

## FILTRE COUPE BANDE RECONFIGURABLE ET ATTENUATEUR VARIABLE UTILISANT LA RESONANCE FERROMAGNETIQUE

Tobias KORN<sup>1</sup>, Marta KERÉKES<sup>2(t)</sup>, Jean Philippe MICHEL<sup>2</sup>, Ursula EBELS<sup>2</sup>, Christophe HOARAU<sup>3</sup>,  
Jean Daniel ARNOULD<sup>3</sup>, Philippe FERRARI<sup>3</sup>, Pascal XAVIER<sup>3</sup>

<sup>1</sup>University of Regensburg, 93040 Regensburg, Allemagne – tobias.korn@physik.uni-regensburg.de

<sup>2</sup>URA 2512 SPINTEC, CEA-CNRS, Bat 1005, 17 Av des Martyrs, 38054 Grenoble – ursula.ebels@cea.fr

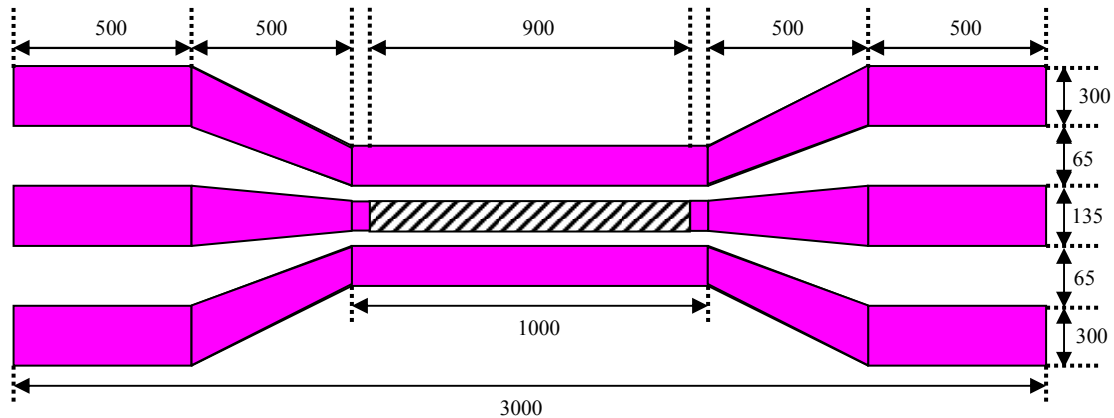
<sup>3</sup>IMEP-LAHC, UMR5130, CNRS-INPG-UJF-U.Savoie, Minatec, 3 Parvis Louis Néel, BP 257,  
38016 Grenoble Cedex 1 – [xavier@minatec.inpg.fr](mailto:xavier@minatec.inpg.fr)

### 1. INTRODUCTION

Les dispositifs RF reconfigurables (filtres, déphaseurs, atténuateurs...) font actuellement l'objet d'attentions particulières du fait du développement continu des systèmes de télécommunications multi-bandes. Dans ce domaine, des microstructures ferromagnétiques couplées inductivement à des lignes de transmission ont été proposées pour des applications de filtrage RF [1]. Du fait de leur grande aimantation à saturation, elles sont mieux adaptées pour un fonctionnement au GHz que les ferrites [2]. De plus, il est aisé d'en fabriquer en utilisant des procédures standard de pulvérisation de l'industrie des semi-conducteurs [3]. Récemment, de nouveaux concepts de filtres coupe-bande ont été proposés [4-6] utilisant notamment un champ magnétique externe pour ajuster sur une large gamme la fréquence centrale. Nous nous proposons ici de concevoir un nouveau type d'atténuateur variable et/ou de filtre coupe bande reconfigurable utilisant un élément absorbant ferromagnétique microstructuré.

### 2. DISPOSITIF : MODELISATION ET FABRICATION

Le dispositif consiste en un fin ruban ferromagnétique de Permalloy (Py, Fe<sub>20</sub>Ni<sub>80</sub>) d'épaisseur 100 nm couplé inductivement à une ligne coplanaire métallique située en-dessous (figure 1). La ligne coplanaire est fabriquée avec 250nm de cuivre et 25 nm de tantale déposés sur un substrat de silicium haute résistivité.



*Figure 1 : dispositif coplanaire vu de dessus (les zones grisées sont en cuivre, la zone hachurée est en Permalloy) ; toutes les dimensions sont en μm*

On rappelle que les matériaux ferromagnétiques se partagent en petits domaines à l'intérieur desquels tous les atomes ont une aimantation parallèle. Ces domaines tendent à s'aligner dans la direction d'un champ magnétique extérieur, ce qui confère au matériau une forte perméabilité  $\mu$ . L'aimantation magnétique dans un matériau ferromagnétique est décrite par la résolution de l'équation différentielle de LLG (Landau-Lifshitz Gilbert) :

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma\vec{M} \times (\vec{H}_{\text{eff}} + \vec{h}_{\text{RF}}) + \frac{\alpha}{M_S} \vec{M} \times \frac{d\vec{M}}{dt}$$

Le premier terme est un terme de précession et le second un terme de relaxation ( $\alpha$  est un facteur d'amortissement phénoménologique).  $H_{\text{eff}}$  contient les contributions des champs démagnétisants et d'anisotropie et  $h_{\text{RF}}$  est champ magnétique externe appliqué.  $M_s$  est l'aimantation à saturation du matériau et  $\gamma$  est le rapport gyromagnétique c'est à dire le rapport entre le moment cinétique et le moment magnétique.

La linéarisation de cette équation pour des petites variations de champ conduit à extraire une pulsation de résonance ferromagnétique  $\omega_r$  qui dépend de  $H_{\text{eff}}$ , de  $M_s$  et de  $\gamma$  (formule de Kittel).

A la résonance ferromagnétique, le ruban de Py va donc absorber la puissance micro-onde véhiculée par la structure guidante. La valeur de la fréquence de résonance (à champ magnétique appliqué nul) pourra être ajustée en jouant sur l'anisotropie de forme du ruban de Py. Si un courant continu parcourt la ligne coplanaire, il induira localement un champ magnétique dans le plan de difficile aimantation. Ce champ modifiera alors la position angulaire d'équilibre de l'aimantation du ruban de Py et ainsi diminuera la fréquence de résonance.

A l'aide du logiciel HFSS, nous avons modélisé la structure (demi coupe de la figure 3) en utilisant les caractéristiques du Permalloy représentées figure 2 [7-8].

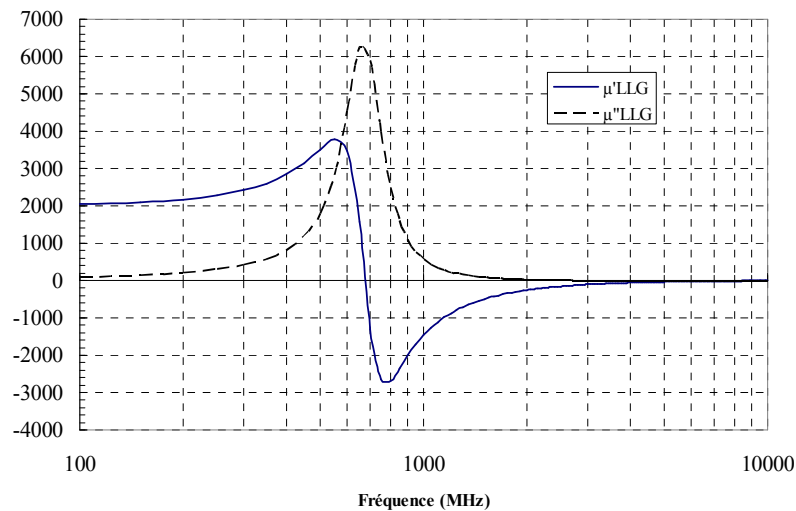


Figure 2 : parties réelle et imaginaire de la perméabilité du Permalloy extraites d'un modèle LLG

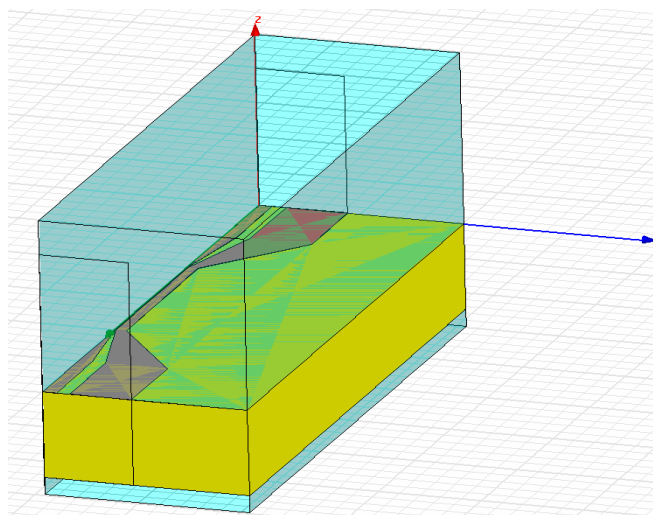


Figure 3 : structure modélisée sous HFSS

Le paramètre  $S_{21}$  obtenu par simulation, sans courant de polarisation ajouté, confirme le comportement attendu (figure 4) avec une atténuation de l'ordre de 1,8 dB aux environs de 6 GHz.

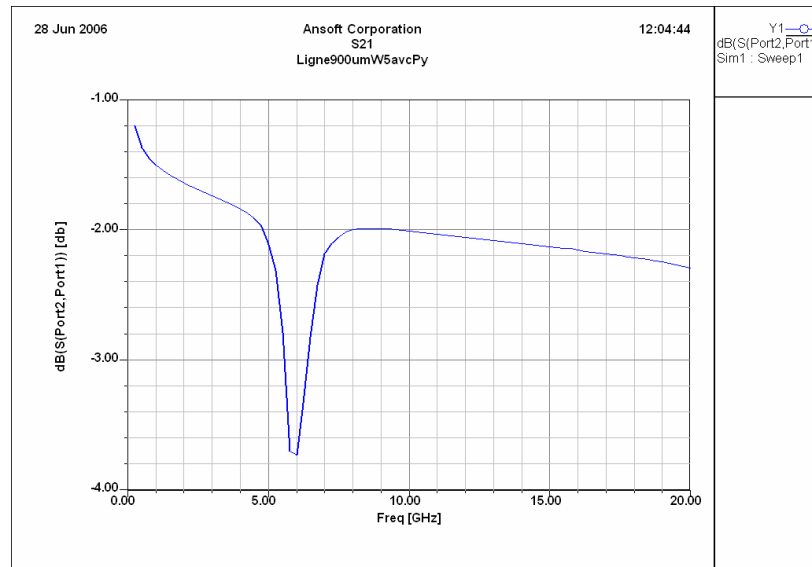


Figure 4 : paramètre  $S_{21}$  obtenu avec HFSS pour un ruban de largeur  $14 \mu\text{m}$

### 3. MESURES

Par une technique de mesure différentielle [9-12], nous avons déterminé les paramètres S sur des dispositifs de largeur de ruban variable. Les structures présentent une absorption (prévue par la théorie et la simulation HFSS) due à la résonance ferromagnétique allant jusqu'à 14 dB/cm en l'absence de champ magnétique appliqué.

Les écarts sur la fréquence d'absorption maximale mesurée et simulée (à courant de polarisation nul) et sur la valeur maximale de l'absorption (2,5 dB mesurés contre 3,7 dB simulés) sont importants et ne peuvent pas s'expliquer seulement par une différence de  $1 \mu\text{m}$  sur la largeur du ruban de Py. Il se peut que notre Py déposé n'ait pas exactement les mêmes propriétés que celles que nous avons tabulées dans HFSS. Nous n'avons pas mesuré la permittivité de notre Py car notre étude est exploratoire et les résultats qualitatifs fournis par la simulation HFSS nous conviennent dans ce cadre.

Nous avons par ailleurs noté que la fréquence de résonance est fortement liée à la largeur du ruban de Py et qu'elle peut être déplacée d'environ 500 MHz en utilisant un courant continu mélangé au signal RF (figure 5).

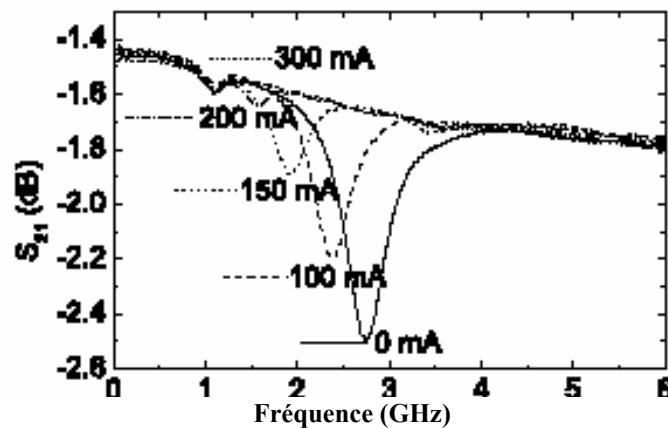


Figure 5 : transmission mesurée pour différents courants avec un ruban de largeur  $15 \mu\text{m}$

Par conséquent, à fréquence fixe  $f_0$ , on peut utiliser un tel dispositif pour réaliser un atténuateur commandé en courant en éloignant ou en rapprochant la valeur de la fréquence de résonance de  $f_0$ . Pour des courants plus élevés, il est possible de supprimer totalement l'absorption micro-onde (le couplage entre le ruban de Py et le champ externe étant réduit).

#### 4. PERSPECTIVES

Il est à noter qu'aucun champ magnétique externe n'est ici nécessaire, ce qui permet d'envisager de tels dispositifs dans des applications de télécommunications. Cependant, pour de telles applications, les pertes d'insertion et la consommation en courant devront être réduites. Cela serait possible si la couche métallique utilisée était plus épaisse et si l'on utilisait également une couche d'isolation de  $\text{SiO}_2$  entre le ruban ferromagnétique et le métal.

Afin d'améliorer encore l'absorption micro-onde par unité de longueur, il serait avantageux de choisir des matériaux ayant une aimantation à saturation  $M_S$  plus élevée tels que le fer pour lequel une absorption de 35 dB/cm a été mesurée dans des structures monolithiques [1]. De plus, en utilisant des matériaux à forte aimantation à saturation, la résonance ferromagnétique serait déplacée à des valeurs notablement plus élevées [13]. Afin de diminuer le courant nécessaire au contrôle de l'atténuation, la largeur du ruban ferromagnétique devra aussi être réduite. Ceci permettra également de réduire les effets de bords [14]. Enfin, nous pourrions également tenter de trouver une géométrie pour réduire la longueur totale du dispositif et donc les pertes d'insertion (lignes à saut d'impédance par exemple).

#### 5. REFERENCES

- [1] B. Kuanr, L. Malkinski, R.E. Camley, Z. Celinski et P. Kabos, *J. Appl. Phys.* **93(10)**, 8591 (2003)
- [2] C.P. Wen, *IEEE trans. microwave theory and techn.*, **MTT-17**, 1087 (1969)
- [3] S. Capraro, T. Boudiar, T. Rouiller, J.P. Chatelon, B. Bayard, M. Le Berre, B. Payet-Gervy, M.F. Blanc-Mignon et J.J. Rousseau, *Microwave and optical techn. letters* **42**, 470 (2004)
- [4] B. Kuanr, Z. Celinski et R.E. Camley, *Appl. Phys. Lett.* **83(19)**, 3969 (2003)
- [5] I. Huynen, G. Goglio, D. Vanhoenacker et A. Vander Vorst, *IEEE Microwave And Guided Wave Letters* **9(10)**, 401 (1999)
- [6] B. Kuanr, R.E. Camley et Z. Celinski, *IEEE Trans. Mag.* **40(4)**, 2841 (2004)
- [7] N.C. Tien, E.C. Kan, P. Wang et W. Ni, *J. Appl. Phys.* **95(11)**, 7034 (2004)
- [8] P.M. Jacquarta et L. Roux, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **281**, 82(2004)
- [9] S. Kaka, J.P. Nibarger, S.E. Russek, N.A. Stutzke et S.L. Burkett, *J. Appl. Phys.* **93(10)**, 7539 (2003)
- [10] M. Kerekes, A.D.C. Viegas, D. Stanescu, P. Xavier, G. Suran et U. Ebels, *J. Appl. Phys.* **95(11)**, 6616 (2004)
- [11] F. Giesen, J. Podbielski, T. Korn et D. Grundler, *J. Appl. Phys.* **97**, 10A712 (2005)
- [12] T. Korn, M. Kerekes, D. Stanescu, P. Xavier et U. Ebels, *IEEE trans. mag.* **41(10)**, 3514 (2005)
- [13] T. Korn, F. Giesen, J. Podbielski, D. Ravlic, C. Schueller et D. Grundler, *J. Magn. Magn. Mater.* **285**, 240 (2005)
- [14] B. Kuanr, I.R. Harward, D.L. Marvin, T. Fal, R.E. Camley, D.L. Mills et Z. Celinski, *IEEE trans. mag.* **41(10)**, 3538 (2005)