

Transformateur planaire intégré à couches magnétiques : Conception et réalisation

Faouzi KAHLOUCHE, Khamis YOUSSEF KHAMIS, Stéphane CAPRARO, Jean-Pierre CHATELON et Jean Jacques ROUSSEAU*

Univ Lyon, UJM-Saint-Etienne, CNRS, LabHC UMR 5516, F-42023, SAINT-ETIENNE, France

*correspondant : rousseau@univ-st-etienne.fr

RESUME : Dans cet article nous présentons la conception, le dimensionnement et la fabrication de transformateurs intégrés à couches magnétiques. Le transformateur est constitué de deux inductances face à face séparées par un isolant. Le logiciel HFSS a été utilisé d'une part pour effectuer le choix de la structure et d'autre part pour dimensionner le composant. La réalisation de ce transformateur fait appel aux techniques de la microélectronique : préparation du substrat, dépôt de couches minces, photolithographie, gravure humide ... Les connexions entre le plot central et les bornes extérieures sont réalisées au moyen d'un via horizontal (air-bridge) dont on décrira les principales étapes de réalisation.

Mots-clés— Composants magnétiques – Transformateurs intégrés – Ferrite-

1. INTRODUCTION

L'intégration de composants magnétiques et en particulier de transformateurs constituent un enjeu important. Ces transformateurs sont destinés soit à la commande d'interrupteur de puissance (MOS par exemple) soit à la réalisation de convertisseur isolé de faible puissance (1W). Le cahier des charges des concepteurs de convertisseurs DC-DC impose une inductance élevée et une surface occupée la plus petite possible, les pertes constituant également un paramètre important. Dans ces conditions l'utilisation de matériau magnétique devient un élément important, essentiel dans la conception et la réalisation de ces transformateurs.

Dans la littérature on rencontre plusieurs topologies de transformateurs, les plus classiques étant l'entrelacée (Interleaved) [1] [2] et l'empilée (Stack) [3] [4]. D'autres structures existent cependant, en faisant une combinaison entre structures entrelacée et empilée (Stack-Interleaved) [5] ou encore des structures 3D [6] et en vis-à-vis (Face-To-Face) [7] [8].

La structure entrelacée (Fig. 1a) ne présente pas de difficulté de réalisation mais possède un coefficient de couplage limité ($k \sim 0.7$) et un fort couplage capacitif entre primaire et secondaire. Cette capacité constitue un

inconvenient majeur dans le cas de la commande de demi-pont, de bras d'onduleur ...

La structure empilée possède un bien meilleur coefficient de couplage, une surface occupée plus faible mais une plus grande difficulté de réalisation. En effet, les enroulements étant réalisés sur plusieurs niveaux de métallisation, la connexion entre les différents niveaux de métallisation réalisée à l'aide de via nécessite une attention particulière pour limiter les résistances parasites.

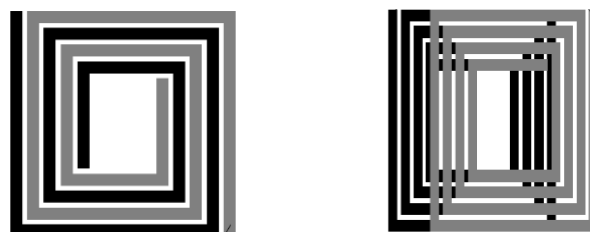
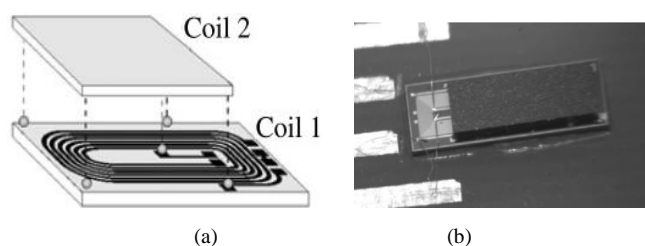


Figure 1 : (a) Structure entrelacée

(b) Structure empilée

La structure Face to Face permet d'obtenir un bon coefficient de couplage, une surface réduite au prix d'une plus grande complexité d'assemblage. Les deux enroulements peuvent être réalisés de façon séparée sur classiquement 1 ou 2 niveaux de métallisation, l'assemblage nécessitant des moyens technologiques adaptés (Flip-Chip par exemple). La figure 2 ci-après illustre ce type de structure, Afin d'éviter la réalisation de via, les auteurs ont dimensionné le secondaire plus petit que le primaire de façon à disposer des accès aux pads des bobinages.



(a) Schéma d'assemblage du transformateur

(b) Photographie du transformateur assemblé

Fig. 2 : Structure Face to Face [9] :

2. CONCEPTION - SIMULATION

La structure Face to Face a été retenue malgré la difficulté d'assemblage. Une étude en simulation utilisant le logiciel d'éléments finis 3D HFSS a été réalisée pour effectuer le dimensionnement. Le logiciel HFSS fournit les paramètres S de la structure étudiée mais également les paramètres impédances et admittances. De ces derniers, il est possible d'extraire les éléments du schéma équivalent du transformateur. Le schéma équivalent retenu dans cette application est donné Fig. 3. Il fait apparaître des éléments classiques basse fréquence :

- r_1 et r_2 représentent les résistances des bobinages primaire et secondaire
- l_1 et l_2 constituent les inductances de fuite des bobinages primaire et secondaire
- L_F et R_F correspondant à l'inductance magnétisante et les pertes magnétiques dans le ferrite, ainsi que les éléments capacitifs C_{12} , C_1 et C_2
- C_{12} représentant les couplages entre enroulements
- C_1 et C_2 les couplages entre chaque enroulement et le plan de masse.

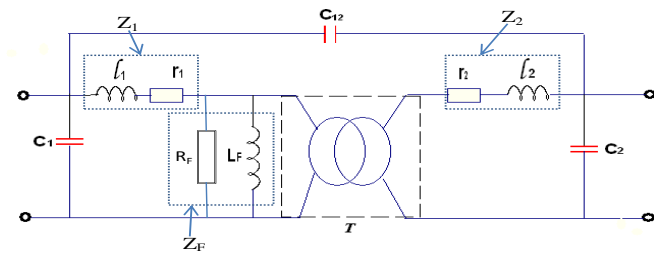


Fig. 3 : Schéma équivalent du transformateur

Ainsi, par simulation il est possible de déterminer les valeurs de l'ensemble des éléments du schéma équivalent et d'étudier l'influence des paramètres géométriques (épaisseur du matériau magnétique, épaisseur des conducteurs ...) et magnétique (perméabilité relative du matériau, tangente de pertes ...) sur ces valeurs.

A titre d'exemple, les figures 5 et 6 illustrent les résultats concernant la détermination de l'inductance magnétisante L_F . La figure 5 donne l'évolution de L_F en fonction de l'épaisseur d'isolant situé entre les bobinages primaire et secondaire (E_{isol}) tandis que la figure 6 illustre l'influence de la perméabilité μ_r du matériau magnétique sur cette même inductance. En simulation, le logiciel HFSS permet d'obtenir directement les paramètres admittances Y_{ij} et les paramètres impédances Z_{ij} . En considérant le schéma équivalent basse fréquence (Fig.4) du transformateur (les éléments capacitifs sont négligés), les paramètres Z_{ij} s'expriment de la façon suivante [10] :

$$\underline{Z}_{11} = r_1 + j\omega l_1 + Z_F \quad \underline{Z}_{12} = mZ_F$$

$$\underline{Z}_{21} = mZ_F \quad \underline{Z}_{22} = r_2 + j\omega l_2 + m^2 Z_F$$

Avec $Z_F = \frac{R_F * j\omega L_F}{R_F + j\omega L_F}$ et $m=1$ dans notre cas.

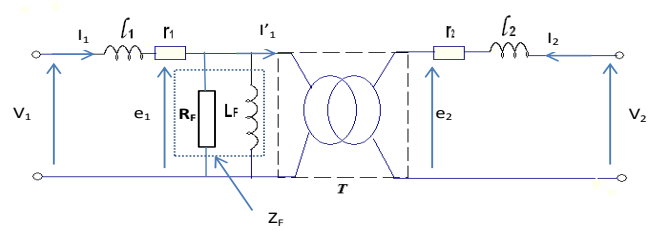


Fig. 4 : Schéma équivalent basse fréquence du transformateur

De ces expressions il devient possible de déterminer les expressions de L_F , l_1 , l_2 ...

$$L_F = \frac{|Z_F|^2}{\omega * J_m(Z_{21})}$$

$$l_1 = \frac{J_m(Z_{11}) - J_m(Z_{21})}{\omega}$$

$$l_2 = \frac{J_m(Z_{22}) - J_m(Z_{21})}{\omega}$$

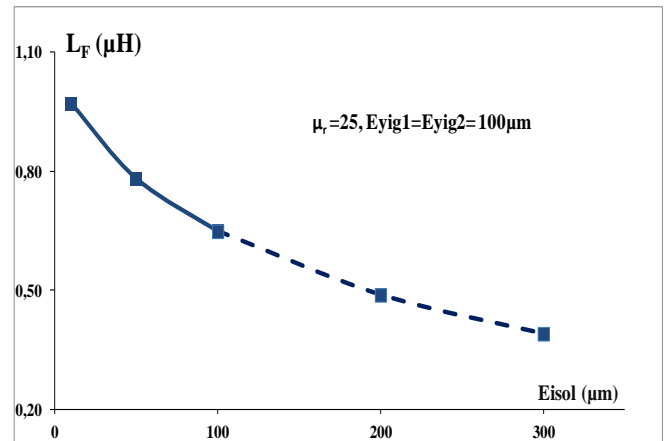


Fig. 5 : Influence de l'épaisseur de l'isolant sur l'inductance primaire

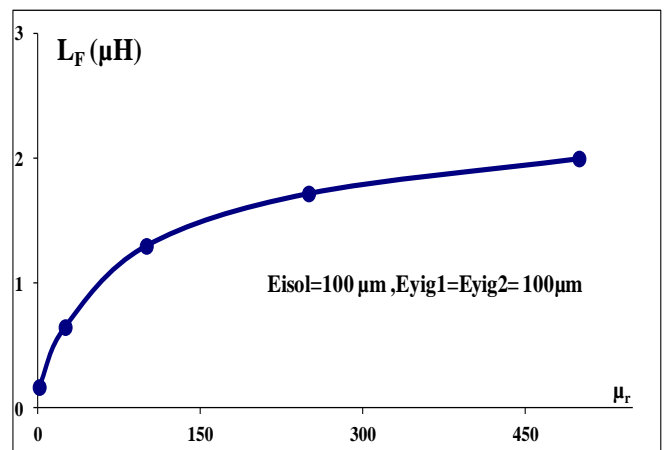


Fig. 6 : Influence de la perméabilité μ_r du matériau magnétique à 10 MHz.

3. REALISATION

La figure 7 illustre la constitution du transformateur Face to Face constitué par l'assemblage de 2 structures de conception semblables, séparées par un isolant.

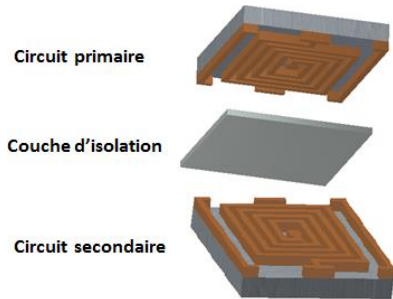


Fig. 7 : Constitution du transformateur Face to Face.

Les étapes de réalisation (Fig 8) des deux enroulements (primaire et secondaire) sont identiques :

- La première étape (Fig 8 a) concerne la préparation du substrat de ferrite qui est initialement collé sur un substrat assurant la tenue mécanique (et permettant de manipuler le dispositif pendant les différentes étapes de fabrication, ce substrat pouvant être éliminé par la suite) : puis l'on procède au robage et polissage pour obtenir épaisseur et état de surface souhaités.

- Une couche de cuivre est ensuite déposée sur le substrat (Fig 8 b) par pulvérisation cathodique. Il s'agit d'un dépôt « pleine plaque » dont l'épaisseur peut varier du μm à plusieurs dizaines de μm .

- Les étapes c-d-e de la Fig. 8 concernent la réalisation de la spirale en salle blanche (bobinage primaire ou secondaire) : dépôt de résine photosensible SPR505- premier recuit pour éliminer les solvants – insolation à l'aligneur de masque – second recuit – révélation – troisième recuit permettant de donner une bonne résistance mécanique à la résine, évitant ainsi les rayures .. - gravure au perchloreure de fer – dépôt d'une couche d'or par électrodéposition afin de prévenir toute oxydation du cuivre à l'air libre.

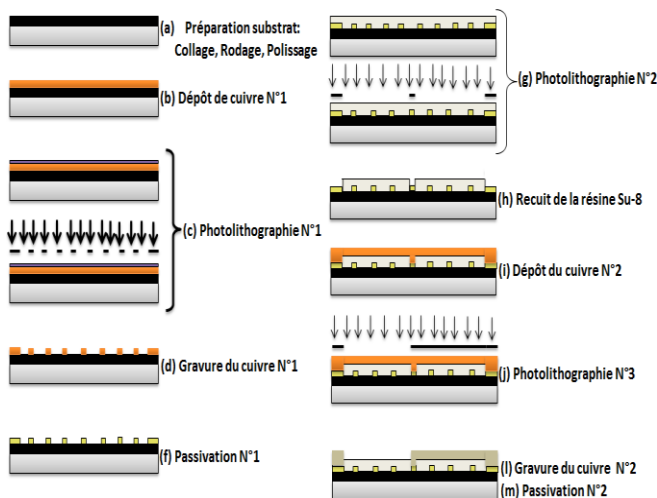


Fig. 8 : Les étapes de réalisation

- Les étapes suivantes sont relatives à la réalisation de la connexion entre le plot central et les bornes externes. La solution consistant à utiliser un fil de bonding n'est guère possible dans notre cas puisque la seconde partie du transformateur doit être rapportée sur la première et viendrait écraser le bonding. La solution retenue consiste à réaliser pour chacun des bobinages (primaire et secondaire) un air bridge ou via horizontal comme illustré Fig. 9

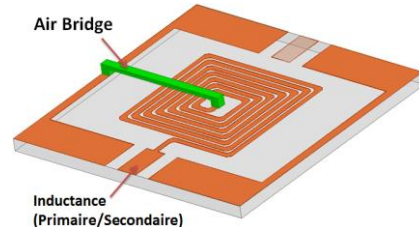


Fig. 9 : Air bridge

Il s'agit de réaliser la liaison entre le conducteur central et un plot extérieur (plan de masse ou autre) à l'aide d'un conducteur de cuivre de section voisine des conducteurs de la spirale, cet air-bridge étant bien évidemment isolé de la spirale [11].

La première étape de réalisation consiste à déposer une couche épaisse d'isolant (par exemple une résine photosensible type SU8 d'environ $10\mu\text{m}$ d'épaisseur).

La seconde étape consiste à réaliser par photolithographie les accès, c'est-à-dire à enlever la résine isolante aux endroits où l'on doit réaliser les connexions. Pour cette étape en salle blanche un masque spécifique doit être réalisé comme l'illustre la figure 10.

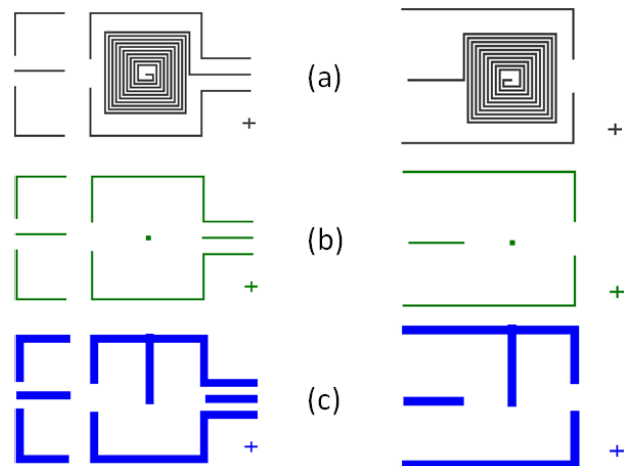


Fig. 10 : Masque de photolithographie du transformateur Face-To-Face pour la réalisation des accès et de l'air-bridge.

Le premier masque (a) correspond aux motifs précédemment réalisés (premier niveau de métallisation). Le second masque (b) sert à réaliser les ouvertures pour la réalisation du deuxième niveau de métal (air-bridge), ces ouvertures étant réalisées dans la couche de résine négative Su8.

La réalisation des accès utilise les étapes classiques de photolithographie : après le dépôt de la résine photosensible, on procède à un premier recuit puis à l'insolation à l'aide d'un aligneur de masque, cette étape étant un peu délicate compte-tenu des faibles contrastes entre la spirale inférieure et le masque (alignement entre les motifs réalisés avec le masque (a) et le masque (b)). Après recuit basse température et révélation, on réalise un recuit haute température (130°C) pour densifier la couche de résine SU8.

On procède ensuite au dépôt de cuivre (second niveau de métallisation) par pulvérisation cathodique. Le dépôt étant pleine plaque, il convient de réaliser une dernière étape de photolithographie puis gravure afin de ne laisser que les connexions nécessaires (air-bridge et plan de masse). Le troisième et dernier masque (c) est ainsi utilisé pour la réalisation de l'air-bridge afin de ramener les pads au deuxième niveau de métal.

La figure 11 donne un exemple de réalisation sur laquelle apparaissent clairement la spirale (7 spires dans cet exemple) et la liaison entre le plot central et le plot extérieur, le plan de masse entourant la spirale.

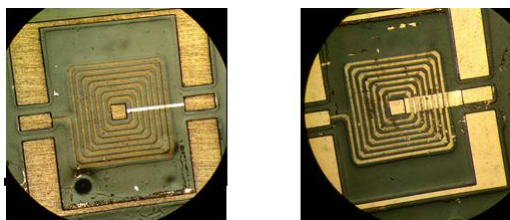


Fig. 10 : Exemple de réalisation de connexion par air-bridge

La dernière étape de réalisation concerne l'assemblage des 2 parties. Différentes techniques peuvent être utilisées :

- le Flip-chip, mais celui-ci introduit des entrefers indésirables entre primaire et secondaire. Il nécessite de plus des équipements spécifiques
- une seconde solution utilisant la technique de brasage a été mise en œuvre dans l'exemple présenté.

La figure 11 ci-après représente le transformateur Face to Face réalisé, on peut observer les accès aux enroulements primaire et secondaire, rapportés sur le même plan, permettant ainsi des connexions plus aisées.

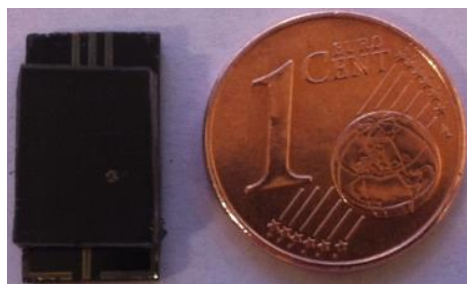


Fig. 121 : Le transformateur Face to Face assemblé

4. CONCLUSION

Les différentes étapes de la conception et de la réalisation d'un transformateur planaire à couches magnétiques ont été présentées et démontrent ainsi la faisabilité de tels composants pour des applications en particulier en électronique de puissance. Les étapes suivantes de ce travail consistent à caractériser le transformateur et à déterminer avec précision les principales valeurs des éléments du schéma équivalent (la détermination de la capacité C_{12} constituant une difficulté majeure).

Références

- [1] K. Shibata, K. Hatori, Y. Tokumitsu, et H. Komizo, « Microstrip Spiral Directional Coupler », *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 29, no 7, p. 680- 689,juill. 1981.
- [2] E. Frlan, S. Meszaros, M. Cuhaci, et J. S. Wight, « Computer aided design of square spiral transformers and inductors (MIC application) », in *Microwave Symposium Digest, 1989., IEEE MTT-S International, 1989*, p. 661 - 664 vol.2.
- [3] Y. Mayevskiy, « Analysis and Modeling of Monolithic On-Chip Transformers on Silicon Substrates », Thèse de Doctorat de l'Université Oregon, P-4, 2005.
- [4] A. Zolfaghari, A. Chan, et B. Razavi, « Stacked inductors and transformers in CMOS technology », *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 36, no 4, p. 620- 628, avr. 2001.
- [5] J. Yunas et B. Yeop Majlis, « Comparative study of stack interwinding microtransformers on silicon monolithic », *Microelectron. J.*, vol. 39, no 12, p. 1564- 1567, déc. 2008.
- [6] Y.-C. Liang, W. Zeng, P. H. Ong, Z. Gao, J. Cai, et N. Balasubramanian, « A concise process technology for 3-D suspended radio frequency micro-inductors on silicon substrate », *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 23, no 12, p. 700- 703, déc. 2002.
- [7] K. Yamasawa, « A DC-DC Converter Using a Microtransformer », *IEEE Transl. J. Magn. Jpn.*, vol. 9, no 4, p. 120- 126, juill. 1994.
- [8] Y. Yamamoto, A. Makino, T. Yamaguchi, et I. Sasada, « Fine grained ferrite for low profile transformer », *IEEE Trans. Magn.*, vol. 33, no 5, p. 3742- 3744, sept. 1997.
- [9] E. Martincic, E. Figueras, E. Cabruja, E. Dufour-Gergam, et M. Woytasik, « Magnetic micro-transformers realized with a flip-chip process », *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 14, no 9, p. S55, sept. 2004.
- [10] Faouzi KAHLOUCHE, Fabrication et Caractérisation de MicroTransformateurs Planaires à Couches Magnétiques, Thèse de doctorat, UJM SAINT-ÉTIENNE, 10 juin 2014.
- [11] F. Kahlouche, K. Youssouf, M.H. Bechir, S. Capraro, A. Sibli, J.P. Chatelon, C. Buttay, J.J. Rousseau, « Fabrication and characterization of a planar interleaved micro-transformer with magnetic core », *Microelectronics Journal* Volume 45, Issue 7, July 2014, Pages 893–897