

Inductances planaires intégrées à couches magnétiques : Conception – Fabrication – Caractérisation - Modélisation

M.H. Bechir^{1,2}, D.D. Yaya^{1,2}, D. Allassem^{1,2}, M.K. Youssouf², S. Capraro¹, J.P. Chatelon¹, A. Siblini¹ and J.J. Rousseau¹

¹ Université de Lyon, F-42023, Saint Etienne, France; Université de Saint Etienne, Jean Monnet, F-42023, Saint Etienne, France; LT2C, F-42023, Saint Etienne

² Institut Universitaire des Sciences et Techniques – Abéché Tchad

RESUME – Cet article constitue une synthèse des travaux conduits depuis quelques années au laboratoire sur l'intégration de composants passifs à couches magnétiques fonctionnant jusqu'à plusieurs centaines de MHz. Dans cet article nous présentons l'ensemble des étapes permettant la conception, la fabrication, la caractérisation et la modélisation d'inductances planaires fabriqués de façon collective. Les derniers résultats obtenus sur la réalisation d'inductances à 2 couches de matériau magnétique et sur la modélisation de ces dispositifs sont également présentés.

MOTS-CLES – Inductances planaires intégrées, matériau magnétique, ferrite, fabrication, caractérisation, modélisation.

1. INTRODUCTION

La miniaturisation, l'intégration et la fabrication collective des composants passifs constituent un enjeu actuel majeur, en particulier pour les dispositifs embarqués afin d'en réduire volumes et coûts. Parmi les composants dits passifs, les composants magnétiques (inductances et transformateurs) font l'objet de plus en plus d'attention [1] [2] [3] [4] [5] [6]. En effet, ces composants dans leur technologie classique de fabrication occupent une surface importante et ne se prêtent pas à une intégration. Par ailleurs, les progrès dans les télécommunications exigent de nouveaux composants pouvant fonctionner à des fréquences de plus en plus élevées. Ainsi réduire l'espace occupé par l'inductance sur une puce, améliorer ses performances, limiter son rayonnement électromagnétique et utiliser des technologies de fabrication compatibles avec celles de la micro-électronique constituent des enjeux importants qui mobilisent de nombreux chercheurs. Actuellement, de nombreux travaux portent sur la réalisation d'inductances et de transformateurs intégrés pour des applications diverses comme le traitement du signal ou l'électronique de puissance [7] [8]. Le développement de tels composants nécessite de plus en plus l'utilisation de matériau magnétique en couches relativement épaisses et le développement de nouvelles techniques pour l'élaboration des couches magnétiques [9]. Pour des applications basses fréquences, on rencontre généralement des matériaux magnétiques conducteurs qui présentent une perméabilité élevée [10] [11]. Pour les plus hautes fréquences (jusqu'à

500MHz environ), soit on limite l'épaisseur des couches à quelques μm (à cause des pertes par courant de Foucault) soit on utilise des matériaux plus isolants comme les ferrites [12] [13] [14] ou parfois des matériaux composites [15].

Dans cet article nous présentons les principales étapes de conception, réalisation, caractérisation des inductances planaires à couches magnétiques. Notre approche consiste à utiliser des matériaux ferrites en couches épaisses ($50\mu\text{m}$ - $500\mu\text{m}$), ce qui permet de choisir un type de ferrite en fonction du domaine fréquentiel visé.

2. CONCEPTION - DESIGN

Le laboratoire a choisi HFSS pour l'étude et la conception des composants passifs RF et hyperfréquences. Le logiciel HFSS (High Frequency Structure Simulation) d'Ansys est un logiciel commercial qui calcule les champs électromagnétiques dans le domaine fréquentiel en résolvant localement les équations de Maxwell. Chaque matériau possède des caractéristiques spécifiques que l'utilisateur peut définir. Il est en outre possible de spécifier des lois de variation en fonction de la fréquence comme par exemple l'évolution de la perméabilité magnétique $\mu_{r(f)}$ en fonction de la fréquence ou la tangente de pertes $\tan\delta_{(f)}$ d'un matériau. Il permet de dessiner une structure en 2D ou 3D puis de calculer de nombreuses grandeurs (les constantes de propagation, les paramètres S ...) qui relient les ondes entrantes et sortantes, les paramètres admittances Y_{ij} et impédances Z_{ij} .

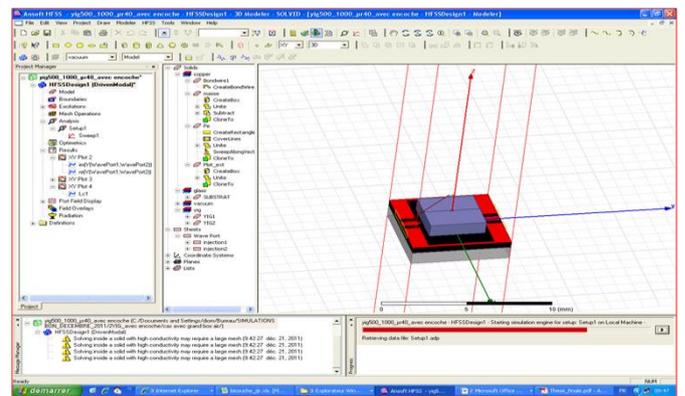


Figure 1 : Exemple de composant simulé sous HFSS v13.1

Les résultats sont obtenus sous forme de graphes ou de représentations dans l'espace. La Figure 1 présente un exemple de composant simulé sous HFSS.

L'exploitation de ces données permet de tracer l'évolution de la valeur de l'inductance (L), du facteur de qualité (Q) et de la résistance (R) en fonction de la fréquence.

Un des intérêts de HFSS est sa capacité à donner directement les paramètres S en fonction de la fréquence grâce aux divers modules appelés « executive command » dont les principales commandes sont : Module design, Module excitation, Module d'analyse, Module résultat et Module représentation du champ électromagnétique. Le principal inconvénient concerne le mode d'excitation des dispositifs en régime sinusoïdal de faible amplitude, ce qui ne correspond pas toujours aux conditions d'utilisation des composants magnétiques.

A titre d'exemple la figure 2 ci-après illustre une étude relative à l'influence de l'épaisseur du matériau magnétique sur la valeur d'une inductance obtenue par simulation. Ces valeurs sont obtenues sur un composant constitué de 7 spires (conducteur en cuivre d'une épaisseur de 5 μm , espacés d'une distance $D = 60\mu\text{m}$ et présentant une largeur $W = 125\mu\text{m}$). Les dimensions extérieures de la spirale sont voisines de 3mmx3mm.

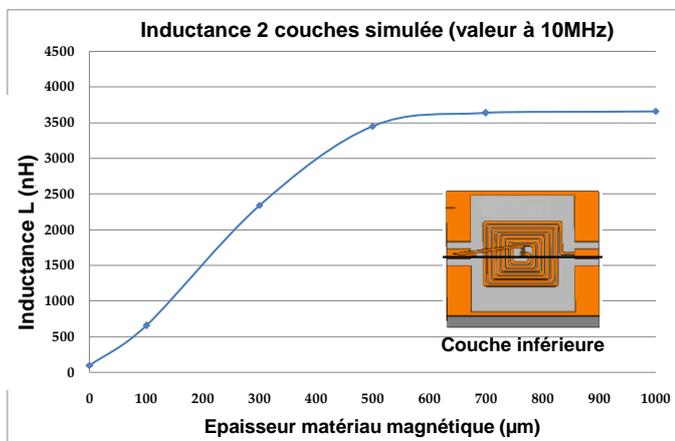


Figure 2 : Influence de l'épaisseur du matériau magnétique.

3 FABRICATION

Deux types d'inductances ont été fabriqués :

- Inductance une couche dont la réalisation est relativement facile mais qui permet de multiplier au plus par 2 la valeur de l'inductance.
- Inductance deux couches qui imposent de rapporter une couche supérieure mais qui permet de multiplier jusqu'à μ_r (perméabilité magnétique du matériau) la valeur de l'inductance.

3.1. Inductance une couche

La figure 3 présente les différentes étapes nécessaires à la réalisation d'une inductance à une couche de matériau magnétique à partir d'un substrat de ferrite commercial.

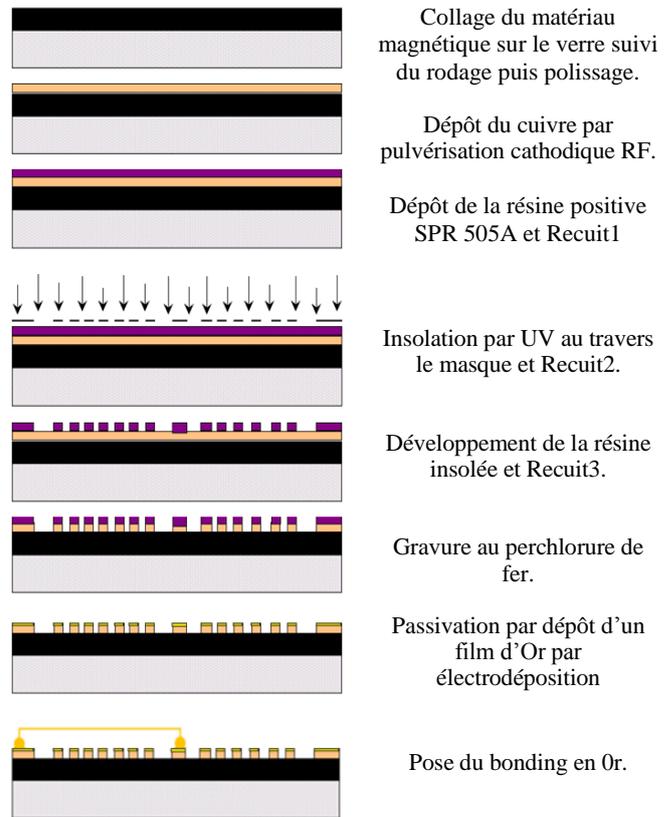


Figure 3 : Les différentes étapes pour la réalisation d'inductance à une couche de matériau magnétique.



Figure 4 : Inductance à une couche de matériau magnétique

3.2. Inductance deux couches

La couche supérieure est obtenue par report, elle doit recouvrir la totalité de la spirale et laisser libre les accès. Il est cependant inutile de recouvrir le plan de masse. Différentes solutions ont été étudiées pour rapporter la couche supérieure tout en assurant la connexion entre le plot central de l'inductance et les accès extérieurs. La figure 5 ci-après illustre les possibilités de réalisation par bonding : la couche supérieure est soit munie d'une " encoche " dans laquelle prend place le bonding (a) soit constituée de deux demi-couches (b). Pour les dispositifs réalisés, semblables à ceux de la figure 4, il a été montré [16] que l'influence de cet entrefer horizontal de la couche supérieure est faible si celui-ci reste inférieur à 300 μm .

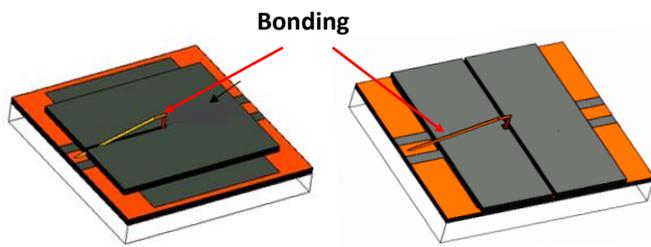


Figure 5 : Connexion par bonding

Une autre solution consiste à réaliser un air bridge en déposant une couche isolante sur la spirale. Cette solution, réalisée en salle blanche, est maintenant bien maîtrisée au laboratoire [17].

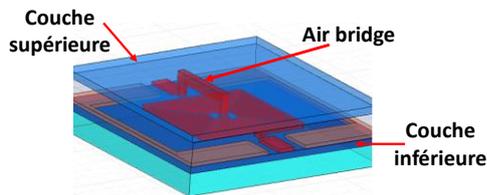


Figure 6 : Connexion par Air bridge

Compte-tenu des dimensions géométriques et de la fragilité de la couche pour les faibles épaisseurs utilisées, le report de la couche est effectué à l'aide d'un micromanipulateur (Figure 7) qui permet de prendre et de positionner avec précision les échantillons de ferrite (épaisseurs comprises entre 100 μm et 1000 μm). La couche inférieure (inductance une couche) est placée sur une table de micro-positionnement (X,Y,Z et θ). Le micro-positionneur est équipé en bout de bras d'un système de préhension (un électroaimant). Une loupe binoculaire permet à l'opérateur de positionner avec précision la couche supérieure sur la couche inférieure.

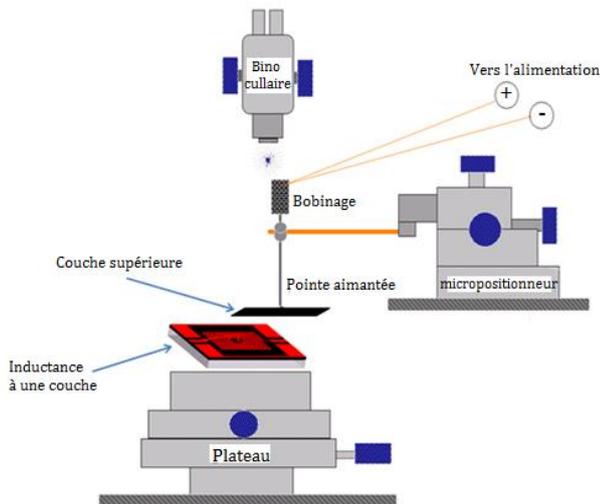


Figure 7 : Micro-manipulateur

4 CARACTERISATION ET MODELISATION

La caractérisation des dispositifs réalisés nécessitent d'une part des moyens de mesure adaptés et d'autre part un modèle

permettant de prendre en compte les principaux phénomènes physiques.

4.1. Caractérisation

Pour de faibles fréquences, inférieures à 1MHz, les inductances sont caractérisées à l'aide d'un banc de mesure composé d'un LCRmètre de type 4284A relié à un testeur sous pointes et d'une loupe binoculaire. Le testeur sous pointes est constitué de quatre micro-positionneurs munis chacun d'une pointe relié au LCRMètre par des câbles coaxiaux.

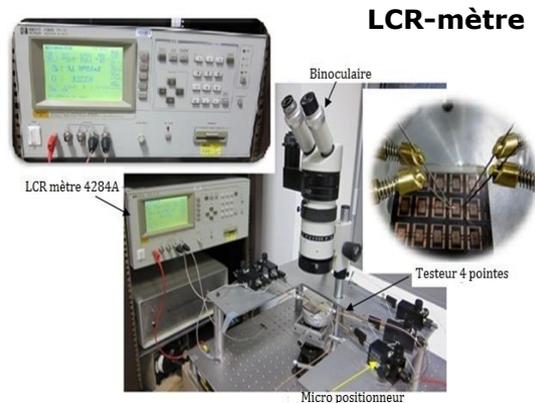


Figure 8 : Banc de caractérisation basse fréquence

Au-delà de cette fréquence, la caractérisation se fait à l'aide d'un analyseur vectoriel de réseaux. La figure 5 ci-après illustre le banc de mesure disponible au laboratoire LT2C pour mesurer l'amplitude et la phase des signaux en hyperfréquence. Le banc est composé d'un analyseur vectoriel de réseaux de type Agilent ZVA67 fonctionnant sur une gamme de fréquence comprise entre 10 MHz à 67 GHz et d'un testeur sous pointes muni d'une loupe binoculaire.

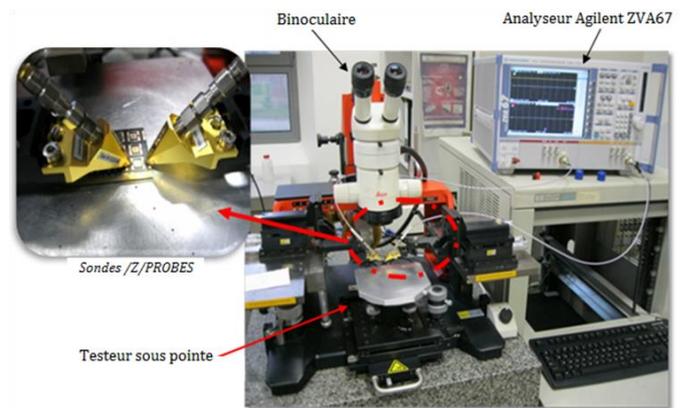


Figure 9 : Banc de caractérisation haute fréquence

4.2. Modélisation

Parmi les nombreux modèles rencontrés dans la littérature [18] [19] [20], très peu prennent en compte les caractéristiques du matériau magnétique. Ainsi, le modèle développé pour ces inductances planaires prend en compte les principaux phénomènes physiques [21] :

- l'évolution de la perméabilité en fonction de la fréquence
- la prise en compte des pertes dans le matériau magnétique (en fonction de la fréquence)
- les pertes dans les enroulements : pertes Joule en basse fréquence mais également les pertes par effet de peau et effet de proximité en haute fréquence.

Le modèle de la figure 10 précise le modèle retenu, les différents éléments du schéma équivalent sont fonction de la fréquence excepté les capacités C_{m1} , C_{m2} et C_S .

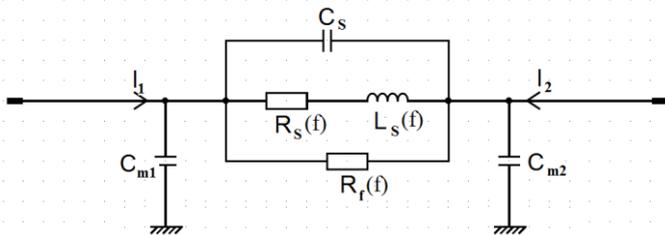


Figure 10 : Modèle d'une inductance planaire

L'inductance $L_{S(f)}$ fonction de la fréquence permet de prendre en compte l'évolution de la perméabilité en fonction de la fréquence.

La résistance $R_{S(f)}$ rend compte de l'ensemble des pertes dans les conducteurs.

La résistance $R_{F(f)}$ rend compte des pertes dans le matériau magnétique.

Les capacités C_{m1} , C_{m2} modélisent les couplages capacitifs entre le bobinage et le plan de masse tandis que C_S modélise les couplages entre spires.

Pour extraire les valeurs de ces éléments du modèle, un algorithme d'optimisation à partir de l'algorithme de Levenberg-Marquardt a été mis en œuvre.

5 RESULTATS

La figure 11 représente une inductance double couche, le matériau magnétique utilisé étant un ferrite doux, le YIG (Yttrium Iron Garnet).

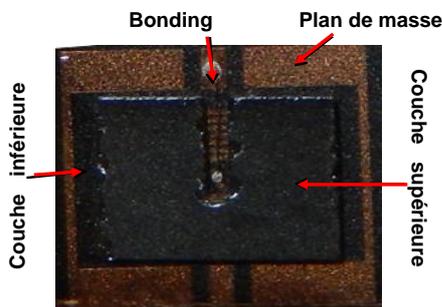


Figure 11 : Inductance deux couches

Ces composants ont été caractérisés en basse et haute fréquence avec les moyens précédemment décrits jusqu'à 500MHz. La figure 12 donne l'évolution de l'inductance L_S en fonction de la fréquence. On peut observer que la valeur de l'inductance est très élevée en basse fréquence 3300nH (soit environ 33 fois la valeur de l'inductance sans couche magnétique). Cette inductance décroît lorsque la fréquence

augmente avec une évolution qui suit bien la loi de variation de la perméabilité magnétique relative (μ_r) en fonction de la fréquence.

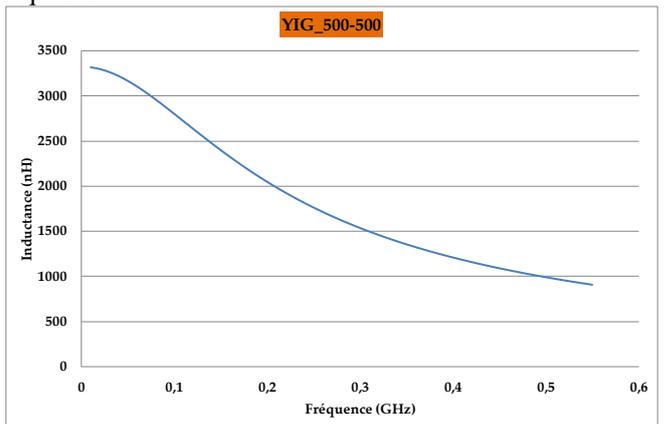


Figure 12 : Inductance L_S en fonction de la fréquence

Afin de valider le modèle nous avons recalculé les valeurs des paramètres Y_{ij} à partir des éléments $L_{S(f)}$, $R_{S(f)}$, $R_{F(f)}$, C_S , C_{m1} , C_{m2} , extraits à partir des mesures pour les comparer avec les paramètres Y_{ij} mesurés à l'analyseur vectoriel de réseaux.

Les courbes de la figure 13 représentent les confrontations des valeurs des paramètres Y_{ij} recalculés et mesurés. On remarque sur cette figure que l'allure des courbes des paramètres admittances Y_{ij} en fonction de la fréquence est bien restituée ainsi que l'amplitude des résonances, ce qui semble indiquer que les valeurs des éléments extraits sont correctes.

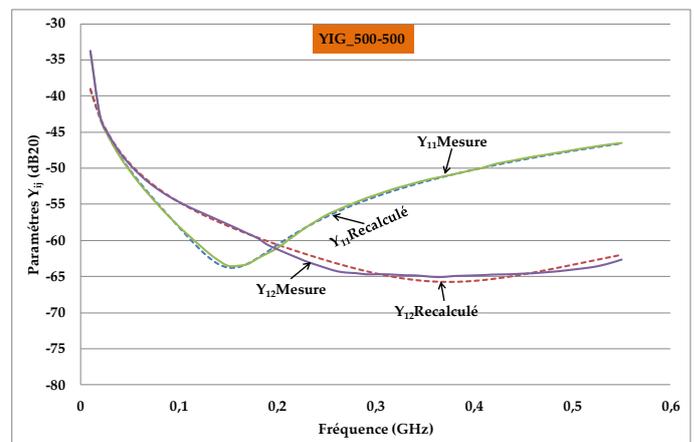


Figure 13 : Comparaison des paramètres Y_{ij} recalculés et mesurés (YIG_500-500)

6 PERSPECTIVES

Les perspectives de ces travaux sont nombreuses et variées :

⇒ Fonctionnement à haute température :

Les applications nécessitant des fonctionnements à haute température sont nombreuses, on peut citer par exemple les domaines de l'avionique, des transports Il est donc important que les composants passifs magnétiques puissent répondre aux exigences de ces applications. Les études, déjà en cours au laboratoire, sur le comportement de ces structures

à 200°C et au-delà devront être poursuivies. Un premier aspect de ce travail concerne l'adhérence des couches empilées (substrat, ferrite, conducteur, isolant ..). Le comportement de l'empilement de couches minces/épaisses possédant des coefficients de dilatation différents a été très peu étudié dans la littérature et nécessite des études plus fondamentales.

⇒ Modélisation et modélisation thermique :

Le modèle actuellement disponible au laboratoire donne des résultats satisfaisants en régime sinusoïdal dans une large gamme de fréquence. Néanmoins ce modèle est perfectible en particulier l'extraction des éléments du modèle utilisant l'algorithme de Levenberg-Marquardt peut être rendue plus performante en utilisant d'autres méthodes (algorithmes génétiques par exemple). D'autre part, il conviendra d'étendre la validité du modèle à des excitations non sinusoïdales et de grandes amplitudes et également à l'adapter au domaine temporel.

Enfin, l'augmentation des températures de fonctionnement de ces dispositifs nous impose de développer un modèle prenant en compte d'une part l'augmentation des températures ambiantes (loi de comportement des matériaux en fonction de la température) et d'autre part les dissipations thermiques dues aux pertes fer et Joule dans le composant.

⇒ Diminution des entrefers :

La diminution de la largeur de l'entrefer constitue un objectif important lorsque l'on souhaite augmenter la valeur de l'inductance et du coefficient de couplage (pour les transformateurs) voire indispensable dans le cas des applications de puissance pour lesquelles l'épaisseur des conducteurs se traduit par une augmentation peu acceptable de la largeur de l'entrefer. Deux pistes, nécessitant des collaborations fortes, pourront être étudiées :

- La diminution des entrefers peut être obtenue en enterrant le bobinage dans le ferrite. Pour ce faire la gravure du ferrite au laser femto-seconde, en cours d'étude avec le laboratoire Hubert Curien de l'Université Jean Monnet de Saint-Etienne, devra être approfondie.

- Une autre solution serait de rapporter un matériau magnétique (un polymère dopé à l'aide de particules magnétiques) entre les spires des bobinages. Cette seconde approche nécessite des collaborations multiples (chimistes polyméristes, spécialistes de l'élaboration et de la caractérisation des poudres ..)

⇒ Etude de la structure des bobinages :

Le développement de composants planaires de puissance (de l'ordre du Watt avec des courants de l'ordre de l'Ampère) requiert la réalisation de conducteurs de forte section. Cette contrainte s'impose également dans le cas de cahier des charges spécifiques (composant à faible résistance). Cependant, l'augmentation de la section des conducteurs peut se traduire par une forte augmentation des pertes en haute fréquence (effets de peau et de proximité) et nécessite des études spécifiques sur la constitution des bobinages afin d'une

part de quantifier ces pertes et également de proposer des solutions pour les réduire.

⇒ Etude des composants dans leur environnement :

Les composants planaires (inductances et transformateurs) développés au laboratoire sont, pour une large part, destinés à des applications relevant du domaine de l'électronique de puissance. Or les excitations rencontrées dans ce domaine ne sont plus sinusoïdales mais triangulaires, carrées ... avec parfois de fortes composantes continues. Il est donc indispensable de conduire des études adaptées à ce type d'excitations afin de mieux prendre en compte ces spécificités (influence de la composante continue, pertes avec des formes d'onde non sinusoïdales, réponse temporelle ..°). Des travaux sont également en cours au laboratoire.

⇒ Cem

Nous nous intéressons également à l'étude des perturbations rayonnées par les composants passifs en champ proche. Pour cela des comparaisons entre simulations mise en œuvre avec le logiciel HFSS et des mesures conduites par le laboratoire Irseem de Rouen sont en cours de développement. Ce travail devra se concrétiser par l'étude de solutions pour minimiser les champs rayonnés.

⇒ Transformateurs

Nos travaux concernent également la conception et la réalisation de transformateurs intégrés pour des applications dans le domaine de l'électronique de puissance (commande isolée d'interrupteur de puissance, transfert de puissance ...). La réalisation de ces dispositifs met en œuvre des technologies proche de celles utilisées pour les inductances. En revanche certaines spécificités tel que le couplage capacitif entre enroulements par exemple sont à prendre en compte et nécessitent des développements particuliers. Il en est de même des aspects modélisation [22].

7 CONCLUSIONS

L'objectif de cet article concernait nos travaux relatifs à l'étude, la conception, la réalisation et la caractérisation de composants planaires à couches magnétiques et plus particulièrement les inductances intégrées. Nous avons successivement présenté les différentes étapes de ces études : Design en utilisant un outil de simulation 3D, fabrication mettant en œuvre les micro-technologies, caractérisation et modélisation. Quelques résultats ont été montrés afin d'illustrer notre démarche. L'utilisation de substrats de ferrite commerciaux faibles coûts, permet de répondre à de très nombreuses applications s'étendant de quelques dizaines de kHz jusqu'à plusieurs centaines de MHz, la technologie mise en œuvre étant relativement indépendante du domaine fréquentiel. Pour terminer de nombreuses perspectives de ces travaux ont été explorées.

8 REFERENCES

- [1] Dong-Ming Fang, Xi-Ning Wang, Yong Zhou, Xiao-Lin Zhao, *Fabrication and performance of a micro machined 3-D solenoid inductor*, Microelectronics Journal 37 (2006) 948–951.
- [2] Ningning Wang, Terence O'Donnell, Saibal Roy, Paul McCloskey, Cian O'Mathuna, *Micro-inductors integrated on silicon for power supply on chip*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 316 (2007) e233-e237.
- [3] Mark.G.Allen, *Micromachined Intermediate and High Frequency Inductors*, IEEE International Symposium on Circuits and Systems, June 9-12, 1997, Hong Kong.
- [4] Masahiro Yamaguchi, Keiju Yamada, and Ki Hyeon Kim *„Slit Design Consideration on the Ferromagnetic RF Integrated Inductor*, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 42, NO. 10, OCTOBER 2006.
- [5] Satish Prabhakarana, Terence O'Donnellb, Charles R. Sullivana, Magali Brunetb, Saibal Royb, Cian O'Mathunab, *Microfabricated coupled inductors for integrated power converters*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 290-291 (2005) 1343-1346.
- [6] Stojanovic, G.; Maric, A.; Radosavljevic, G.; Laboure, E.; Smetana, W., "Performance analysis of LTCC transformers for application in DC/DC converters," Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2010 14th International , vol., no., pp.T2-174,T2-178, 6-8 Sept. 2010
- [7] Bastien ORLANDO, *Conception, réalisation et analyse de micro-inductances intégrées avec matériaux ferromagnétiques doux : applications aux inductances pour la conversion de puissance continue-continue et aux inductances variables MEMS pour circuits micro-ondes reconfigurables*, Thèse de l'Université de Limoges, 05 février 2007
- [8] P Artillan, M Brunet, D Bourrier, JP Laur, N. Mauran, L. Bary, M. Dilhan, B. Estibals, C. Alonso, J.L. Sanchez, *Integrated LC Filter on Silicon for DC-DC Converter Applications*, IEEE Transactions on Power Electronics, (Volume:26 , Issue: 8, August 2011)
- [9] Elias Haddad et al « *Modeling, Fabrication, and Characterization of Planar Inductors on YIG Substrates* » Author manuscript, published in "Advanced Materials Research 324 (2011) 294-297" DOI : 10.4028/www.scientific.net/AMR.324.294
- [10] GyoungBum Kim, Seung-Yong Cha, Eun-Kyung Hyun,YoungChai Jung, YoonSuk Choi, Jae-Sung Rieh, Seong-Rae Lee, and SungWoo Hwang, *Integrated planar spiral inductors with CoFe and NiFe ferromagnetic layer*, Microwave and optical technology letters/ vol.50, No.3, March 2008.
- [11] Sang Gi Kim, Hoon Soo Park, Jin Gun Koo, Jong Dae Kim, Tae Moon Rho, Yong Hyun Lee, Bo Woo Kim, Jin Yeong Kang, *Monolithic double rectangular spiral thin-film inductors implemented with NiFe magnetic cores for on-chip dc-dc converter applications*, Thin Solid Films 517 (2009) 4204-4206.
- [12] C. Yang, F. Liu, T. Ren, L. Liu, H. Feng , A.Z. Wang , H. Long , *Fully integrated ferrite-based inductors for RF ICs*, Sensors and Actuators A 130–131 (2006) 365–370.
- [13] P.Guzdek , J.Kulawik, K.Zaraska,A. Bienkowski ; *NiZnCu ferrite applied for LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramics) microinductor*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 322 (2010) 2897-2901.
- [14] X.L. Tang_, H.W. Zhang, H. Su, Y. Shi, X.D. Jiang, *High-frequency micro-inductor fabricated on NiCuZn ferrite substrates*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 293 (2005) 812-815.
- [15] Isao Kowase,Toshiro Sato, Kiyohito Yamasawa , Mamber , IEEE,and Yoshimasa Miura ,*Fellow, A planar Inductor using Mn-Zn Ferrite / Polyimide Composite Thick Film for Low -voltage and Large -current DC-DC Converter*, IEEE Transactions on Magnetism , vol.41. No.10, October 2005.
- [16] Yaya DAGAL DARI, *Conception, Réalisation et Caractérisation d'Inductances Planaires à Couches Magnétiques*, Thèse de l'Université Jean Monnet – 42023 Saint-Etienne, 21 mars 2013.
- [17] F. Kahlouche, K. Youssouf, M.H. Bechir, S. Capraro, A. Siblini, J. P. Chatelon, C. Buttay and J. J. Rousseau , "Fabrication and characterization of a planar interleaved micro-transformer with magnetic core ", Microelect Journal , à paraître, 2014
- [18] K. Kazimierczuk, G. Scineto, G. Grandi, U. Reggiani and A. Massarini, High-Frequency small-signal model of ferrite core inductors, IEEE Transactions on Magnetism, vol. 35, N° 5, september 1999.
- [19] Yuan-Chia Hsu and Meng-Lieh Sheu "Inductor Modeling of Integrated Passive Device for RF Applications"
- [20] Xavier Margueron, Jean-Pierre Keradec, Identifying the Magnetic Part of the Equivalent Circuit of n-Winding Transformer, IEEE IMTC 2005, Ottawa, pp 1064-1068.
- [21] Mahamat HASSAN BECHIR, *Modélisation des Inductances Planaires Intégrées*, Thèse de l'Université Jean Monnet – 42023 Saint-Etienne, 27 janvier 2014.
- [22] Khamis YOUSOUF KHAMIS, *Modélisation des transformateurs planaires intégrés*, Thèse de l'Université Jean Monnet – 42023 Saint-Etienne, 26 mars 2014.