Evolution de la perméabilité haute fréquence (jusqu'à 3GHz) de couches minces ferromagnétiques à base de cobalt en fonction de la contrainte

O. Acher, J.-L. Vermeulen, A. Lucas, Ph. Baclet, J. Kazandjoglou, J.-C. Peuzin

► To cite this version:

O. Acher, J.-L. Vermeulen, A. Lucas, Ph. Baclet, J. Kazandjoglou, et al.. Evolution de la perméabilité haute fréquence (jusqu'à 3GHz) de couches minces ferromagnétiques à base de cobalt en fonction de la contrainte. Journal de Physique IV Proceedings, 1992, 02 (C3), pp.C3-229-C3-233. 10.1051/jp4:1992334 . jpa-00251539

HAL Id: jpa-00251539

<https://hal.science/jpa-00251539>

Submitted on 1 Jan 1992

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Evolution de la perméabilité haute fréquence (jusqu'à 3GHz) de couches minces ferromagnétiques à base de cobalt en fonction de la contrainte

O. ACHER, J.-L. VERMEULEN, A. LUCAS, Ph. BACLET, J. KAZANDJOGLOU et J.-C. PEUZIN*

CEA-DAM, Centre d'Etude de Bruyères le Châtel, BP. 12, 91680 Bruyères le Châtel, France

*CEA, DTA/D.OPT, 85X, 38041 Grenoble cedex, France

We investigated the high frequency properties under tensile stress of various Co-based amorphous thin films deposited on thin mylar substrates. The permeability of the layers was measured along the stress direction, in a frequency range that allowed the observation of the rotational permeability and gyromagnetic resonance. The resonance linewidth is hardly affected by the stress. A simple model assuming that the easy axis is constant over the whole film predicts the evolution of the initial permeability and resonance frequency. This model is in good agreement with measurements on CoZrMoNi, and yields an estimation of the magnetostriction coefficient. In the case of CoNbZr, a poorer agreement is attributed to the local dispersion of magnetization direction.

L'augmentation de la bande passante des systèmes d'enregistrement nécessite l'étude des propriétés magnétiques à des fréquences toujours plus élevées. Pour les matériaux doux, ces propriétés sont largement influencées par les effets de magnétostriction [1]. Il existe de nombreuses techniques pour mesurer l'effet des contraintes sur les propriétés magnétiques statiques, mais on n'a pas encore à notre connaissance mesuré directement les effets des contraintes sur la perméabilité à des fréquences de l'ordre de plusieurs GHz. Des mesures de résonance ferromagnétique sous contraintes donnent des indications voisines [2], mais nécessitent l'application d'un champ magnétique qui sature l'échantillon. Or, l'évolution de la structure en domaine sous l'effet de la contrainte dans un échantillon peut influencer les propriétés magnétiques.

On a réalisé des mesures directes de la perméabilité jusqu'à 3GHz en fonction de la contrainte, sur des couches ferromagnétiques amorphes. On a utilisé des dépôts de ferromagnétiques sur film souple, ce qui permet d'obtenir des contraintes très élevées tout en mettant en oeuvre des forces raisonnables. On a accès directement à la fréquence de résonance gyromagnétique, qu'un modèle simple permet de relier à l'énergie d'anisotropie.

I Procédure expérimentale:

On a réalisé par pulvérisation magnétron des dépôts de $\text{Co}_{87}\text{Nb}_{11,5}\text{Zr}_{1,5}$ (at%) épais de $0,5\mu\text{m}$ sur des films de mylar épais de $12\mu\text{m}$, ainsi que de $\text{Co}_{79}\text{Zr}_{10}\text{Mo}_9\text{Ni}_2$ ($0,4\mu\text{m}$) sur mylar ($8\mu\text{m}$). Le champ magnétique du magnétron oriente localement le dépôt. L'hystérésigraphie Kerr nous permet de déterminer la direction des axes de facile et difficile aimantation. On s'est intéressé aussi à l'alliage $\text{Co}_{83,6}\text{Fe}_{6,1}\text{Si}_{1,3}\text{B}_9$ déposé sur film souple de polyéthylène par canon à ion [3]. On observe là encore que la direction de facile aimantation est assez homogène sur le substrat, et reproductible d'un dépôt à l'autre.

Pour mesurer la perméabilité hyperfréquence de ces dépôts, on utilise une technique basée sur la mesure de l'impédance d'une spire contenant le film souple. Cette méthode est décrite ailleurs [4]. Dans notre dispositif, la spire est composée d'un ruban conducteur large de 9mm, définissant une zone de mesure de $9\times 9\times 1\text{mm}^3$. La fréquence de résonance de cette spire vaut environ 10GHz, ce qui autorise des mesures de perméabilité jusqu'à 3GHz avec une bonne précision.

Dans les dépôts sur film souple, on a découpé des rubans larges de 9mm et longs d'environ 120mm. On a découpé des rubans dans la direction de facile aimantation, et d'autres dans la direction de difficile aimantation. Un dispositif utilisant un capteur de force permet d'exercer une tension connue dans la longueur du ruban alors qu'il est dans la spire.

On a déterminé le module d'Young du substrat de mylar et du ferromagnétique (cf tableau 1). Pour cela, on a enregistré la courbe de contrainte en fonction de la déformation pour un ruban de mylar seul, et un ruban de mylar recouvert de ferromagnétique. On constate que la valeur du module trouvée pour le CoNbZr est trois fois plus faible que celle relevée dans [5].

Tableau 1: Module d'Young des ferromagnétiques et du substrat mylar

Matériau	CoNbZr	CoZrMoNi	Mylar (8 μ m)	Mylar (12 μ m)
Module d'Young (GPa)	59	95	3,2	3,6

On a constaté que pour des tractions supérieures à 8 N (CoZrMoNi/mylar 8 μ m) ou à 10 N (CoNbZr/mylar 12 μ m), le comportement du ruban est dominé par la déformation plastique du mylar. Il apparaît des fissures dans le dépôt, larges de 5 à 50 μ m. Il semble que de telles fissures prennent naissance à des tensions inférieures (de l'ordre de 400 MPa), mais elles sont rendues bien visibles du fait de la déformation plastique du mylar. Leur nombre augmente avec la tension. Dans ce domaine de tension (qui correspond à des contraintes supérieures respectivement à 1,2 et 0,9 GPa), on gardera à l'esprit que les contraintes internes dans le film ne sont pas forcément homogènes, et que la détermination de la contrainte dans le ferromagnétique à partir de la tension sur le ruban est moins précise.

II Résultats Expérimentaux:

La figure 1 donne la perméabilité en fréquence du CoZrMoNi dans la direction de difficile aimantation pour différentes valeurs de la contrainte exercée dans cette même direction. On distingue deux résonances espacées de 300 à 400 MHz. Cela souligne l'intérêt de mesures directes de la perméabilité, puisqu'il n'est pas possible de décrire précisément ce matériau à l'aide des équations classiques de la résonance ferromagnétique [6]. La largeur à mi-hauteur diminue légèrement quand la contrainte augmente de 0 à 1,6 GPa.

Figure 1: Perméabilité d'un ruban de CoZrMoNi mesurée dans l'axe de difficile aimantation, pour des contraintes en tension exercée selon cet axe allant de 0 à 1400 MPa.

Lorsqu'on relâche la contrainte, après avoir exercé des tensions qui ont créé de nombreuses fissures dans le dépôt (10 par mm environ) et déformé le mylar de façon irréversible, on ne retrouve pas la première courbe de perméabilité à contrainte nulle. En l'absence de contraintes, la perméabilité de CoZrMoNi dans la direction de facile aimantation est nulle dans la gamme de fréquence étudiée. Il s'agit là d'un résultat attendu, car la contribution au gyromagnétisme d'un matériau localement aimanté dans la direction de mesure du μ est nulle. Par contre, pour des contraintes supérieures à 800MPa, on retrouve des niveaux de perméabilité initiale supérieurs à 160.

On a réalisé les mêmes expériences sur le dépôt de CoNbZr. La figure 2 reprend l'information sur l'évolution de la fréquence de résonance de la perméabilité initiale. Sur le ruban découpé dans l'axe de difficile aimantation, on constate que l'effet de la contrainte est plus important que dans le cas du CoZrMoNi. La largeur de la résonance est peu affectée par la contrainte. Après relaxation de la contrainte, on constate que la perméabilité revient à sa valeur initiale, indiquant qu'il n'y a pas eu transformation irréversible de l'échantillon. Sur le ruban de CoNbZr découpé dans la direction de difficile aimantation, la perméabilité est faible en l'absence de contraintes, mais non strictement nulle comme on pourrait s'y attendre.

Sur un ruban de CoFeSiB mesuré et étiré dans le sens de difficile aimantation, on constate que la perméabilité s'annule à toutes les fréquences pour une contrainte d'environ 400MPa.

III Discussion:

Dans le domaine de fréquence présenté, la perméabilité du matériau provient du gyromagnétisme. La perméabilité rotationnelle d'un échantillon homogène dont l'aimantation est dirigée dans une direction donnée est donnée par Bloembergen en fonction de l'aimantation à saturation B_s et du champ d'anisotropie H_k [6]. En particulier, pour un champ excitateur dans le plan de la couche et normal à l'aimantation, et pour un échantillon très aplati, la fréquence de résonance et la perméabilité initiale sont données par [5]:

$$Fr^2 = \gamma^2 B_s \mu_0 H_k = 2 \gamma^2 K_u \quad (1)$$

$$\mu'(\text{initial}) = B_s / (\mu_0 H_k) + 1 \quad (2)$$

K_u désignant l'énergie d'anisotropie. On a négligé la contribution de l'amortissement à la fréquence de résonance.

D'après la littérature[5], et compte tenu de la concentration en cobalt, l'induction à saturation B_s vaut 1,05T pour CoNbZr et 0,75T pour CoZrMoNi; $\gamma \approx 3.10^4 \text{ MHz} \cdot \text{T}^{-1}$ [5].

D'autre part, la contribution d'une contrainte σ à l'énergie d'anisotropie est [1],[7]:

$$K_u = K_{u0} - 3/2 \lambda_s \sigma \quad (3)$$

Si λ est positif, l'aimantation tend à s'orienter parallèlement à la contrainte. C'est le cas du CoFeSiB, dont on a vu disparaître la perméabilité rotationnelle dans la direction de traction pour une contrainte de 400MPa. Ce résultat est confirmé par une méthode de mesure directe de la magnétostriction à saturation, qui donne $\lambda_s \approx +7.10^{-6}$. Si λ est négatif, la contrainte tend à orienter l'aimantation dans une direction normale à la contrainte. C'est le cas sur les matériaux CoNbZr et CoZrMoNi.

Pour un matériau décrit par (1), (2) et (3) on prévoit donc que le carré de la fréquence de résonance ainsi que $B_s / [\mu_0 \mu'(\text{initial})]$ varient linéairement avec la contrainte lorsqu'on mesure la perméabilité dans la direction normale à l'aimantation.

La figure 2.a indique que pour le ruban de CoZrMoNi mesuré et étiré dans la direction de difficile aimantation, la variation de Fr^2 est assez linéaire jusqu'à 800MPa. La pente correspond à un coefficient de magnétostriction $\lambda = -0,6.10^{-6}$. Dans le même domaine de contrainte, on observe que la variation de $B_s / [\mu_0 \mu'(\text{initial})] \approx H_k$ est, elle aussi, assez linéaire, avec une pente correspondant à $\lambda = -0,4.10^{-6}$ (figure 2.b). Par contre, pour des contraintes plus élevées, les effets de magnétostriction sont plus importants. Il est possible que les fissures qui apparaissent dans le film délimitent des zones dont la forme allongée selon la largeur du film contribue à l'anisotropie dans cette direction. Il faut alors corriger (1) et (2) en tenant compte des coefficients démagnétisants [6]. Cependant, un calcul exact nécessiterait la prise en compte des interactions entre ces motifs, ainsi qu'une description précise de leur géométrie.

Figure 2: a) Variation du carré de la fréquence de résonance en fonction de la tension, sur des rubans de CoNbZr (carrés) et CoZrMoNi (losanges), la mesure et la traction étant effectuée dans la direction de difficile aimantation (traits pleins) ou de facile aimantation (traits fins).

b) Variation de $B_s/\mu'(\text{initial})$ en fonction de la tension, sur des rubans de CoNbZr et CoZrMoNi, la mesure et la traction étant effectuée dans la direction de difficile aimantation ou de facile aimantation.

Sur le ruban de CoZrMoNi mesuré et étiré dans la direction de facile aimantation, on parvient à retourner l'aimantation pour des contraintes élevées, supérieures à 1GPa.

Le coefficient de magnétostriction rapporté dans la littérature pour le CoNbZr riche en Niobium vaut environ $\lambda = -1,5.10^{-6}$ à -2.10^{-6} [5],[8]. La pente de la variation de Fr^2 observée sur l'échantillon étiré dans la direction de difficile aimantation (fig. 2.a) correspond selon (1) et (3) à un coefficient de magnétostriction allant de $-1,3.10^{-6}$ à -3.10^{-6} . Le comportement de $B_s/[\mu_o.\mu'(initial)]$ (fig. 2.b) correspond à un coefficient de magnétostriction de -1.10^{-6} à -3.10^{-6} . Les effets de magnétostriction ont donc bien l'ordre de grandeur et le signe prévu, les informations tirées de la fréquence de résonance et celle de la perméabilité initiale sont cohérentes entre elles. Cependant, il apparaît que l'énergie d'anisotropie ne varie pas de façon parfaitement linéaire avec la contrainte. Il ne s'agit pas d'effets irréversibles dus à une déformation plastique du mylar. Il est possible que ce comportement provienne de la dispersion angulaire locale des axes d'aimantations [9]. Dans ce cas, le comportement de l'échantillon pour des faibles contraintes est différent de celui d'un échantillon saturé, et le coefficient λ déduit des figures 2a et 2b est différent du coefficient de magnétostriction à saturation λ_s . Quand la contrainte augmente, il semble qu'elle fasse tendre l'échantillon vers le cas 'saturé' dans lequel les relations (1) à (3) s'appliquent. Dans le cas d'une dispersion inhomogène de l'aimantation, il est nécessaire d'adopter une approche du type 'milieux effectifs' pour rendre compte des propriétés moyennes [10]. Les résultats obtenus sur le ruban de CoNbZr mesuré dans la direction de facile aimantation suggèrent aussi la présence de fluctuations locales des axes d'aimantation dans le dépôt. En effet, il présente une perméabilité non nulle dans la direction de facile aimantation. Sous l'effet de la contrainte, la fréquence de résonance diminue comme on s'y attend, et la perméabilité initiale augmente. Cependant, on ne parvient pas à annuler le champ d'anisotropie. Pour des contraintes suffisamment élevées, on retourne l'aimantation dans la direction normale à la traction, et on observe bien une variation de Fr^2 et $B_s/[\mu_o.\mu'(initial)]$ avec la contrainte dont la pente est la même que pour l'échantillon mesuré et étiré dans l'axe de difficile aimantation.

Conclusion:

La mesure directe de la perméabilité hyperfréquence de couches minces magnétiques sous contrainte permet d'estimer selon un modèle simple le coefficient de magnétostriction pour des échantillons dont l'aimantation est bien orientée. La largeur de la résonance varie peu avec la contrainte. Dans le cas d'échantillons dont l'aimantation est dispersée dans le plan, ou lorsque les contraintes diminuent l'anisotropie, le comportement observé ne relève plus de ce modèle simple. De même, pour de très fortes contraintes et déformations, les fissures qui apparaissent dans le film peuvent rajouter une contribution au champ d'anisotropie.

Remerciements: nous remercions Ch. Boscher et G. Nouhaut qui ont travaillé à l'élaboration des dépôts, ainsi que O. Kadouch et G. Nozet pour la caractérisation mécanique des films.

- [1] K. Saito, IEEE Trans. Magn **26**, 2942 (1990)
- [2] R. Zuberek, H. Szymczak, D. Zymierska, G. Suran and M. Naili, J. Magn. Magn. Mater. **104-107**, 117 (1992), et références incluses
- [3] J.L. Vermeulen, O. Acher, Cl. Barbalat, Le Vide les Couches Minces, supplément au no 259, p.164 (1991)
- [4] J.C. Peuzin, J.G. Gay, Acte des journées d'études sur la caractérisation microonde des matériaux absorbants, Limoges 1991, p. 75
- [5] A. Materne, Thèse de l'université de Grenoble (1987)
- [6] N. Bloembergen, Phys. Rev. **78**, 572 (1950)
- [7] O.V. Nielsen, IEEE Trans. Magn **MAG-21**, 2008 (1985)
- [8] H.J. de Wit, C. Witmer and F.W.A Dirne, IEEE Tans. Magn, **MAG-23**, 2123 (1987)
- [9] Y. Shimada, IEEE Trans. Magn., **MAG-22**, 89 (1986)
- [10] H. Hoffmann, G. Heller and K.H. Kammerer, IEEE Trans. Magn., **MAG-23**, 2731 (1987) et références incluses