation à s'aligner dans une même direction [4].

L'anisotropie effective de la couche passe de 15 Oe sans rotation à 7 Oe après 16 tours. Cette réduction est très significative même si une anisotropie parfaitement évanescence n'a pu être obtenue.

Conclusion

La réalisation d'un système modèle de couches minces a permis de valider une méthode de caractérisation très générale de la dispersion angulaire de l'aimantation dans des couches minces. Cette technique pourra être mise à profit pour optimiser des matériaux dédiés aux applications hyperfréquences.

Références

- [1] G. CHAI, Y. YANG, J. ZHU, M. LIN, W. SUI, D. GUO, X. LI, D. XUE "Adjust the resonance frequency of $(\text{Co}_{90}\text{Nb}_{10}/\text{Ta})_n$ multilayers from 1.4 to 6.5 GHz by controlling the thickness of Ta interlayers", *Appl. Phys. Lett.*, **96**, 012505 (2010).
- [2] K. SUZUKI, N. ITO, J.S. GARITAONANDIA, J.D. CASHION "High saturation magnetization and soft magnetic properties of nanocrystalline $(\text{Fe,Co})_{90}\text{Zr}_7\text{B}_3$ alloys annealed under a rotating magnetic field", *J. Appl. Phys.*, **99**, 08F114 (2006).
- [3] M. GLOANEC, S. DUBOURG, O. ACHER, F. DUVERGER, D. PLESSIS, A. BONNEAU-BRAULT, "Influence of a helical anisotropy profile on the static and dynamic properties of a soft magnetic layer", *Phys. Rev. B*, **85**, 094433 (2012).
- [4] V. DUBUGET, A. THIAVILLE, F. DUVERGER, S. DUBOURG, O. ACHER, A.-L. ADENOT-ENGELVIN, "Magnetization dynamics of soft films with thickness-dependent anisotropy", *Phys. Rev. B*, **80**, 134412 (2009).