

Couches magnétiques à haute perméabilité : une modélisation prédictive

Les récentes avancées dans la modélisation des couches minces ferromagnétiques, nous ont permis d'établir un modèle prenant en compte la dispersion d'anisotropie dans les couches ferromagnétiques. Ce modèle a été validé sur le cas canonique de couches à anisotropie croisée qui ont été réalisées expérimentalement. D'autre part, nous avons pu généraliser une règle s'appliquant aux spectres de perméabilité des matériaux ferromagnétiques, qui permet par la simple mesure de ces spectres de connaître plus en détail la configuration magnétique interne de la matière que par la mesure d'un cycle d'hystérésis.

F. Duverger • V. Dubuget • O. Acher • S. Dubourg • A.-L. Adenot • P. Thibaudeau CEA - Le Ripault
 A. Thiaville CNRS, Laboratoire de Physique des Solides, Université Paris-Sud, Orsay

Parmi les matériaux magnétiques doux, les couches ferromagnétiques possèdent des propriétés magnétiques importantes sur une grande plage de fréquence. Leur perméabilité magnétique est liée à la précession des spins autour de leur position d'équilibre gouvernée par l'équation de Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG):

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma \vec{M} \wedge \vec{H} + \alpha \vec{M} \wedge \frac{d\vec{M}}{dt}$$

où γ est le rapport gyromagnétique de l'électron, α le facteur d'amortissement, \vec{M} l'aimantation du matériau et \vec{H} la somme des champs appliqués et des champs effectifs.

Le principal champ effectif est le champ d'anisotropie H_K orientant l'aimantation statique dans la direction de facile aimantation. Pour une couche mince (plan x,y) uniformément aimantée suivant la direction y , la perméabilité gyromagnétique tirée de l'équation LLG est :

$$\mu_x \approx 1 + \frac{(\gamma M_S)^2}{\gamma H_K \gamma M_S + j\alpha\omega\gamma M_S - \omega^2}$$

où ω est la pulsation de l'excitation et M_S l'aimantation à saturation.

La fréquence de résonance du matériau est $\frac{\gamma\sqrt{M_S H_K}}{2\pi}$.

L'ingénierie de la réponse en fréquence de ces matériaux se fait donc en pilotant l'anisotropie magnétique par la composition et les paramètres d'élaboration.

Les couches minces déposées par pulvérisation magnétron peuvent présenter des dispersions d'anisotropie dans l'épaisseur liée à leur structure, qui conduisent à une inhomogénéité de l'aimantation. Nous avons réalisé un modèle numérique capable de prendre en compte cette inhomogénéité, qui a été validé sur le cas canonique des couches à anisotropie croisées [1].

Les couches à anisotropie croisée

Ces couches ont été obtenues par pulvérisation magnétron sur substrat polymère ou verre fixe, que l'on pivotait rapidement de 90° suivant un axe perpendiculaire au substrat à un instant du dépôt. La couche est ainsi scindée en 2 parties, présentant 2 axes d'anisotropie perpendiculaires entre eux.

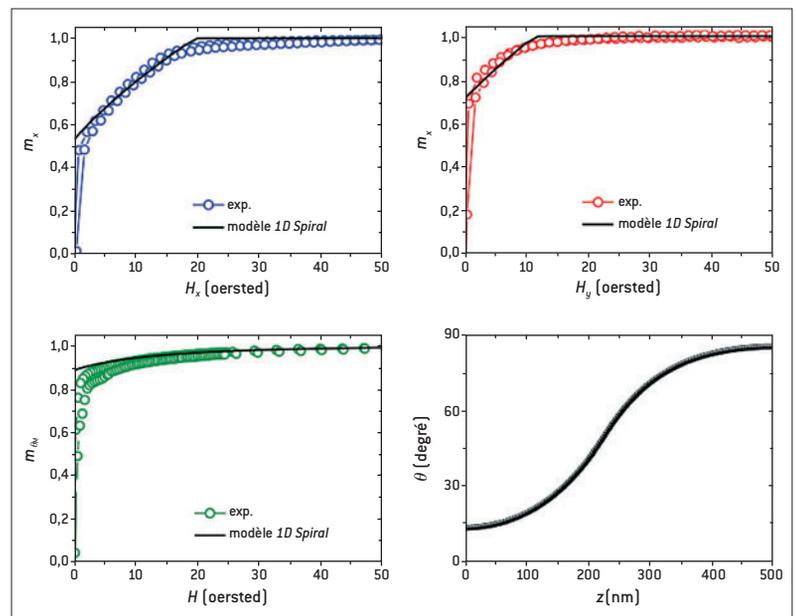


Figure 1. Comparaison des cycles d'hystérésis expérimentaux et du modèle (1D Spiral) selon les 2 axes x et y de la couche et selon l'axe de l'aimantation moyenne $\{\theta_M\}$ - Profil de l'aimantation correspondant, dans l'épaisseur z de la couche repéré par l'angle θ avec l'axe x .

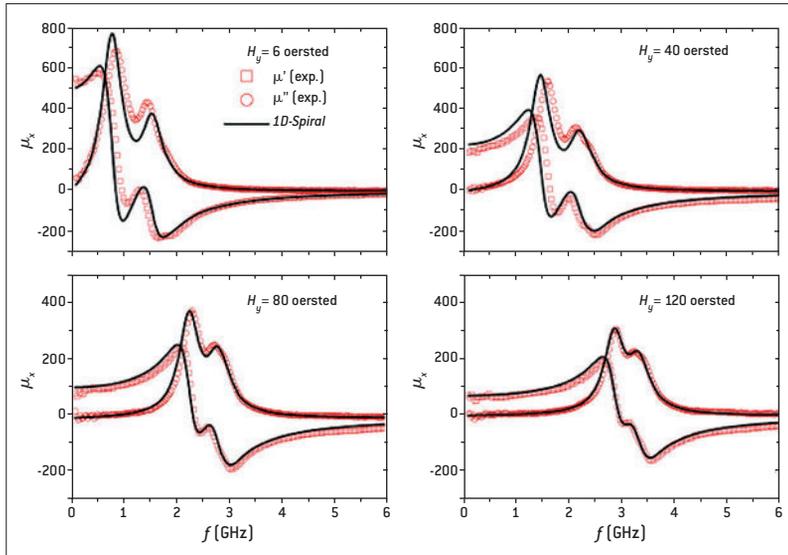


Figure 2. Comparaison des spectres de perméabilités expérimentaux et du modèle [1D-Spiral] pour différentes valeurs du champ extérieur statique.

Les modélisations numériques et analytiques sont rendues relativement simples du fait que la couche est homogène dans les 2 axes de son plan. Dans ce cas, l'expression du champ démagnétisant est identique au cas homogène et seul le terme d'échange est à ajouter.

La partie statique de la modélisation permet d'obtenir le profil d'aimantation dans l'épaisseur et de tracer les cycles d'hystérésis (**figure 1**).

La réponse dynamique du système se décompose en modes de vibration particuliers, dont la perméabilité μ_n a la même forme que pour une couche homogène en remplaçant le champ d'anisotropie H_K par un champ effectif H_n :

$$\mu_n \approx 1 + \frac{(\gamma M_S)^2}{\gamma H_n \gamma M_S + j\alpha\omega\gamma M_S - \omega^2}$$

La **figure 2** montre la bonne concordance entre le modèle et les spectres expérimentaux. Cette modélisation nous a permis de proposer un modèle de dispersion d'anisotropie par effet magnétostrictif pour rendre compte des spectres hyperfréquences obtenus pour des programmes internes du CEA - DAM.

Règle de somme applicable à la perméabilité magnétique

Le laboratoire a établi une règle s'appliquant aux spectres de perméabilité des couches minces mais aussi des composites à inclusions ferromagnétiques. Celle-ci a fait l'objet de plusieurs publications dont [2, 3], et s'exprime de la façon suivante :

$$\int_0^{\infty} \mu''(\omega) \cdot \omega \cdot d\omega = k \frac{\pi}{2} (\gamma M_S)^2$$

Le facteur k est toujours inférieur à 1 et dépend de la dimensionnalité du matériau.

Pour un matériau massif isotrope $k = \frac{1}{3}$.

Pour une couche mince uniformément aimantée $k = 1$. Différents facteurs correctifs ont été établis pour traiter des cas particuliers [3].

Grâce à cette règle, on déduit la quantité minimale de matériau magnétique permettant d'atteindre un objectif de performance d'un écran absorbant. En particulier, elle montre le potentiel des matériaux ferromagnétiques à fort M_S .

Cette règle permet aussi de caractériser plus finement une couche mince inhomogène. En effet, la mesure des spectres de perméabilité suivant les 2 axes x et y de son plan permet de remonter aux proportions d'aimantation projetées sur ces 2 axes :

$$\int_0^{\infty} \mu_x''(\omega) \cdot \omega \cdot d\omega = k \frac{\pi}{2} \langle \cos^2 \varphi \rangle (\gamma M_S)^2$$

$$\int_0^{\infty} \mu_y''(\omega) \cdot \omega \cdot d\omega = k \frac{\pi}{2} \langle \sin^2 \varphi \rangle (\gamma M_S)^2$$

Ceci a été vérifié sur le cas des couches à anisotropie croisée. Ce type de mesure permet de mettre en évidence la présence d'une dispersion d'aimantation.

Conclusion

Le développement des couches minces ferromagnétiques pour des applications du CEA - DAM a nécessité la mise en place d'une modélisation plus approfondie que le simple modèle gyromagnétique. Les dispersions liées à la fabrication ont pu être prises en compte avec un outil numérique assez simple. Les règles s'appliquant aux spectres de perméabilité nous permettent de détecter cette dispersion.

RÉFÉRENCES

- [1] 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**(13), 134412 (2009).
- [2] O. ACHER, A.-L. ADENOT, "Bounds on the dynamic properties of magnetic materials", *Phys. Rev. B*, **62**(17), p. 11324-11327 (2000).
- [3] O. ACHER, S. DUBOURG, "Generalization of Snoek's law to ferromagnetic films and composites", *Phys. Rev. B*, **77**(10), 104440 (2008).