



HAL
open science

Procédé de microfabrication de transformateurs intégrés

Maxime Semard, Christian Martin, Cyril Buttay, Charles Joubert

► **To cite this version:**

Maxime Semard, Christian Martin, Cyril Buttay, Charles Joubert. Procédé de microfabrication de transformateurs intégrés. Symposium de Génie Electrique (SGE'18), Université de Lorraine [UL], Jul 2018, Nancy, France. hal-01844983

HAL Id: hal-01844983

<https://hal.science/hal-01844983>

Submitted on 19 Jul 2018

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.

Procédé de microfabrication de transformateurs intégrés

Maxime SEMARD Christian MARTIN Cyril BUTTAY Charles JOUBERT

Université de Lyon

Ampère (CNRS UMR5005, École Centrale de Lyon, INSA Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1 F-69622, Villeurbanne, France)

RÉSUMÉ – Les convertisseurs de puissance voient leur fréquence de découpage augmenter dans l’objectif de miniaturiser les composants passifs. Les transformateurs de faible puissance sont utilisés pour l’isolation galvanique des alimentations drivers. Un procédé existant [3] permet la fabrication collective d’inductances sur substrat magnétique en réalisant un enroulement par électrodéposition. Il a été possible de l’améliorer en isolant électriquement le substrat magnétique d’une part et en réalisant deux enroulements distincts d’autre part pour réaliser une fonction transformateur.

Le transformateur présenté est conçu pour une puissance de 1 W et une plage de température de fonctionnement comprise entre -55°C et 200°C . L’empreinte de 5,24 mm par 8,68 mm et d’une épaisseur d’environ 1 mm (épaisseur du substrat magnétique).

Mots-clés – Transformateur, Composants, Technologie, Électronique de puissance

1. INTRODUCTION

Les convertisseurs de puissance nécessitent des transformateurs pouvant être utilisés pour l’isolation de l’alimentation de la commande des transistors et le transfert des informations. Par exemple, une structure en demi-pont, présente dans de nombreux convertisseurs, requiert des transformateurs de commande (pour permettre le transfert de l’information au transistor « haut »). Avec l’arrivée récente de matériau grand gap pour les transistors de puissances, ces derniers peuvent fonctionner avec des températures de jonction supérieures. En effet, certains transistors en carbure de silicium (SiC) ou en nitrure de gallium (GaN) peuvent fonctionner bien au-delà de 200°C [5] alors que la plupart des composants en matériau silicium sont limités à une température de 175°C ou moins. La montée en température des transistors permet aux convertisseurs de fonctionner en environnement sévère (aéronautique, transports, extraction gazière ou pétrolière...) [1]. Il est alors nécessaire d’être en capacité de concevoir et réaliser des transformateurs pouvant fonctionner dans les mêmes conditions.

De plus, la réduction du volume est aussi importante. Une voie d’optimisation est la réduction de l’empreinte du transformateur. Pour permettre la diminution de l’empreinte et du volume, des techniques issues de la microfabrication en partant du substrat magnétique. Par exemple, l’utilisation des procédés de dépôts (évaporation, pulvérisation) et l’utilisation de la photolithographie permet une plus grande résolution. Ces procédés offrent de nombreux avantages, afin de réaliser des structures plus fines et

la fabrication collective de transformateurs permet la fabrication de plusieurs transformateurs de manière simultanée.

Un procédé de microfabrication comparable a été précédemment mis en œuvre pour les inductances [3] sur substrat magnétique en grenat d’yttrium fer (YIG). Cependant la ferrite utilisée dans le travail exposé dans le présent article possède une conductivité électrique bien supérieure au YIG. La caractérisation du matériau magnétique a mis en avant une conductivité non négligeable de 0,38 S/m. Une couche assurant la fonction d’isolation électrique entre les enroulements et le substrat magnétique est donc nécessaire. Cette isolation est réalisée en utilisant une couche de dioxyde de silicium (SiO_2), un matériau couramment utilisé dans le cadre des procédés de microfabrication et qui offre de bonnes performances diélectriques (champ de claquage de quelques centaines de kilovolts) et une conductivité de 10^{15} S/m et est capable de fonctionner à des températures élevées.

La prochaine section traite du procédé de fabrication. La partie 3 détaillera les caractérisations des prototypes et la partie 4 présentera quelques défauts rencontrés avant de conclure.

2. MICROFABRICATION

Le procédé décrit ici s’appuie sur les travaux précédents [3][4][6] où les enroulements sont obtenus par électrodéposition. Le procédé initial a été amélioré en remplaçant le substrat en YIG avec un matériau magnétique plus adapté : un ferrite Mn-Zn auquel une couche d’isolation électrique (dioxyde de silicium ou SiO_2) pour améliorer l’isolation du transformateur et utilisant un deuxième élément magnétique pour refermer les lignes de champ magnétique.

2.1. Méthode d’isolation du substrat

Le procédé d’isolation se décompose en deux étapes distinctes : tout d’abord la préparation du substrat (découpe et polissage) et ensuite le dépôt d’un revêtement de SiO_2 .

Des morceaux de ferrite (référence PLT64/50/5 en 3F45 Ferroxcube) sont découpés en plaques fines d’une épaisseur d’environ 1 mm en utilisant une scie basse vitesse à disque diamant (Escil Labcut 150). Pour obtenir un état de surface acceptable pour le dépôt de dioxyde de silicium et enlever les stries résiduelles de la découpe, les substrats sont attachés à un support (utilisant la cire de montage Crystalbond 555) puis polis (Presi Mecatech 334), en commençant avec un papier grain P1200 suivi de gels à suspensions colloïdales avec des diamants de $9\ \mu\text{m}$ à

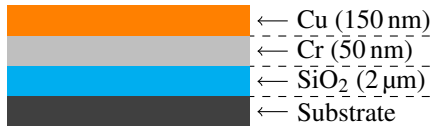


Fig. 1. Vue en coupe du substrat magnétique isolé (échelle arbitraire)

1 µm. Il en résulte une finition miroir.

Un nettoyage minutieux est ensuite réalisé afin d'enlever les résidus de nettoyage et les poussières de ferrite. Le nettoyage consiste en trois bains successifs d'eau déionisée portée à une température de 80 °C. L'échantillon est ensuite placé dans un cristallisateur d'acétone (permet d'enlever les résidus de nature organique) puis dans un cristallisateur d'éthanol (permet d'enlever d'éventuels résidus d'acétone), chaque étape dure deux minutes, ces cristallisateurs sont placés dans un bain à ultrasons dans lequel l'eau est chauffée.

Une couche de dioxyde de silicium d'une épaisseur de 2 µm est réalisée au moyen d'un dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma (PECVD) en utilisant un bâti Oxford PlasmaLab 80 Plus alimenté par un mélange hélium-silane et protoxyde d'azote comme précurseur.

2.2. Croissance des conducteurs

Malgré la puissance visée de l'ordre du watt, le transformateur requiert des enroulements épais (quelques dizaines de microns) pour obtenir une faible résistance. Une telle épaisseur s'obtient généralement s'appuyant sur l'électrodéposition.

Comme l'électrodéposition a besoin d'une surface conductrice, une fine couche d'amorce (chrome puis cuivre) est appliquée à la surface de la couche isolante. Elles sont réalisées par un dépôt physique en phase vapeur (PVD). Une couche de 50 nm est utilisée comme couche d'accroche et une couche de 150 nm de cuivre est utilisée comme couche conductrice. Précédemment, la couche d'accroche était réalisée en titane. Cependant la gravure du titane requiert une solution de gravure utilisant de l'acide fluorhydrique qui attaque pareillement la couche de dioxyde de silicium.

Une vue en coupe schématique du résultat obtenu est donnée figure 1.

La création du motif équivalent aux enroulements se fait par photolithographie. Un film sec photosensible (Dupont PM275, épaisseur de 75 µm) est laminé au-dessus de la couche d'accroche.

2.2.1. Laminage du film

Le film est laminé sur la couche d'accroche en utilisant un laminoir M300 (Bernier Electronick) dont la température des rouleaux est de 110 °C en utilisant les pression et vitesse d'avance minimales. Après laminage, le film est inspecté pour s'assurer de l'absence de pli puis découpé à la taille du substrat.

2.2.2. Photolithographie

La photolithographie est réalisée avec un aligneur de masque Quintel Q2001CT en utilisant des masques plastiques habituellement utilisés pour la réalisation de circuits intégrés (résolution de 12 000 dpi soit une précision de 25 ± 3 µm). La durée de l'exposition est de 5,6 s avec une lampe UV d'une longueur d'onde de 365 nm et d'une puissance de 150 W.

2.2.3. Développement

Conformément aux recommandations émises par le fabricant du film [2, p. 3], une solution à 1 % de carbonate de sodium (Na_2CO_3) chauffée à une température de 30 °C est utilisée. Le développement nécessite une pulvérisation conique à proximité du film durant 60 s.

2.2.4. Électrodéposition

L'anode (électrode en cuivre massif) et la cathode (substrat) sont plongés dans un bain électrolytique. Il s'agit d'une solution acide constituée de :

- 220 g/L de sulfate de cuivre ($\text{CuSO}_4\text{-H}_2\text{O}$),
- 32 mL/L d'acide sulfurique (H_2SO_4),
- 8 mL/L de Rubin T200-G,
- 2 mL/L de Rubin T200-A,
- 2 mL/L de Rubin T200-E,
- 0,2 mL/L d'acide chlorhydrique.

Les anodes sont reliées à une SMU (Source and Measure Unit) Keithley 2410 qui permet de délivrer de manière précise un courant constant. La polarisation électrique permet la formation d'ions métallique sur l'anode (électrode en cuivre massif) qui se dissolvent dans le bain d'électrodéposition puis migrent jusqu'à la cathode (substrat). La densité de courant est de 10 mA/cm² ce qui permet une vitesse de dépôt du cuivre de 12 µm/h.

2.2.5. Suppression des couches sacrificielles

La dernière étape consiste en la suppression des couches sacrificielles que sont le film photosensible et la couche d'amorce conductrice entre les enroulements pour empêcher les courts-circuits.

Conformément aux recommandations du fabricant [2, p. 3], le film photosensible est enlevé par une solution à 3% d'hydroxyde de sodium (NaOH) chauffée à 50 °C. Ensuite vient la gravure de la couche d'amorce constituée de la couche conductrice en cuivre et de la couche d'accroche en chrome. L'échantillon est placé dans un cristallisateur rempli d'une solution de gravure du cuivre (Transene APS-100) chauffée à 40 °C durant 30 s. Puis, l'échantillon est placé dans un cristallisateur rempli d'une solution de gravure du chrome (Transene chromium cerment etchant TFE) chauffée à 50 °C durant 30 s.

Enfin, pour prévenir toutes formes d'oxydations, un nettoyage approprié doit être réalisé.

- Rinçage à l'eau déionisée dans un cristallisateur (1 min),
- Rinçage sous le robinet d'eau déionisée (1 min),
- Rinçage dans un cristallisateur d'éthanol (3 min),
- Séchage à l'azote.

Un exemple de transformateur est donné figure 2.

2.3. Assemblage final

Le procédé de fabrication étant de nature collective, plusieurs transformateurs sont fabriqués de manière simultanée sur le même substrat magnétique. Les transformateurs sont ensuite découpés avec une scie à disque (DAD3220).

Dans certains cas, il est possible d'améliorer le couplage magnétique entre les enroulements primaire et secondaire du transformateur. Un capot (en matériau magnétique) est placé au-dessus des enroulements. Ce capot est lui aussi réalisé avec la scie à disque. Le capot est placé sur le transformateur et tenu en



Fig. 2. Transformateur réalisé
(Le transformateur a une largeur de 5,24 mm et une longueur de 8,68 mm.
L'enroulement extérieur est l'enroulement primaire et l'enroulement intérieur est l'enroulement secondaire.)

position avec le concours de ruban adhésif polyimide. Le ruban adhésif polyimide, par opposition à un collage du capot, évite l'introduction d'une distance supplémentaire entre le substrat magnétique et le capot, ce qui constituerait une augmentation entrefer dans le circuit magnétique et diminuerait alors le couplage.

Des interconnexions extérieures sont réalisés en utilisant la méthode de câblage par fil (*wire bonding*, diamètre 50 μm) comme l'illustre la figure 3 après que le transformateur ait été collé sur une platine conçue à cet effet.



Fig. 3. Transformateur monté sur PCB (ici, un transformateur entrelacé)

Les dimensions géométriques illustrées figure 4 du transformateur réalisé sont rappelées table 1.

3. CARACTÉRISATION

Un modèle inductif et un modèle capacitif sont obtenus suite à une caractérisation petit signal en utilisant une table sous pointes et un analyseur d'impédances Keysight 4294A.

Après compensation des éléments parasites, les impédances sont mesurées sur une plage de fréquence comprise entre 10 kHz et 110 MHz.

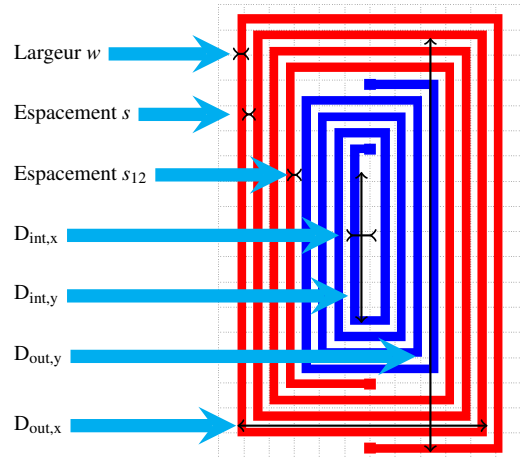


Fig. 4. Définition des paramètres du transformateur

Tableau 1. Propriétés du transformateur

Largeur des pistes	w	160	μm
Distance entre les pistes	s	160	μm
Distance entre les enroulements	s_{12}	160	μm
Épaisseur des conducteurs	t_{CU}	35	μm
Épaisseur du matériau magnétique	t_{MAG}	1	mm
Épaisseur du matériau isolant	t_{ISO}	2	μm
Diamètre interne	$D_{\text{INT,X}}$	440	μm
Diamètre interne	$D_{\text{INT,Y}}$	3240	μm
Diamètre externe	$D_{\text{INT,X}}$	5240	μm
Diamètre externe	$D_{\text{INT,Y}}$	8680	μm
Nombre de spires	N	4	

3.1. Modèle inductif

L'inductance propre d'un enroulement est obtenu en mesurant l'impédance d'un enroulement pendant que l'autre enroulement est laissée ouvert.

Les valeurs mesurées sont de 327 nH pour l'enroulement extérieur (en rouge sur la figure 4) et de 109 nH pour l'enroulement intérieur (en bleu sur la figure 4). Les valeurs obtenues lors des caractérisations sont confrontées avec les valeurs calculées analytiquement en s'appuyant sur les travaux de Mohan [7] et de Roshen et Turcotte [8]. L'ensemble des valeurs est contenu table 2.

3.2. Modèle capacitif

La valeur mesurée est de 88 pF pour la capacité d'isolation entre enroulements primaire (extérieur) et secondaire (intérieur). La valeur obtenue lors de la caractérisation est confrontée avec la valeur analytique calculée en s'appuyant sur l'hypothèse de la capacité plan. Les valeurs sont comparées table 2.

Tableau 2. Tableau récapitulatif des valeurs mesurées et analytiques

	Mesure		Analytique	
	Valeur		Valeur	Erreur
L_1 [nH]	327		338	3,3%
L_2 [nH]	109		107,8	1,1%
C_{PS} [pF]	88		79,6	9,6%

Lors de la caractérisation de la capacité d'isolation entre enroulements primaire et secondaire, il est apparu une faible valeur pour la partie réelle de l'impédance inter-enroulements signifiant

une faible isolation primaire-secondaire. L'objet de la prochaine section est de discuter des raisons derrière ce défaut.

4. DÉFAUT SIO₂

Une photographie issue d'un microscope électronique à balayage (MEB) est donnée figure 5. Côté gauche, l'image est issue du détecteur d'électrons rétrodiffusés (BSE) qui donne le contraste chimique (les atomes légers apparaissent en couleur sombre). Côté droit, l'image est issue du détecteur d'électrons secondaires qui donne des informations sur la topologie.

La surface est d'un aspect grumeleux alors que le substrat magnétique est poli miroir. Le dépôt de dioxyde de silicium est un dépôt conforme à la géométrie sur lequel il est déposé. Par conséquent, un aspect grumeleux est la preuve d'un dépôt défaillant. La présence de taches blanches à la surface traduit un phénomène de charge électrique dû à l'observation de différents matériaux. La présence de différents matériaux est confirmée par l'image issue du détecteur d'électrons rétrodiffusés qui met en avant que les taches blanches ne sont pas constitués par les mêmes éléments chimiques et qu'ils sont constitués d'atomes plus légers que ceux constituant le dioxyde de silicium.

Les défauts dans l'isolant sont appelés « *pinholes* ». Il est pris pour hypothèse que les « *pinholes* » constituent des fissures traversantes d'un diamètre de l'ordre de la dizaine de micromètres.

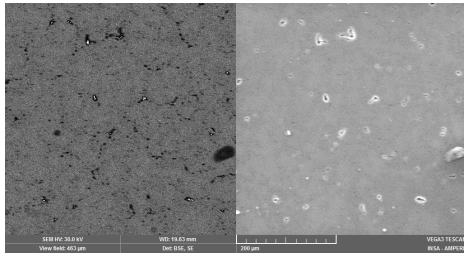


Fig. 5. Photographie MEB du substrat magnétique isolée par dioxyde de silicium

A l'occasion des conclusions et perspectives, il est proposée une méthodologie pour remédier aux défauts présents dans la couche isolante.

5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le procédé de dépôt de conducteurs est valide en présence d'une couche d'isolant sur le substrat. Par contre, l'isolation réalisée ne donne pas satisfaction.

Pour remédier à ce défaut d'isolation, il faut procéder à un diagnostic des défauts observés :

- en établissant une relation entre la taille et la densité des défauts et le type de substrat, sa contamination et sa rugosité. En particulier, il faudra comparer avec des couches réalisées sur un substrat en silicium qui est le substrat de référence en microtechnologie.
- en établissant une relation entre la taille et la densité des défauts et l'épaisseur de la couche. Il est possible que les défauts n'apparaissent qu'une fois atteint une épaisseur critique.

En fonction des constats établis, il peut être envisagé de :

- améliorer l'adhésion entre le substrat et la couche en :
 - procédant à un nettoyage (par exemple nettoyage de type RCA),
 - procédant à un décapage de la surface,

- cherchant s'il existe des promoteurs d'adhésion compatibles avec le procédé.
- améliorer le procédé de dépôt en lui-même, la température du substrat peut elle-même avoir un rôle majeur. De plus, un des axes de diminution du stress dans les couches qui est une cause probable des défauts est de procéder à un bombardement ionique pendant le dépôt. Pour ce faire, le bâti requiert une configuration spécifique permettant la polarisation du porte-échantillon.

- [1] Cyril BUTTAY, Dominique PLANSON, Bruno ALLARD, Dominique BERGOGNE, Pascal BEVILACQUA, Charles JOUBERT, Mihai LAZAR, Christian MARTIN, Hervé MOREL, Dominique TOURNIER et Christophe RAYNAUD : State of the art of high temperature power electronics. *Materials Science and Engineering : B*, 176(4):283–288, 2011. Microtechnology and Thermal Problems in Electronics.
- [2] Dupont. *DuPont Riston PlateMaster PM200 Series : Data Sheet and Processing Information*, juillet 2007.
- [3] Elias HADDAD : *Conception, réalisation, et caractérisation d'inductances intégrées haute fréquence*. Thèse de doctorat, Université de Lyon, décembre 2012.
- [4] C. MARTIN, B. ALLARD, D. TOURNIER, M. SOUEIDAN, J. J. ROUSSEAU, D. ALLESSEM, L. MENAGER, V. BLEY et J. Y. LEMBEYE : Planar inductors for high frequency dc-dc converters using microwave magnetic material. *In 2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pages 1890–1894, septembre 2009.
- [5] José MILLÁN, Philippe GODIGNON, Xavier PERPIÑA, Amador PÉREZ-TOMÁS et José REBOLLO : A Survey of Wide Bandgap Power Semiconductor Devices. *IEEE transactions on Power Electronics*, 29(5):2155–2163, mai 2014.
- [6] L. MÉNAGER, M. SOUEIDAN, B. ALLARD, V. BLEY et B. SCHLEGEL : A lab-scale alternative interconnection solution of semiconductor dice compatible with power modules 3-d integration. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 25(7):1667–1670, juillet 2010.
- [7] S.S. MOHAN : *The design, modeling and optimization of on-chip inductor and transformer circuits*. Thèse de doctorat, Stanford, décembre 1999. <http://www-smirc.stanford.edu/papers/Thesis-mohan.pdf>.
- [8] W. A. ROSHEN : Effect of finite thickness of magnetic substrate on planar inductors. *IEEE Transactions on Magnetics*, 26(1):270–275, janvier 1990.