



HAL
open science

Integration de bobines sur silicium pour la conversion d'énergie

Ghislain Troussier

► **To cite this version:**

Ghislain Troussier. Integration de bobines sur silicium pour la conversion d'énergie. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. INSA de Toulouse, 2004. Français. NNT : . tel-00009239

HAL Id: tel-00009239

<https://theses.hal.science/tel-00009239>

Submitted on 11 May 2005

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.

N° d'ordre:

THESE

Préparée au

Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS

En vue de l'obtention du grade de

Docteur de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse

Spécialité :

Conception des Circuits Microélectroniques et Microsystèmes

par

Ghislain TROUSSIER

INTEGRATION DE BOBINES SUR SILICIUM POUR LA CONVERSION D'ENERGIE

Soutenue le mardi 6 juillet 2004, devant le jury:

Rapporteurs: J.P. FERRIEUX
 L. MARTINEZ SALAMERO

Examineurs: D. LIGOT
 J.L. SANCHEZ
 E. SARRAUTE

Invités: B. COGITORE
 J.B. QUOIRIN

Directeur de thèse : J.P LAUR

Remerciements

Je tiens en premier lieu à remercier les directeurs successifs M. Jean-Claude LAPRIE et M. Malik GHALLAB de m'avoir ouvert les portes du Laboratoire d'Analyses et d'Architectures des Systèmes du C.N.R.S.

Ces remerciements s'adresse également aux responsables successifs de l'école doctorale G.E.E.T. M. Augustin MARTINEZ et M. Jacques GRAFFEUIL ainsi qu'à M. Alain CAZARRE, responsable du D.E.A. C.C.M.M., pour leur engagement dans la formation doctorale.

Je remercie également M. Georges CHARITAT[†] de m'avoir accueilli dans le groupe Composants et Intégration de Puissance dont il était responsable à l'époque et M. Jean-Louis SANCHEZ, son successeur, de m'avoir gardé et d'avoir bien voulu être co-encadrant de ma thèse. Cet encadrement m'a d'ailleurs autant apporté d'un point de vue scientifique qu'humain grâce à l'accessibilité et à l'humanisme dont fait preuve M. SANCHEZ.

Je remercie mon directeur de thèse, M. Jean-Pierre LAUR, pour m'avoir encadré, supporté et pour m'avoir beaucoup appris sur moi-même. Je remercie également M. LAUR de m'avoir permis de travailler dans de bonnes conditions malgré les pressions liées à la thèse.

Bien que je l'eusse déjà fait lors de mon rapport de DEA, je remercie encore une fois M. Hedi HAKIM, mon prédécesseur sur les micro-bobines, de sa gentillesse et d'avoir aussi bien défriché le sujet.

Pour leur bonne humeur, leur humour, leur gentillesse, leur disponibilité, leur motivation, leur dynamisme, leur vivacité d'esprit et la quantité de travail considérable qu'ils ont fourni pour ma thèse, je remercie particulièrement Mme Véronique CONEDERA, Mme Monique DILHAN, M. David BOURRIER, M. Ludovic SALVAGNAC et M. Bernard ROUSSET. Ces remerciements vont également à M. Norbert FABRE, responsable de l'équipe TEAM du LAAS, pour m'avoir ouvert la salle blanche et pour ses conseils éclairés. Et de façon plus générale toute l'équipe TEAM et les doctorants en microélectronique que j'ai pu croiser en salle blanche car leur bonne humeur m'a permis de travailler dans d'agréables conditions.

Je ne pouvais pas terminer les remerciements de l'équipe TEAM sans adresser un grand merci aux personnes de la centrale de masque, c'est-à-dire M. Christian SOLANO, M. Paul FADEL et M. Pierre-François CALMON que j'ai harcelé durant toute ma thèse et qui m'ont facilité la réalisation et réduit les délais de fabrication des masques malgré un carnet de commande toujours plein. Ainsi qu'à M. Christian BERTY qui va réaliser de multiples exemplaires de ce manuscrit.

Je tiens à remercier l'ensemble des permanents et les doctorants du groupe C.I.P. Melle Isabelle BERTRAND, M. Rodolphe DE MAGLIE, M. Christophe SALAMERO, M. Eric IMBERNON, M. David TREMOUILLES, M. Stéphane ALVES, M. Philippe LAINE etc... pour leur bonne humeur, pour les apéros et juste pour le fait que leurs présences suffisent à rendre l'ambiance agréable et propice à travailler dans de bonnes conditions ainsi qu'Isabelle NOLHIER pour sa gentillesse (et sa culture musicale) et son efficacité dans sa dure tâche de secrétaire.

Je remercie particulièrement Mme Daniela DRAGOMIRESCU-REYNA, qui a eu la malchance de partager son bureau avec moi, pour ses discussions intéressantes, sa gentillesse, son sourire quotidien et surtout son soutien. Soutien qui fût au-delà du domaine moral puisque Daniela est l'une des rares personnes m'ayant aidé à obtenir des enseignements. Dans un même registre et pour les mêmes raisons, je remercie également Mme Marie BREIL et M. Patrick TOUNSI.

Dans un registre plus personnel, je tiens également à remercier les personnes qui m'ont supporté au quotidien tout au long de ma thèse. Notamment Melle Sabine FOUMENT dont l'humour, l'intelligence et la gentillesse sont de véritables antidépresseurs au quotidien. Melle Emeline COCHETEAU qui m'a soutenu dans les moments difficiles de la vie et avec qui j'ai pu partager de très bons moments également. Melle Mathilde SIÉ qui est actrice à plein temps du film manichéen du bonheur de ma vie. Melle Stéphanie SANCHEZ qui, comme ne l'indique pas son T-Shirt Barbieturique Girl, n'est pas du tout une personne soporifique.

Pour les mêmes raisons, je remercie M. Maxime DUMONTEUIL, normal au début puis "cheveux courts" à la fin, dont l'humour extrême est exquis et dont les discussions sont toutes aussi intéressantes que celles de sa compagne. M. Nicolas GUITARD, l'homme le plus tranquille et efficace du monde qui a eu la joie et le privilège de partager mon bureau. À bien y réfléchir, c'est surtout moi qui ai eu de la chance. M. Christian CARAMEL, DJ officiel du LAAS/CNRS qui a participé à mon entretien physique. M. Olivier PERAT, qui aurait pu jouer dans le film "boire et déboires" et dont l'humour peut, sans prévenir, vous claquer un muscle abdominal. Et évidemment, M. Guillaume BONNET, l'homme de tous les instants et de toutes les complicités qui a participé aux meilleurs moments de ma vie toulousaine, 1m65 de joie de vivre quotidienne et je ne me lance pas dans l'énumération des qualificatifs et superlatifs que tous les gens qui l'ont côtoyé connaissent déjà.

Et tout les autres dont j'ai pu omettre de mentionner les noms dans la précipitation de l'écriture de ces remerciements mais dont je n'en pense pas moins évidemment et qui, je l'espère, m'excuseront.

**À Émilie,
À ma grand-mère,
À toute ma famille,
À tous mes amis.**

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	5
CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART SUR LES BOBINES INTEGREES ET TECHNIQUES ASSOCIEES..	9
1. INTRODUCTION	11
2. GENERALITES SUR LES BOBINES INTEGREES	11
2.1. <i>Les composants inductifs pour les télécommunications et l'instrumentation.....</i>	<i>11</i>
2.1.1 Télécommunications	11
2.1.2 Instrumentation.....	14
3. APPLICATION A LA PETITE PUISSANCE	15
3.1. <i>Réalisations en technologie hybride.....</i>	<i>15</i>
3.2. <i>Réalisations monolithiques</i>	<i>16</i>
3.2.1 Structure de type "spirale".....	17
3.2.2 Structure de type "toroïdale"	18
3.2.3 Structure de type "serpentin".....	19
4. MATERIAUX	21
4.1. <i>Matériaux conducteurs.....</i>	<i>22</i>
4.2. <i>Matériaux magnétiques.....</i>	<i>23</i>
4.3. <i>Matériaux isolants.....</i>	<i>25</i>
4.4. <i>Conclusion sur les matériaux.....</i>	<i>26</i>
5. PROCEDES DE FABRICATION – ÉLECTROCHIMIE.....	27
5.1. <i>Principe général de fabrication</i>	<i>27</i>
5.2. <i>Electrochimie [48]</i>	<i>27</i>
5.2.1 A l'équilibre (sans circulation de courant).....	28
5.2.2 Avec circulation d'un courant	29
5.2.3 Influence du transfert de masse	30
5.2.4 Evaluation de la quantité de matériau déposé.....	33
5.2.5 Passage de l'état hydraté à la structure métallique	34
5.2.6 Courant pulsé.....	35
5.2.7 Influence de différents paramètres sur le procédé d'électrochimie.....	36
5.3. <i>Couches d'accrochage</i>	<i>36</i>
5.4. <i>Mise en œuvre des résines (isolant et moules) [50]</i>	<i>37</i>
5.4.1 Résine positive	38
5.4.2 Résine négative :	38
5.5. <i>Étapes de fabrication relatives aux grandes familles de microbobine.....</i>	<i>39</i>
5.5.1 Bobine de type "spirale".....	40
5.5.2 Bobine "toroïdale"	40
5.5.3 Bobine "en serpentin".....	41
6. CONCLUSION	43
7. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	44

CHAPITRE II : LE MICROCONVERTISSEUR ET DIMENSIONNEMENT DE BOBINE..... 49

1.	INTRODUCTION	51
2.	BESOINS ET APPLICATIONS	51
3.	MICROCONVERTISSEUR	52
3.1.	<i>Cahier des charges d'un micro-convertisseur</i>	52
3.2.	<i>Calcul de la valeur d'inductance de la bobine</i>	53
3.3.	<i>Calcul de la valeur de capacité du condensateur</i>	54
4.	CHOIX DES MATERIAUX	55
5.	DIMENSIONNEMENT DE LA MICRO-BOBINE	56
5.1.	<i>Stockage de l'énergie magnétique</i>	57
5.2.	<i>Simulation 3D en magnétodynamique</i>	59
5.2.1	Simulation magnétodynamique à 100Hz :	59
5.2.2	Simulation magnétodynamique à 500kHz :	59
5.3.	<i>Feuilletage du circuit magnétique</i>	60
5.4.	<i>Simulation 3D en magnétodynamique du noyau feuilleté</i>	62
5.5.	<i>Conducteur</i>	63
6.	CONCLUSION	66
7.	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	67

CHAPITRE III : MISE EN ŒUVRE DES PROCÉDES TECHNOLOGIQUES POUR LA FABRICATION DE DEUX STRUCTURES DE BOBINES..... 69

1.	INTRODUCTION	71
2.	PRINCIPE GENERAL DE REALISATION	71
3.	MOYENS TECHNOLOGIQUES	72
3.1.	<i>Electrochimie</i>	72
3.1.1	Banc d'électrochimie	72
3.1.2	Bains pour l'électrochimie	74
3.2.	<i>Couches d'accrochage</i>	89
3.3.	<i>Résine photosensible SU-8</i>	91
4.	LES TOPOLOGIES.....	98
4.1.	<i>Structure "mixte"</i>	98
4.1.1	Présentation de la structure.....	98
4.1.2	Procédé technologique complet.....	102
4.1.3	Problèmes rencontrés et solutions proposées.....	103
4.2.	<i>Topologie "spirale"</i>	111
4.2.1	Présentation de la structure.....	111
4.2.2	Procédé technologique complet.....	112
4.2.3	Problèmes rencontrés et solutions proposées.....	114
5.	CONCLUSION	116
6.	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	117

CHAPITRE IV : CARACTERISATIONS ET RESULTATS	119
1. INTRODUCTION	121
2. CARACTERISATIONS DES MATERIAUX DEPOSES.	121
2.1. <i>Caractérisation magnétique</i>	121
2.1.1 Principe de mesure	122
2.1.2 Dispositifs de test	122
2.1.3 Résultats obtenus.....	126
2.2. <i>Caractérisations électriques</i>	130
2.2.1 Principe de mesure	130
2.2.2 Dispositifs réalisés.....	131
2.2.3 Résultats obtenus.....	133
3. STRUCTURES REALISEES	135
3.1. <i>Structure "mixte"</i>	135
3.1.1 Réalisation de prototypes	135
3.1.2 Caractérisation électrique d'un prototype	139
3.2. <i>Structure "spirale"</i>	140
4. CONCLUSION	142
CONCLUSION GENERALE	145
ANNEXES	149

Introduction générale

Le monde de l'électronique va dans le sens toujours croissant de la miniaturisation et de l'intégration. Dans le domaine de la Microelectronique, l'intégration des systèmes s'applique bien évidemment au marché des équipements électroniques portables et embarqués et plus particulièrement aux dispositifs de conversion de l'énergie électrique de très faible puissance. La nécessité de réaliser un maximum de fonctions sur une même puce de silicium nous pousse à nous préoccuper de l'intégration des composants passifs.

Les convertisseurs DC/DC devront s'adapter aux futures tensions d'alimentation des circuits intégrés qui, actuellement comprises entre 2.5 volts et 3 volts, seront inférieures à 2 volts en 2004 et à 1 volt en 2010. Pour ces niveaux de tensions et de puissance aux environs du watt, les valeurs d'inductances sont de l'ordre du microHenry à des fréquences de commutation comprises entre 500kHz et 1MHz.

Les composants inductifs comme les bobines ou les transformateurs sont des éléments-clés de l'électronique de puissance. Ce sont des composants bien connus et maîtrisés en ce qui concerne leur forme discrète, mais leur intégration reste encore au stade de l'étude et est encore loin de l'industrialisation. Le développement des micro-technologies offre aujourd'hui de nouvelles perspectives pour la fabrication de micro-bobines adaptées à ce type d'application.

Du fait de la limitation en surface et en volume, deux critères vont guider le dimensionnement des bobines intégrées. Le premier est la forme géométrique ou topologie de la structure, le second est lié à la nature des matériaux utilisés pour la fabrication des différentes parties du composant. Ces deux critères vont agir sur la valeur d'inductance, de l'énergie stockée, des pertes dans le noyau (dans le cas d'une bobine avec noyau) et dans le conducteur, sur le volume de la bobine ou encore sur les perturbations générées par le composant. Toutes ces caractéristiques sont liées et impliquent de faire des compromis en fonction des applications visées.

La première partie de la thèse est consacrée à une synthèse de ce que l'on rencontre dans la littérature scientifique sur l'intégration de bobines dans différents domaines de l'électronique de faible et fort signal. Nous abordons notamment les techniques de réalisation de ces dispositifs en détaillant les principes de base de la croissance électrolytique de matériau métallique dans des moules en résine.

À partir d'un cahier des charges donné, nous définissons ensuite les spécifications du micro-convertisseur qui constitue le point de départ pour le dimensionnement des composants

passifs et plus particulièrement de la micro-bobine. En tenant compte des caractéristiques électrique et magnétique des matériaux choisis, nous évaluons le volume du noyau magnétique, la longueur et la section du conducteur permettant de répondre aux spécifications du convertisseur en termes de stockage d'énergie magnétique et de pertes dans les matériaux. À l'aide de simulations, nous analysons les effets liés au fonctionnement à haute fréquence sur le noyau et le conducteur de la bobine et nous proposons des solutions afin de remédier à ces phénomènes indésirables.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les principes généraux de réalisation des micro-bobines et nous décrivons les moyens technologiques dont nous disposons ainsi que les mises au point spécifiques nécessaires à leur fabrication. Nous proposons ensuite deux structures de micro-bobines ainsi que leur procédé de fabrication. La première est la structure "mixte" dont la topologie novatrice diminue le nombre d'étapes de fabrication par rapport aux micro-bobines classiques que l'on rencontre dans la littérature scientifique. La seconde est la structure en "spirale" dont le conducteur en forme de spirale est pris en sandwich par un noyau magnétique feuilleté. Cette structure a été dimensionnée et simulée avec des outils spécifiques afin de répondre aux spécifications du micro-convertisseur.

La dernière partie du mémoire concerne les caractérisations des matériaux ainsi que les résultats technologiques auxquels nous sommes parvenus. À l'aide de dispositifs de test spécifiques, nous cherchons à évaluer les caractéristiques électriques et magnétiques des matériaux que nous déposons par électrochimie. Nous terminons par la présentation des premiers prototypes des topologies "mixte" et "spirale" que nous avons réalisées.

Les travaux de thèse présentés dans ce mémoire ont été réalisés dans le cadre du projet INDUCSIL labellisé par le Réseau Micro et NanoTechnologies. Ils ont été effectués en collaboration avec le L.E.G. (Laboratoire d'Électrotechnique de Grenoble) et le C.E.G.E.LY. (Centre de Génie Électrique de Lyon) et en partenariat avec les industriels MICROSPIRE et ST MICROELECTRONICS.

Chapitre I : État de l'art sur les bobines intégrées et techniques associées

1. Introduction

Du fait de la limitation en surface et en volume, deux paramètres sont fondamentaux dans le dimensionnement des bobines intégrées. Le premier est la forme géométrique ou topologie de la structure, le second est la nature des matériaux utilisés pour la fabrication des différentes parties du composant. Ces deux paramètres vont agir au niveau de la valeur d'inductance, l'énergie stockée, les pertes dans le noyau (dans le cas d'une bobine avec noyau) et dans le conducteur, sur le volume de la bobine ou encore sur les perturbations générées par le composant. Toutes ces caractéristiques sont liées et impliquent de faire des compromis en fonction des applications visées. Nous ferons, dans ce chapitre, une synthèse de ce que l'on rencontre dans la littérature scientifique sur l'intégration de bobines dans différents domaines de l'électronique. Nous verrons ensuite les techniques de réalisation de ces dispositifs en détaillant notamment les principes de base de la croissance électrolytique de matériau métallique dans des moules en résine.

2. Généralités sur les bobines intégrées

2.1. Les composants inductifs pour les télécommunications et l'instrumentation

Les télécommunications et l'instrumentation sont deux domaines de la microélectronique qui bénéficient au premier plan des progrès liés à une intégration de plus en plus poussée. En effet, pour des contraintes principalement électriques, il est difficile pour des systèmes de type "Télécommunication" fonctionnant en haute fréquence de concevoir des fonctions au moyen de composants discrets. L'éloignement des composants, ou plutôt la « connectique », devient un handicap avec la montée en fréquence. L'instrumentation a également profité de ces avancées technologiques. En effet, les capteurs et les actionneurs sont miniaturisés afin de diminuer les perturbations liées à leur présence physique au sein d'un dispositif.

2.1.1 Télécommunications

Le domaine fréquentiel des télécommunications (GSM, AMPS, DECT, DCS-1800,...) est inclus dans la bande de radiofréquence (aux alentours de 1-2 GHz) pour laquelle le GaAs est communément utilisé comme substrat dans la réalisation des circuits intégrés. Toutefois, la miniaturisation en technologie CMOS (MOS à canal court) et le développement du micro-

usinage permettent aujourd'hui d'obtenir des composants "micro-onde" sur silicium. Cette évolution concerne non seulement les éléments actifs (diodes, transistors...) mais également les composants passifs (bobines, condensateurs...). Il est désormais possible de fabriquer des systèmes totalement intégrés notamment pour des applications de téléphonie sans fil ou mobile.

Les composants inductifs intégrés sont généralement des spirales métalliques, de technologie compatible avec les technologies standards (CMOS, BiCMOS,...), réalisées sur une couche isolante comme le montre la figure 1-1.

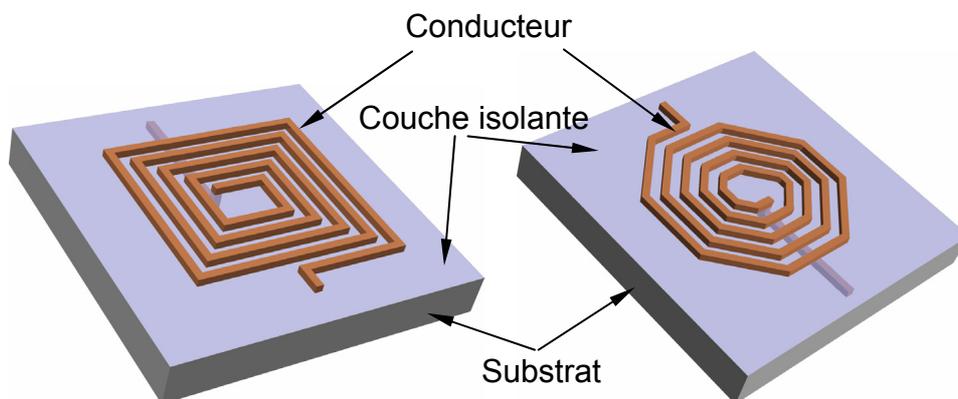


Figure 1-1: Bobines pour applications HF

Certains phénomènes parasites deviennent prépondérants aux gammes de fréquences dans lesquelles se situent ces applications, ils doivent alors être pris en compte dans le schéma électrique équivalent [55]. Nous voyons ainsi apparaître des capacités parasites entre les brins de la spirale et entre la bobine et le substrat, ainsi que des phénomènes de type effet de peau. C'est le facteur de qualité qui caractérise ces composants puisqu'il détermine leurs sélectivité et bande passante. Les paramètres clé de la conception sont la section et l'espacement des brins, la résistivité du métal formant le conducteur ainsi que la longueur de la spirale et la surface occupée. La forme de la spirale peut également améliorer le facteur de qualité. Ainsi toutes caractéristiques physiques égales par ailleurs (nombre de spires, écartement des spires, dimensions du conducteur), une bobine dont les spirales sont circulaires (octogonales) aura un meilleur facteur de qualité (amélioration jusqu'à 10%) qu'une bobine à spires rectangulaires [1].

Les bobines utilisées dans les applications "haute fréquence" sont réalisées grâce à des procédés technologiques CMOS ou BiCMOS. Dans ces technologies, les niveaux de métal servent généralement à interconnecter des composants ou sous-systèmes entre eux sur une

même puce. Ici les bobines sont obtenues par aménagement de ces niveaux de métal en forme de spirale. La technologie employée impose une épaisseur fixe de la couche métallique, et un nombre maximum de niveau de métal. L'épaisseur d'une couche métallique pour ces technologies est de l'ordre du micromètre. Il est toutefois possible de passer outre cette limitation en épaisseur en associant plusieurs niveaux de métal liés par des puits de conduction inter-couches pour augmenter la section du conducteur. Malgré cela, sachant que pour ce type de technologie nous pouvons avoir au maximum 7 niveaux de métal, il ne faut pas compter sur des épaisseurs totales supérieures à 5-6 μm de métal. Joachim N. Burghartz et al. ont réalisés des bobines pour des applications haute fréquence de 1 MHz à 20 GHz [2]. La figure 1-2 montre le principe de ces bobines (a) et une photographie de réalisation (b) [2]. Les indications M_i et V_j de la figure 1-2(a) représentent les i niveaux de métal et les j niveaux de puits conducteurs (ou via) inter-couches.

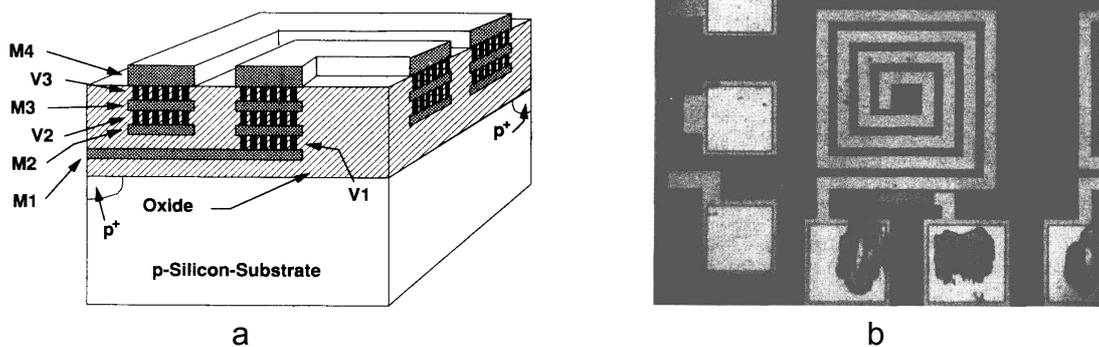


Figure 1-2: Bobines pour applications HF. Principe (a), réalisation (b)

Quelques exemples de réalisations publiés dans la littérature :

Les travaux de Arcioni et al [3] exposent une méthode d'extraction des paramètres du schéma électrique équivalent pour des spirales réalisées en technologies CMOS et BiCMOS sur substrat silicium. Pour des raisons liées à la résistivité des substrats, la technologie BiCMOS donne de meilleurs résultats en terme de facteur de qualité.

Long et Copeland [1] présentent une méthode de caractérisation et d'optimisation de spirales réalisées en technologie VLSI submicronique sur silicium. Des simulations 3D et des mesures expérimentales ont montré l'influence de l'épaisseur de la couche métallique sur le facteur de qualité.

L'absence de circuit magnétique fermé sur ce type de dispositifs ne permet pas la canalisation des lignes de champ qui peuvent perturber le fonctionnement des composants se trouvant à proximité. Caraninckx et Steyaert [4] ont étudié ce phénomène dans le cadre de

l'intégration en technologie CMOS d'un VCO pour la téléphonie mobile. Dans ce même but de réduction des perturbations liées à la structure du composant, Yue et Wong [5] ont proposé un blindage pour minimiser les couplages parasites entre spirales adjacentes à travers le substrat. Leur solution consiste à insérer un écran métallique relié à la masse entre la bobine et sa base. Une couche épaisse d'isolant sous le composant peut également être réalisée dans cet objectif. Okabe et al [6] ont obtenu des résultats comparables à ceux obtenus avec GaAs en utilisant des polyimides et des résines époxy pour des applications micro-ondes.

Le micro-usinage du silicium a aussi contribué à l'amélioration des performances de ces dispositifs. López-Villegas et al [7] ainsi que Tilmans et al [8] l'ont montré en aménageant une cavité sous les composants passifs. Young et al [9] ont présenté des bobines RF tridimensionnelles ayant des caractéristiques électriques très intéressantes.

2.1.2 Instrumentation

La miniaturisation des dispositifs d'acquisition et de commande permet l'intégration de système entier, parfois très hétérogène, sur une même puce de silicium. Les applications les plus remarquables concernent surtout l'électronique biomédicale et la micro-robotique. Nous allons mentionner quelques travaux sur les capteurs et les actionneurs intégrés comportant des parties inductives.

Le principe des capteurs magnétiques consiste en la conversion d'une variation d'un flux magnétique au travers d'un bobinage en une force électromotrice aux bornes de ce même bobinage. Ainsi la tension aux bornes du bobinage est fonction de la variation du champ magnétique, cette grandeur est ainsi facile à extraire et à traiter. Afin d'accroître la sensibilité, les spires sont enroulées sur un noyau magnétique comme le montre la figure 1-3.

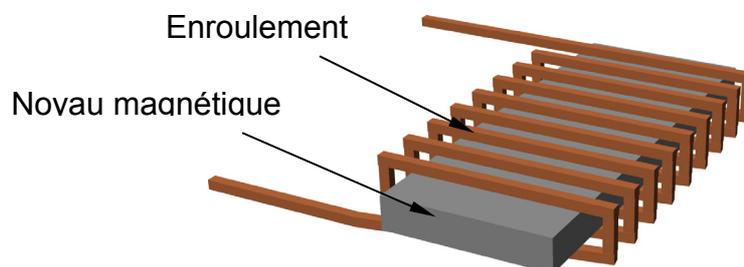


Figure 1-3: Structure d'un capteur magnétique

Dans le domaine des capteurs, nous pouvons citer les travaux de Coutrot et al [45] qui portent sur la mise au point de capteurs pour la R.M.N. (Résonance Magnétique Nucléaire) composés d'une double spirale "face avant / face arrière" en cuivre, sans noyau magnétique.

Les composants magnétiques sont également employés pour la réalisation d'actionneurs qui convertissent l'énergie électromagnétique en énergie mécanique. Le développement des micro-technologies a permis l'intégration de composants mécaniques associés à des circuits de commande et d'acquisition. Les forces et puissances mises en jeu sont évidemment très faibles. Aussi, ces dispositifs restent réservés à des applications spécifiques comme les micro-moteurs (utilisés en électronique biomédicale, horlogerie, micro-robotique...).

O'sullivan et al [10] ont décrit les étapes de fabrication d'un micro-moteur électromagnétique basées sur la réalisation d'un rotor par électrodéposition de NiFe et d'un bobinage statorique toroïdal en cuivre enroulé autour de pôles en NiFe. Le couple développé atteint $0,5\mu\text{N.m}$. Un travail similaire a été accompli par Ahn et al [11] avec une topologie d'inducteurs de type "serpentin", topologie que nous détaillerons plus loin dans ce chapitre. Watanabe et al [12] sont parvenus à mettre au point un micro-moteur qui tourne à une vitesse de 10000tr/min, le bobinage statorique du micro-moteur a été obtenu par électrochimie et son rotor en NdFeB par pulvérisation.

D'autres formes d'actionneurs convertissent l'énergie électromagnétique en énergie mécanique. Ainsi, le dispositif de Ahn et al [13] comporte dans le circuit magnétique d'une bobine en "serpentin", une poutre en NiFe placée en porte-à-faux. La circulation d'un courant dans le conducteur donne naissance à une force magnétique agissant sur les surfaces en regard de l'entrefer, et produisant la flexion des extrémités de la poutre. Nami et al [14] ont proposé des critères énergétiques prenant en compte la valeur modeste de la perméabilité du matériau magnétique, pour la conception de ce type d'actionneurs.

3. Application à la petite puissance

En fonction des niveaux de puissance envisagés, nous pouvons trouver des systèmes de conversion d'énergie électrique pouvant être réalisés en technologie hybride ou monolithique. Le niveau de puissance demandée, l'encombrement et le coût sont des facteurs déterminants dans le choix de la technologie.

3.1. Réalisations en technologie hybride

Les techniques de réalisation des circuits imprimés offrent une possibilité d'intégration totale de systèmes de puissance (puces de contrôle, de puissance et éléments réactifs), le niveau de puissance restant cependant limité du fait de la corrélation entre énergie mise en jeu et volume des matériaux magnétiques et diélectriques [15].

Van Der Linde et al [16] ont montré la faisabilité d'un transformateur haute fréquence en utilisant des circuits imprimés multicouches permettant l'aménagement de spires, et sur lesquels sont ensuite montées un noyau magnétique standard (RM-14). Une puissance de 200W a pu être atteinte sur un convertisseur Boost fonctionnant à 1MHz. Si on réalise les couches d'isolement inter-spire à l'aide de diélectriques de grande permittivité, on obtient directement un filtre L-C. Les travaux de Smit et al [17] et Marais et al [18], qui portent sur la fabrication de filtres de sortie pour convertisseurs d'énergie, explorent cette possibilité. Des réalisations plus compactes sont envisageables par collage d'un ruban magnétique à la place d'un noyau standard. Dezuari et al [19] ont fabriqué des transformateurs sur circuits imprimés en utilisant des films magnétiques à base de CoFeMo-SiB.

La réduction de la taille des composants inductifs passe par une augmentation de la fréquence de fonctionnement des convertisseurs. L'utilisation de matériaux adaptés à la haute fréquence est donc primordiale pour le développement des systèmes de puissance intégrés. Parmi les matériaux envisageables, citons les céramiques à base de titanate de baryum [18] pour les diélectriques, et les ferrites à base de Mn-Zn pour les circuits magnétiques [20], [21]. En élevant les fréquences de découpage, les pertes par hystérésis augmentent de telle sorte qu'il devient impossible d'utiliser un noyau magnétique dans les composants inductifs. Des travaux ont porté sur des transformateurs sans noyau comme celui de Arshak et Almukhtar [22], qui ont pu obtenir un rendement de 98,2% à 10MHz. Hui et al [23] ont modélisé et utilisé ce type de dispositifs dans des circuits de commande de grille de MOS et d'IGBT jusqu'à 2MHz.

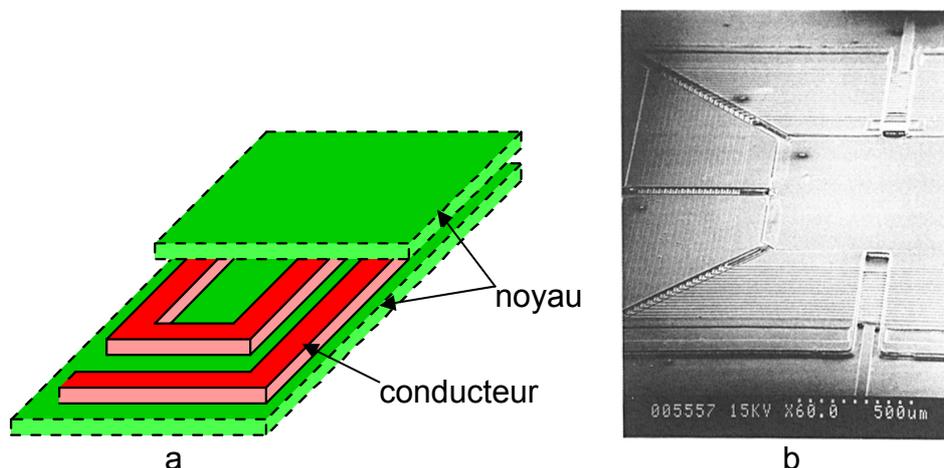
3.2. Réalisations monolithiques

Comme nous l'avons abordé précédemment dans le paragraphe instrumentation, le développement des procédés de réalisation 3D compatibles avec les technologies silicium standards a révolutionné le concept de fabrication des microstructures, ouvrant ainsi de nouvelles voies, notamment pour la miniaturisation des composants magnétiques de puissance [24]. Nous pouvons ainsi envisager aujourd'hui la réalisation de noyaux et de spires de quelques dizaines à quelques centaines de microns d'épaisseur et de largeur. De plus, ces techniques de fabrication utilisent des procédés à basse température les rendant ainsi compatibles avec des technologies conventionnelles de production de composants actifs. Cela permet d'envisager l'intégration monolithique de dispositifs associant semi-conducteurs et composants passifs comme c'est le cas dans les micro-convertisseurs.

Les différentes topologies de bobines et de transformateurs rencontrées dans la littérature pour des applications de conversion DC-DC, peuvent être classées en trois grandes familles : les spirales, les structures toroïdales (dites aussi solénoïdales ou "en barreau"), et les structures en forme de serpent (ou "en méandre"). Nous allons donner quelques exemples relatifs à chaque famille, et décrire les principales étapes des procédés de fabrication. Notons que, particulièrement pour les applications de l'électronique de puissance, il est impératif de réduire la résistance des conducteurs, d'augmenter la valeur de l'inductance pour une surface donnée, et de canaliser les lignes de champ pour limiter les perturbations sur les composants voisins.

3.2.1 Structure de type "spirale"

Comme nous l'avons vu précédemment, les spirales simples sont très utilisées dans le domaine des radiofréquences pour fabriquer des inductances de quelques dizaines de nH. Afin de les adapter aux applications de puissance, la section du conducteur doit être augmentée afin de réduire sa résistance. De plus, dans le but d'accroître la valeur d'inductance par unité de surface, le conducteur est pris en sandwich entre deux couches de matériaux magnétiques. Le calcul de l'inductance doit prendre en compte le coefficient d'inductance mutuelle entre les spires, ce qui conduit à une expression assez complexe en comparaison avec le tore simple [25]. La figure 1-4 montre une vue en perspective d'une bobine de type "spirale" (a), et une photographie M.E.B. d'une réalisation (b) :



Citons comme exemple les travaux de Sugahara et al [26] qui ont développé une spirale en cuivre d'épaisseur $27\mu\text{m}$ prise en sandwich entre deux films magnétiques (Co-Hf-Ta-Pd)

de $3\mu\text{m}$. Ce composant a été placé dans un convertisseur de type Buck d'une puissance de $0,5\text{W}$ fonctionnant à 1MHz avec un rendement de 85% .

La prise en sandwich du conducteur entre deux couches de matériau magnétique limite les problèmes d'interférences [27], [28], [29] et permet d'accroître la valeur de l'inductance. Ahn et Allen [30] ont noté une augmentation d'un facteur 4 à 5 en présence de matériau magnétique par rapport à une spirale simple. Une étude plus détaillée de ce type de bobines a été menée par Daniel et al [31], qui met en évidence que le rendement et la densité de puissance sont plus importants que pour les autres topologies. Une telle bobine utilisée dans un convertisseur de type Buck (dévolteur) d'une puissance de 5W et fonctionnant à 5MHz , a permis un rendement de 94% et une densité de puissance de $12,8\text{W}/\text{cm}^2$. Notons que le conducteur est en cuivre électrochimique et que le noyau de type laminé, est formé de couches en NiFe(80/20%) de $1,3\mu\text{m}$ d'épaisseur déposées par "sputtering", séparées par des couches en SiO_2 de $0,3\mu\text{m}$ d'épaisseur obtenues par LPCVD. Cette technique est destinée à limiter les pertes dans le noyau.

Des transformateurs ont été préparés d'une manière analogue par Sullivan et Sanders [32], [33]. Ils permettent une densité de puissance de $22,4\text{W}/\text{cm}^2$ avec un rendement de 61% et une fréquence de fonctionnement de 8MHz . Ils espèrent arriver à une densité de 50 à $100\text{W}/\text{cm}^2$ avec un rendement de 90 à 95% moyennant quelques améliorations. Notons que ces dispositifs sont réalisés avec des techniques utilisées dans l'industrie des têtes magnétiques (dépôt électrochimique de cuivre, noyau magnétique en NiFe, "sendust" FeAlSi), car bien adaptées à la haute fréquence et la haute densité d'intégration.

3.2.2 Structure de type "toroïdale"

Dans la bobine toroïdale conventionnelle, des spires conductrices enroulées autour d'un noyau magnétique fermé assurent un faible flux de fuite et minimisent les interférences électromagnétiques. Trois couches de matériaux sont nécessaires pour fabriquer ce type de bobine. Le calcul de l'inductance est assez simple [34] et le nombre de spires par unité de longueur peut être élevé. La figure 1-5 montre la topologie de ce type de bobine (a), et une photographie M.E.B. d'une réalisation de transformateur utilisant cette topologie (b) :

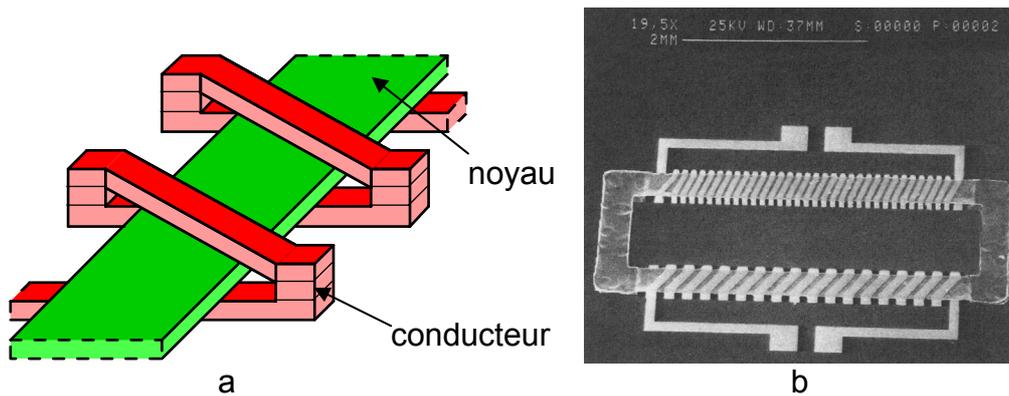


Figure 1-5: Bobine de type "toroïdale", (a) principe, (b) réalisation [37]

Ahn et Allen [35], [36] ont mené des études sur des micro-convertisseurs intégrés DC/DC type Boost (survolteur) en utilisant ces microbobines. Ils ont obtenu une tension de sortie de 6V à partir d'une source de 3V avec une fréquence de fonctionnement de 300kHz.

Pour fabriquer des transformateurs, il faut aménager un deuxième enroulement autour du noyau (Figure 1-6-b). Les étapes technologiques restent les mêmes. Mino et al [38] ont mis au point un tel composant pour un convertisseur de type Forward fonctionnant à 32MHz, en déposant les matériaux des conducteurs et noyau par sputtering. Lotfi et al [39] ont utilisé ces dispositifs comme transformateurs d'impulsions pour un isolement galvanique à 500kHz.

3.2.3 Structure de type "serpentin"

Le principe de réalisation est semblable à celui du type précédent. Il suffit de permuter l'emplacement du conducteur avec celui du noyau. En effet, dans cette topologie le conducteur monocouche est aménagé en forme de serpent, alors que le noyau se trouve réparti sur trois niveaux pour envelopper le conducteur. Cette structure permet de réduire considérablement les résistances de contact le long du conducteur, assurant ainsi une montée en puissance par rapport au composant de forme toroïdal, sans risque de pertes excessives. Le calcul de l'inductance est identique à celui de la bobine précédente. Par contre, le nombre de spires par unité de longueur est un peu plus faible. La longueur moyenne du noyau est également plus importante ce qui a pour conséquence d'augmenter la réluctance du circuit magnétique et ainsi de diminuer la valeur de l'inductance. La figure 1-6 montre la topologie de ce type de bobine (a), et une photographie M.E.B. d'une réalisation (b) :

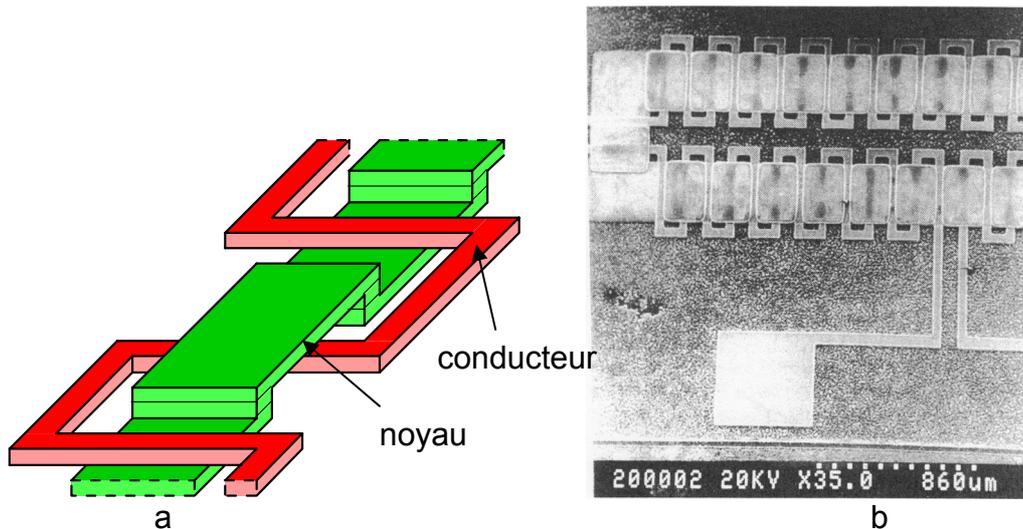


Figure 1-6: Bobine de type "serpentin", (a) principe, (b) réalisation [B-40]

Les microbobines rencontrées dans la littérature scientifique sont des dérivées ou améliorations de ces trois topologies.

Le tableau récapitulatif proposé sur la table 1 résume les principales caractéristiques de dispositifs magnétiques rencontrés dans les publications. Ce tableau est tiré de la thèse d'Hedi Hakim [51].

Télécommunications

Réf.	Type	L (H)	R (Ω)	Q	f (Hz)	S (μm^2)
[3] (STM)	spirale	1,83-15,4n	3,5-23,5	1,3-4,3	3G	300*300
[1] (Nortel)	spirale	1-20n	8,5	5-10	10G	255*255
[4]	spirale	6,18-100n	5,39-30,19	5-14	2,5G	170*170
[5]	spirale	7,4-8,2n	8,2-13,4	4-10,2	1-2G	300*300
[6](Hitachi)	spirale	4-110n	1,3	10-17	2-11G	450*450
[7]	spirale	8-12n		0,8-1,5	0,5-2,7G	
[8] (AME)	spirale	1-100n		3-5	1-4G	250*250
[9]	toroïdale	2,6-13,8n		13-30	0,9-1G	250*500

Instrumentation

Réf.	Type	L (H)	R (Ω)	B (T)	f (Hz)	S (mm^2)	I (A)	$P(W)/C(N.m)$	Applic.
[42]	toroïdale				1M	6*6			cap. flux
[44]	toroïdale			1-1,2		0,13			cap. flux
[10] (IBM)	toroïdale	19-23 μ				17*17	5,1-9,1m	0,18-0,23 μ	micromot
[11]	serpentin	0,23 μ	1,5	0,5	1M	0,25	0,5-3	3,3-5n	micromot
[12] (Fuji)	toroïdale		1			0,64	117m	0,18W	micromot
[13]	serpentin	0,1-0,3 μ	1,3	0,8	10M	3,6	800m	52mW	lev. mob
[45]	double spirale				102M-174M	14,6*14,6			Capteur RMN

Electronique de puissance (intégration hybride)

Réf.	Type	L (H)	R (Ω)	S (mm^2)	f (Hz)	V(V)	I (A)	P(W) / η	Applic.
[16]	transfo	460 μ	0,7/41m		1M	5	25	200	DC-DC
[17]	spirale	51 μ			100k	155	10		filtre LC
[18]	spirale	490 μ		35*35	20k	300	8	4,57/cm ³	DC-DC
[19]	transfo	30 μ	0,1-0,5		1-100k			89-98%	DC-DC
[20]	transfo	87-93 μ	1/0,4		0,5-1M	40/13	0,9	15-97%	DC-DC
[21]	transfo			12*17	1M	30		10-17/ 55%	DC-DC
[22]	transfo	1-3 μ	1,1-2,3	50*50	10M			98%	DC-DC
[23]	transfo	0,2-1,1 μ	0,43-4		0,5-2M				G. IGBT

Electronique de puissance (intégration monolithique)

Réf.	Type	L (H)	R (Ω)	S (mm^2)	f (Hz)	V(V)	I (A)	P(W)/ η (%)	Applic.
[42]	spirale	0,5-0,8 μ		100	5M	3,6/4,6	0,7	82-88%	DC-DC
[24]	serpentin	0,1-0,4 μ	0,3	4	1M		2,5		DC-DC
[26]	spirale	1-2,5 μ	1-4	5*5	1M	4/3		0,5/85%	DC-DC
[30]	spirale	20 μ	200	3*3	10k				DC-DC
[31]	spirale	0,3 μ	0,14	3,6*10,8	5M	40/5	1	5/94%	DC-DC
[32]	transfo	0,35 μ	3,6		8M	30/4,2		22,4/61%	DC-DC
[33]	transfo	22 μ	5,8	6	10M	36	90m	3/80%	DC-DC
[35]	tor/serp	0,1-0,5 μ	1,2	4	300k	3/6	6,7m	40mW	DC-DC
[36]	tor/sp/ser	0,7-1 μ	0,3	4	1M				DC-DC
[37]	spirale	0,4-1,1 μ	5,2-22,9	4-16					DC-DC
[38]	transfo	0,3 μ /40n	3,9/0,6	3*4	32M	10			DC-DC
[39]	transfo	1,5 μ		4-25	5-15M				tr impuls

Table 1: Tableau récapitulatif de quelques dispositifs magnétiques

4. Matériaux

L'intégration d'une bobine nécessite l'utilisation principalement de trois types de matériau. Ces matériaux sont :

- un matériau conducteur
- un matériau magnétique
- un matériau isolant

Les deux premiers matériaux sont implicites et entrent dans la composition respectivement du bobinage et du noyau magnétique. L'isolant quant à lui évite le contact entre les matériaux magnétique et conducteur, ceci afin de ne pas provoquer de court-circuit au niveau de l'enroulement lors de l'empilement des couches de matériaux ou du substrat. Sa permittivité électrique pourra également influencer sur les capacités parasites inter-spire au niveau du bobinage et entre le bobinage et le substrat.

4.1. Matériaux conducteurs

Les matériaux conducteurs entrent dans la composition de l'enroulement de la bobine. Leur composition va notamment intervenir dans la résistance électrique totale du bobinage, son comportement vis-à-vis de l'oxydation, sa résistance mécanique ainsi que les difficultés de réalisation.

Les trois principaux métaux conducteurs utilisés dans la littérature sont : L'or, l'aluminium et le cuivre. Ce dernier présente une résistivité inférieure aux deux autres. L'or, de faible résistivité, a une bonne résistance à l'oxydation mais est sujet à la « peste pourpre » (composé intermétallique Al/Au poreux fragile et non-conducteur apparaissant à des températures de l'ordre de 200°C).

En définitive, il apparaît que le cuivre reste le métal le plus utilisé pour la réalisation de microbobines, microactionneurs, microtransformateurs ou têtes magnétiques, ceci en raison de ses propriétés électriques très intéressantes, et des différentes possibilités pour le déposer (évaporation, pulvérisation ou électrochimie).

Cu :

- Résistivité d'environ 1,75 $\mu\Omega.cm$
- Méthode de dépôt électrochimique [31] [33] [26] [13] [11] [35] [24] [10]

Al :

- Résistivité d'environ 2,9 $\mu\Omega.cm$
- Méthode de dépôt par pulvérisation en courant continu [30] [13]

Au :

- Résistivité d'environ 2,3 $\mu\Omega.cm$
- Méthode de dépôt électrochimique [37]

Ces valeurs de résistivité doivent être légèrement majorées en fonction des techniques de dépôt de ces matériaux. En effet, ces valeurs correspondent à des matériaux massifs. Les méthodes et conditions de dépôt peuvent générer des imperfections dans la matière qui auront tendance à modifier cette résistivité.

4.2. Matériaux magnétiques

La présence d'un noyau magnétique dans une bobine permet d'accroître la valeur de son inductance, de canaliser le flux magnétique, d'emmagasiner de l'énergie ou de la transmettre. Les caractéristiques optimales du matériau constituant ce noyau sont : une perméabilité relative élevée permettant une augmentation significative de l'inductance, un niveau d'induction à saturation et une résistivité électrique élevés afin de limiter les "pertes fer" par courants de Foucault. Il n'existe pas de matériau parfait et tout est affaire de compromis.

Les ferrites sont les matériaux magnétiques les plus utilisés dans la réalisation de transformateur haute fréquence du fait de leur résistivité élevée. Par contre, elles sont difficilement compatibles avec les procédés de fabrication de la microélectronique. En effet, ces matériaux requièrent des recuits à haute température qui ne sont pas conciliables avec la technologie silicium [35]. Aussi nous nous tournerons vers d'autres matériaux ayant de bonnes propriétés magnétiques, comme les alliages magnétiques, sachant que les pertes par courants de Foucault peuvent être réduites grâce à une technique de feuilletage.

Les principaux matériaux magnétiques utilisés [46]

NiFe par électrochimie. μ_r de 100 à 5000 en fonction des conditions de dépôt (croissance avec ou sans champ magnétique) [10] [11] [13] [24] [30] [31] [33] [35] [37] [46]

NiFe/SiO₂ [32] (dépôt par pulvérisation $\mu_r=2000$)

CoHfTaPd par pulvérisation. [26]

CoZrRe par pulvérisation. [33] [38]

MnZn par pulvérisation, puis traitement thermique (ferrite). [33] [40] [20](poudre) [21] [46]

CoFeCu par électrochimie.

NiZn par poudre.

NiFeMo par électrochimie.

FeCoB ruban de matériau μ_r de 400 à 800 suivant traitement. [41]

CoNbZr par pulvérisation. [33] [46]

FeHfO par pulvérisation. [42] [43]

Le problème majeur à résoudre au niveau du noyau est celui des pertes. Ainsi les courants de Foucault peuvent être limités en utilisant des structures à noyau feuilleté [33]. Ceci a pour effet de diminuer la circulation des courants induits dans le matériau si le feuilletage est

réalisé dans la direction du champ magnétique variable. Ainsi, en restreignant les mouvements des charges dans le matériau, nous réduisons également la possibilité au champ magnétique d'accélérer et donc de fournir de l'énergie à ces charges. Ci-dessous, quelques exemples de noyaux feuilletés adaptés à des bobines de type spirale. Sur la figure 1-7 (a) le principe de base du feuilletage du noyau ; sur les figure 1-7 (b), (c) et (d) des noyaux feuilletés combinant à la fois l'utilité première de réduction des courants de Foucault et la présence d'entrefer permettant d'emmagasiner de l'énergie magnétique dans l'air (ou dans l'isolant du feuilletage) [33].

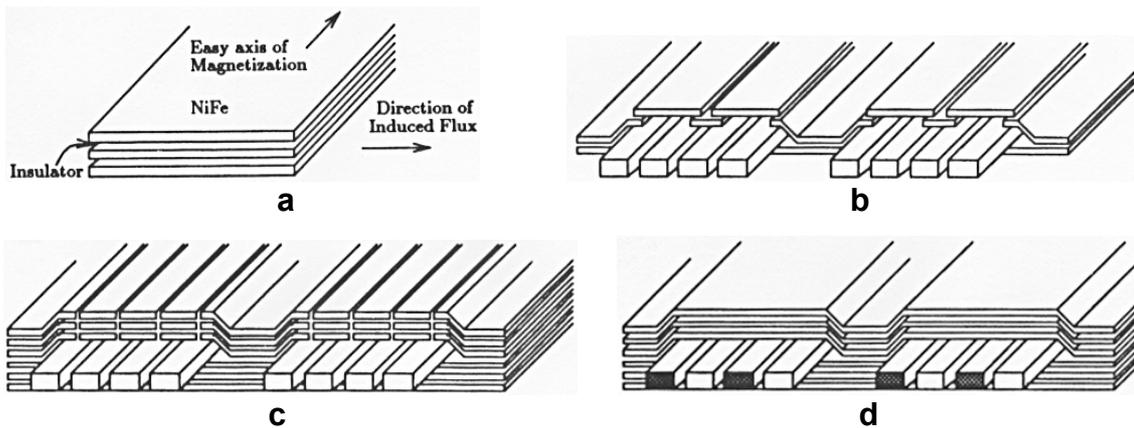


Figure 1-7 : différents types de feuilletage proposé par Sullivan et Sanders [33]

L'équation donnant une approximation des pertes par courants de Foucault est donnée ci-dessous (1-1). Le paramètre e représente l'épaisseur des feuilles élémentaires, ω la fréquence d'utilisation, V le volume du noyau, ρ la résistivité électrique du matériau [33 (7)] :

$$\text{Pertes}_{\text{par}_{\text{courant}}_{\text{de}}_{\text{Foucault}}} = \frac{\omega^2 \cdot B_{\text{max}}^2 \cdot V \cdot e^2}{24 \cdot \rho} \quad (1-1)$$

Par ailleurs, les alliages magnétiques ont une induction à saturation supérieure à celle des ferrites (rapport 10 environ). Ils auront donc un meilleur comportement face aux pertes par hystérésis [33]. Citons la formule empirique de Richter pour déterminer le niveau de perte par hystérésis (1-2) [47 (II.A.16)] :

$$\text{Pertes}_{\text{par}_{\text{hystérésis}}} = a \cdot V \cdot f \cdot B_{\text{max}} + b \cdot V \cdot f \cdot B_{\text{max}}^2 \quad (1-2)$$

a et b sont deux constantes dépendant de la nature du matériau, V est le volume de matériau, f la fréquence.

Le matériau magnétique le plus utilisé dans la conception des noyaux magnétiques est l'alliage fer-nickel avec une proportion d'environ 80% de nickel pour 20% de fer. Il peut se déposer par électrochimie. De plus, la basse température de fabrication permet de ne pas endommager les autres dispositifs éventuellement présents sur la puce lors de l'élaboration de

la microbobine. Les valeurs de perméabilité relative μ_r du NiFe sont très disparates et peuvent aller de 100 à 5000 suivant la qualité des bains et la méthode de dépôt du matériau. Typiquement cette valeur est aux environs de 800 pour un dépôt électrochimique classique. A. Ferro et al ont montré dans leurs travaux [54] qu'il est possible de contrôler les valeurs de perméabilité magnétique de l'alliage magnétique NiFe en combinant des champs magnétiques et des traitements thermiques sur les dépôts. C. H. Ahn et al ont également mis en avant ce phénomène [13]. Toutefois, comme pour les ferrites, les traitements thermiques peuvent être difficile à adapter aux procédés standards de réalisation de la microélectronique. Les noyaux intégrés sont souvent des films magnétiques obtenus par pulvérisation cathodique ou électrochimie. Sato et al [40] ont préparé des échantillons en Fe(Co-Fe)-Hf-O par sputtering pour fabriquer des capteurs magnétiques.

Des problèmes liés aux propriétés physiques de ces matériaux peuvent apparaître, comme par exemple la variation de la perméabilité magnétique en fonction de la fréquence, étudiée par Huijbregtse et al [41] pour Fe-Hf-O et par Turtelli et al [42] pour Fe-Co-B. Par ailleurs, le caractère non linéaire et le cycle d'hystérésis de la caractéristique B(H) nécessitent une interprétation adéquate des résultats de mesure. Wende et al [43] ont travaillé sur l'optimisation de la linéarité, et une modélisation de l'hystérésis a été proposée par Rousseau et al [44].

4.3. Matériaux isolants

Les isolants permettent de dissocier électriquement le bobinage du noyau magnétique ou du substrat. Dans les publications, les matériaux isolants couramment utilisés sont : l'oxyde de silicium (SiO₂), l'oxyde d'aluminium (Al₂O₃), les nitrures de silicium et des polymères de type résines photosensibles ou polyimides. Tous ces isolants ne sont pas employés dans les mêmes circonstances. En effet, sans aller jusqu'à la prise en compte de la permittivité du diélectrique, la nature des isolants dépend des éléments de la bobine que l'on désire isoler.

Les oxydes et nitrures de silicium servent la plupart du temps à isoler le substrat du composant. C'est la couche de passivation qui sera la première étape de fabrication de la microbobine [43][10][26][31][32][35][36][38]. Certains dispositifs utilisent les oxydes comme isolant entre le bobinage et le noyau, comme c'est le cas dans les travaux de U. Wende et al [43] qui utilisent cette technique pour leurs capteurs magnétiques. Les oxydes rentrent également dans la conception de noyaux feuilletés. R. Sullivan et al [33] se servent des oxydes de silicium ou d'aluminium comme diélectrique pour le feuilletage de leurs

noyaux magnétiques. L. Daniel et al élaborent leurs noyaux magnétiques sur le même principe [31]. Les épaisseurs d'oxydes sont de l'ordre de quelques dixièmes de μm à quelques μm .

Dans le cas d'un besoin d'isolant d'épaisseur plus conséquente, ce qui est souvent le cas pour les structures de "puissance", les polymères sont plus appropriés. Les polymères utilisés comme isolants électriques doivent répondre à des contraintes de tenue dans le temps et en température. Les plus couramment utilisés sont les polyimides, les polyimides photosensibles ou les résines époxy photosensibles.

Parmi ces polymères, nous retrouvons le plus fréquemment dans la littérature l'utilisation des polyimides pour la réalisation de dispositif inductif de puissance, de MEMS (MicroElectroMechanical System) ou encore d'actionneurs [11] [12] [13] [20] [24] [26] [30] [35] [36]. Leurs propriétés chimiques leur confèrent de bonnes tenues dans le temps et en température, ainsi qu'une facilité d'utilisation comparable à celles des résines classiques. Les polyimides sont façonnés, après dépôt sur la plaquette, par gravure anisotropique au travers d'un masque métallique de protection. Certains types de polyimides contiennent des agents photosensibles leur attribuant la même facilité de mise en œuvre que les résines photosensibles courantes.

Toutefois, certaines résines ont également des caractéristiques physico-chimiques toutes aussi intéressantes que les polyimides pour le domaine d'application qui nous intéresse. Les travaux de E. J. O'Sullivan et al [10], de L. Daniel et al [31] ou C. R. Sullivan montrent les possibilités de ces polymères utilisés comme isolant et moule.

En effet, les polyimides, comme les résines, permettent également en plus du rôle d'isolant de structurer la croissance des matériaux déposés par électrochimie en faisant office de moule.

Enfin, B. Löchel et al [37] séparent noyau et conducteur de leur bobine par de l'air. Cette technique utilise une résine photosensible positive pour faire croître les dépôts métalliques puis la résine est retirée au moyen d'un solvant, laissant ainsi le noyau et le bobinage en suspension dans l'air.

4.4. Conclusion sur les matériaux

Outre le choix des caractéristiques des matériaux conducteur et magnétique, se pose le problème de leur mise en œuvre qui doit être compatible avec les technologies microélectronique de fabrication des autres composants présents sur la puce. De plus, le coût de fabrication de ces dispositifs doit être en phase avec une certaine réalité des contraintes industrielles.

Par conséquent, et aux vues des quelques publications recensées pour cet état de l'art sur les microbobines, il semble intéressant dans un premier temps de s'orienter vers les matériaux NiFe pour le noyau magnétique et Cu pour le bobinage. En effet, l'emploi de ces matériaux requière l'utilisation de procédé d'électrochimie, facilement accessible d'un point de vue technologique, et qui permet d'obtenir de fortes épaisseurs comparé à d'autres procédés comme l'évaporation ou la pulvérisation. L'électrochimie sera donc plus adaptée aux dimensions de nos structures appliquées à la puissance. Il en découle également le type d'isolant qu'il faudra utiliser et qui servira à la fois de moule pour la croissance électrochimique et d'isolant électrique.

5. Procédés de fabrication – Electrochimie

5.1. Principe général de fabrication

Le principe général de fabrication de nos structures réside dans l'empilement de couches planes uniformes d'épaisseur variable. Un même niveau peut être formé par plusieurs types de matériaux. L'empilement global de ces couches de matériaux forme au final, par un jeu de liaisons intercouches, une structure ayant des caractéristiques analogues à celles d'un composant inductif classique.

Ces couches sont principalement formées d'un polymère (Polyimides ou résines photosensibles) pouvant servir à la fois de moule et d'isolant dans lequel nous venons faire croître des matériaux métalliques par électrochimie. Ces moules peuvent atteindre des épaisseurs comprises entre quelques μm et une centaine de μm . Classiquement, afin de réaliser une microbobine avec un noyau magnétique pour les catégories vues précédemment, il nous faut procéder à l'empilement de cinq couches de matériau, ce qui représente, d'un point de vu technologique, sept niveaux de masque. On voit donc que la fabrication de tels dispositifs demande une maîtrises de procédés de mise en œuvre de résines épaisses, de leur empilement, et des techniques relatives à l'électrochimie.

5.2. Electrochimie [48]

L'électrochimie est un procédé permettant le dépôt contrôlé de matériau métallique en solution aqueuse. Cette solution contient un sel dissout du métal que l'on veut déposer. Une contre-électrode, réalisée avec le même métal que celui destiné à être déposé, sert de matière première au dépôt et est ainsi consommée tout au long du procédé d'électrochimie. La

circulation d'un courant engendre l'arrachement d'ions métalliques de la structure cristalline de la contre-électrode qui vont se dissoudre dans la solution et la restructuration d'ions métalliques de la solution sous forme de structure cristalline au niveau de l'électrode de travail (électrode que l'on veut recouvrir de métal). Il existe un grand nombre de métaux pouvant être déposés par électrochimie à partir d'une solution aqueuse : Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Ir, Pt, Au et Pb. Seuls quelques-uns sont effectivement utilisés pour les micro-systèmes [B-45]. La plupart des procédés d'électrolyse à base de solutions aqueuses s'opèrent à des températures comprises entre 10°C et 100°C. Les dépôts électrochimiques les plus fréquents dans les secteurs de l'électronique sont : Cu, NiFe, NiFeCo, SnPb, NiP, AuNi, AuCo, Pd, PdNi,... Le cuivre est principalement utilisé comme conducteur alors que NiFe, NiFeCo et autres combinaisons avec alliages métalliques de transition servent de matériaux magnétiques, notamment pour les têtes d'enregistrement.

5.2.1 A l'équilibre (sans circulation de courant)

Quand un métal M est immergé dans une solution aqueuse contenant des ions de ce métal M^{z+} (c'est-à-dire un sel de ce métal MA) il se produit un échange d'ions métalliques M^{z+} entre les deux phases, le métal et la solution. Des ions M^{z+} de la structure cristalline du métal rentrent en solution, et inversement des ions de la solution intègrent la structure cristalline.

Initialement une de ces réactions se produit plus rapidement que l'autre. Supposons que les conditions sont telles qu'il y ait plus d'ions M^{z+} qui quittent la structure cristalline que d'ions qui la réintègrent. Dans ce cas il y a un excès d'électrons dans le métal et le métal se charge négativement. En réponse à l'accroissement de la charge dans le métal à l'interface, il se produit un réarrangement des charges du côté de la solution de l'interface. La charge négative du métal attire les charges positives des ions M^{z+} de la solution et repousse les ions négatifs A^{z-} . Il en résulte un excès d'ions positifs M^{z+} dans la solution à proximité de l'interface métallique. Ainsi, dans ce cas, le côté "solution" de l'interface acquiert une charge égale et opposée. Cette charge positive du côté "solution" de l'interface diminue le taux d'ions quittant la structure cristalline (phénomène dû à la répulsion des charges opposées) et augmente le taux d'ions intégrant la structure cristalline du métal. Après un certain temps, il en résulte un équilibre dynamique entre le métal M et ses ions dans la solution. À cet équilibre autant d'ions métalliques quittent la structure cristalline qu'il n'en réintègrent. La région d'interface est neutre à l'équilibre. La figure 1-8 représente un schéma de cet état d'équilibre.

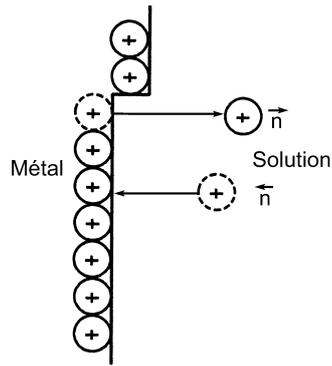


Figure 1-8 : Interface métal-solution à l'équilibre $\vec{n} = \vec{n}$

Ainsi, sans circulation de courant, il n'y a pas de dépôt de matière solide à l'interface. Cependant, il existe un procédé permettant le dépôt de matériau métallique sans circulation de courant, c'est-à-dire sans qu'il soit nécessaire de fournir artificiellement des électrons afin de réduire les ions métalliques présents dans la solution. Ce procédé est dit "electroless". Le principe de cette technique est basé sur la présence simultanée dans la solution des ions métalliques à réduire (à déposer) et d'un agent réducteur. La réaction ne se fait pas spontanément et requiert un élément catalyseur. Dans ce cas, c'est la surface que l'on désire recouvrir qui joue le rôle de catalyseur. Cet élément catalyseur peut simplement être constitué d'atomes du métal que l'on désire réduire. Les inconvénients de cette méthode de dépôt sont d'une part la vitesse de croissance métallique et d'autre part la sélectivité des surfaces que l'on veut recouvrir.

5.2.2 Avec circulation d'un courant

L'équilibre de potentiel d'une électrode d'une cellule d'électrochimie sera modifié quand un courant la traversera. Si le potentiel d'équilibre de l'électrode est E et que le potentiel de cette même électrode résultant du passage d'un courant est $E(I)$, alors la différence η (1-3) entre les deux potentiels est appelée surpotentiel : $\eta = E(I) - E$ (1-3)

Pour une grande valeur de surpotentiel négatif ($|\eta| \geq 100\text{mV}$) la densité de courant i (1-4a, 1-4b et 1-4c) ($i=I/S$, S est la surface de l'électrode) augmente exponentiellement avec le surpotentiel η suivant l'équation :

$$i = -i_0 e^{-\alpha f \eta} \quad (1-4a)$$

De même pour de grandes valeurs de surpotentiel positif (procédés anodiques) :

$$i = -i_0 e^{(1-\alpha) f \eta} \quad (1-4b)$$

Où i_0 est la densité de courant d'échange ($i=i_0$ quand $\eta=0$), α est le coefficient de transfert, F la constante de Faraday, R la constante molaire des gaz, T la température absolue et :

$$f = \frac{F}{RT} \quad (1-4c)$$

Ainsi quand une électrode est à l'équilibre, il y a un échange constant de porteur de charge (électrons ou ions) à travers l'interface métal-solution. Nous voyons également qu'une faible variation du surpotentiel η provoque une forte variation de i (1-5a, 1-5b et 1-5c) (relation exponentielle entre i et η).

$$\eta = a \pm b \log|i| \quad (1-5a)$$

Dans l'équation (1-5a) a et b sont des constantes et i la valeur absolue du la densité de courant. Le signe + ou - dépend respectivement d'un procédé anodique ou cathodique. Les valeurs théoriques de ces constantes a et b pour un procédé cathodique sont:

$$a_c = \frac{2,303RT}{\alpha zF} \log i_0 \quad (1-5b) \quad b_c = \frac{2,303RT}{\alpha zF} \quad (1-5c)$$

Le graphique de la figure 1-9 montre la relation entre la densité de courant et le surpotentiel pour des valeurs de densité de courant où le transport de masse est négligé.

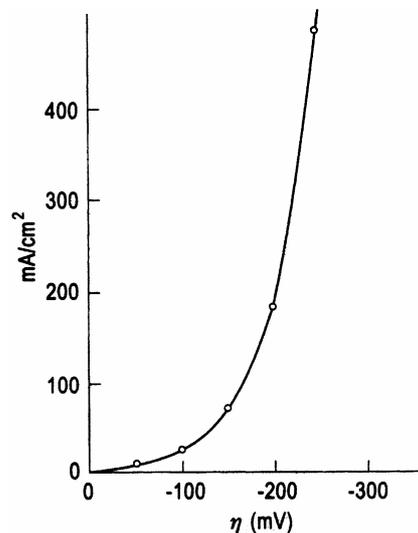


Figure 1-9 : Relation exponentielle entre la densité de courant et le surpotentiel. Cas d'électrodéposition de cuivre en solution aqueuse (0,15 M de CuSO_4 et 1,0 M de H_2SO_4)

5.2.3 Influence du transfert de masse

La relation densité de courant / surpotentiel vue dans le paragraphe précédent n'est valable que pour des cas où le transfert de masse (mouvement des ions dans la solution) est un

phénomène négligeable lors de procédé de dépôt, c'est-à-dire pour de faible surpotentiel. Cette relation est en réalité limitée par les contraintes de déplacement des ions M^{z+} dans la solution. Ainsi la densité de courant maximum ou limite i_L est donnée par l'équation (6) :

$$i_L = \frac{nFD}{\delta} c_b \quad (1-6)$$

Où D est le coefficient de diffusion des espèces déposées M^{z+} , c_b est la concentration des ions M^{z+} dans la solution, δ est l'épaisseur de la couche de diffusion, n le nombre d'électrons impliqués dans la réaction, et F la constante de Faraday. Sur la figure 1-10 nous voyons l'influence du transfert de masse sur la relation entre la densité de courant et le surpotentiel.

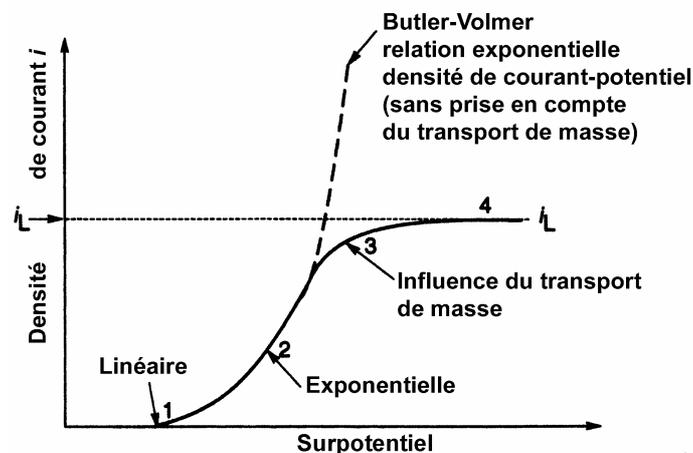


Figure 1-10 : Densité de courant en fonction du potentiel avec et sans prise en compte du transfert de masse.

L'épaisseur de couche de diffusion δ est défini selon le modèle de Nernst de la figure 1-11. Ce modèle considère une concentration c_b des ions M^{z+} constante dans tout le volume de la solution jusqu'à une distance δ de la surface de l'électrode, puis chute linéairement jusqu'à $c_{x=0}$ à l'électrode. Dans ce modèle, on considère également que le liquide contenu à l'intérieur de la couche de diffusion d'épaisseur δ est stationnaire. A une distance supérieure à δ de la surface de l'électrode, la concentration en espèce M^{z+} est estimée égale et constante dans toute la solution et l'agitation n'y est plus négligeable. Les ions M^{z+} doivent ainsi traverser la couche de diffusion pour atteindre l'électrode.

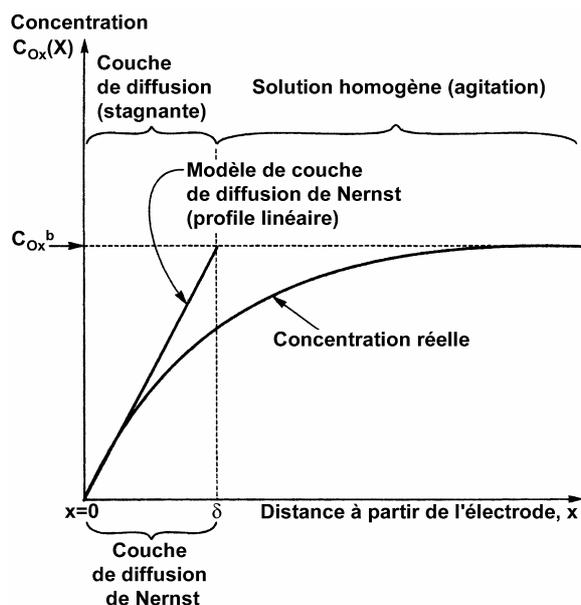


Figure 1-11 : Variation de la concentration de réactif pendant l'électrolyse ; c_{Ox}^b est la concentration dans la solution ; $c_{Ox}(x=0)$ est la concentration à la surface.

Pour des valeurs de densité de courant proche du maximum i_L , les espèces M^{z+} sont réduites dès qu'elles atteignent l'électrode. Dans ces conditions la concentration des réactifs M^{z+} devient nulle à la surface de l'électrode, et la vitesse de dépôt est limitée par la vitesse de migration des réactifs M^{z+} vers l'électrode. Si l'on impose à l'électrode une densité de courant supérieure à i_L (densité de courant limite) alors le potentiel d'électrode va changer jusqu'à ce qu'il se produise des phénomènes autres que la réduction des espèces M^{z+} . Ainsi, la qualité du dépôt va dépendre de la densité de courant imposée par rapport à cette valeur limite i_L . Le graphique de la figure 1-12 montre approximativement l'influence de ce paramètre sur la qualité d'un dépôt de cuivre.

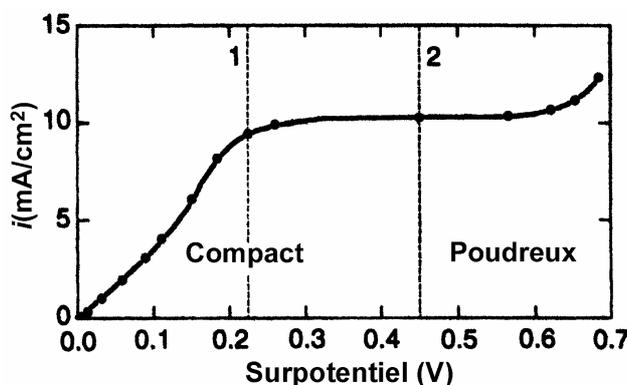


Figure 1-12 : Exemple d'évolution de la qualité de dépôt en fonction du surpotentiel pour une électrodéposition de Cu à partir d'une solution $CuSO_4(0,1 M) + H_2SO_4(0,5 M)$.

5.2.4 Evaluation de la quantité de matériau déposé

La loi de Faraday établit que le nombre de réactions électrochimiques qui se produisent à une électrode est proportionnel à la quantité de charge électrique Q traversant l'électrode. De ce fait, si la masse d'un produit d'électrolyse est w , alors d'après la loi de Faraday (1-7a, 1-7b et 1-7c) :

$$w = ZQ \quad (1-7a)$$

Où Z est une constante de proportionnalité, Q est la charge totale passée durant la période de dépôt.

$$Q = It \quad \text{d'où} \quad w = ZIt \quad (1-7b)$$

La constante Z permet de faire le lien entre la quantité de charge traversant l'électrode et le poids du matériau déposé. Cette constante dépendra de la masse atomique du matériau (A_m en g.Mol^{-1}), du nombre d'électrons n nécessaire pour réduire l'ion du matériau, et enfin de la constante de Faraday F ($F = N_A e$ avec $N_A = 6,0225 \cdot 10^{23} \text{ Mol}^{-1}$ $e = 1,6021 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ d'où $F = 96487 \text{ C.Mol}^{-1}$) qui détermine la charge électrique du nombre d'électrons. La masse finale du matériau déposé sera :

$$Z = \frac{A_m}{nF} \quad \text{d'où} \quad \boxed{w = \frac{A_m}{nF} It} \quad (1-7c)$$

Ainsi w grammes de matériau de masse atomique A_m et de n degré d'ionisation, aura été déposé sous un courant I pendant la période t .

En réalité la totalité des charges participantes au procédé d'électrodéposition ne sont pas exclusivement dédiées à la croissance du matériau souhaité. Une partie de ces charges participe au phénomène de réduction d'autres éléments comme dans le cas du cuivre, de l'hydrogène et des nitrates. Ainsi le calcul par rapport au courant et à la durée de la quantité de matière utile déposée par électrochimie devra tenir compte du rendement (1-8) du processus en termes de répartition des charges.

$$\text{Rendement_en_courant} = \frac{Q_{\text{utile}}}{Q_{\text{totale}}} \quad (1-8)$$

Si nous connaissons la densité d du matériau déposé, il est possible de déterminer une hauteur moyenne h de croissance du matériau sur une surface a en fonction du temps afin de contrôler le dépôt (1-9). Nous avons :

$$h = \frac{V}{a}, \quad V \text{ est le volume du matériau. Or } V = \frac{w}{d} \quad \text{d'où} \quad \boxed{h = \frac{w}{ad} = \frac{A_m It}{nFad}} \quad (1-9)$$

Afin d'exploiter cette équation, il est impératif de connaître le rendement en courant dans le procédé d'électrochimie. Ce rendement est déterminé soit par calcul analytique si l'on connaît tous les phénomènes participant à la réaction, soit expérimentalement.

5.2.5 Passage de l'état hydraté à la structure métallique

Au cours de l'électrodéposition de métal, un ion métallique M^{z+} est transféré de la solution vers la structure cristalline du métal. Cette réaction est accompagnée d'un transfert d'électrons depuis une source externe d'électrons (alimentation en courant) vers le nuage électronique du métal M .

Un métal doit être considéré comme étant une structure cristalline fixe d'ions positifs imprégnée d'électrons libres. Les ions positifs représentent la structure atomique tandis que les charges négatives sont les électrons de valence. Les électrons libres qualifiés de "nuage électronique" à l'intérieur du métal peuvent circuler quasi-librement à l'intérieur du volume du métal. Chaque atome contribue par ses électrons de valence à la formation du nuage électronique à l'intérieur de la structure métallique. Les interactions entre les ions métalliques et les électrons libres sont en grande partie à l'origine de la liaison métallique.

La surface d'un dépôt électrochimique n'est pas parfaitement plane. Elle serait alors lisse, dépourvue de tous défauts, considérée comme idéale. Une surface réelle, d'aspect rugueux, comporte une grande variété et quantité d'imperfections comme des trous, des grains et impuretés, des dislocations, des décrochés, des marches ou encore d'atomes isolés sur la surface etc... Quelques exemples d'imperfections de surface sont représentés sur la figure 1-13.

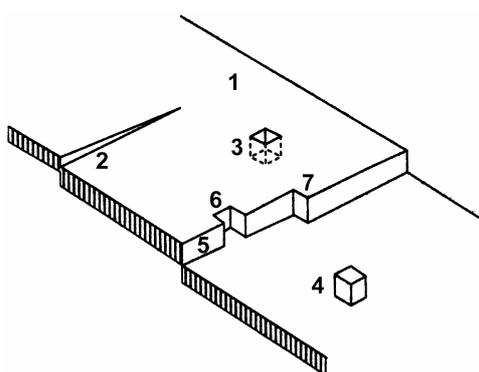


Figure 1-13 : Les imperfections de surfaces : 1 face plane parfaite : terrasse ; 2 défaut d'alignement : dislocation vis ; 3 lacune : atome vacant sur une terrasse ; 4 atome isolé sur une terrasse ; 5 marche d'un atome sur la surface ; 6 espace vacant d'un atome sur flanc de marche ; 7 décroché

Le phénomène d'électrodéposition au niveau atomique est le passage des ions métalliques en solution, donc hydratés, vers la structure cristalline du métal. Ce transfert des ions

métalliques de l'état hydraté en solution vers la structure cristalline du métal s'effectue sur des sites ou défauts particuliers de la structure. Ces sites sont d'autant plus favorables à la capture d'ions M^{z+} qu'ils présentent de parois atomiques. Typiquement, ce sont les décrochés figure 1-14 qui attirent en priorité les ions hydratés.

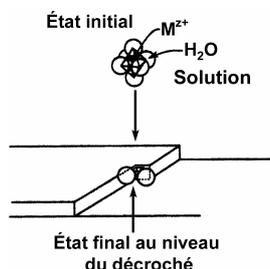


Figure 1-14 : Passage d'un ion de la solution vers la structure au niveau d'un site favorable.

Si l'ion métallique arrive sur un autre type de site, moins favorable pour la structure, il pourra se produire une migration de cet ion vers un site plus favorable figure 1-15.

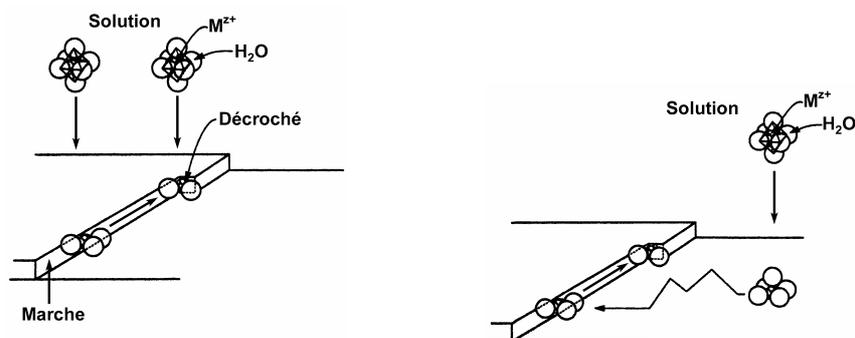


Figure 1-15 : Migration d'un ion passé de la solution vers la structure, vers un site favorable

5.2.6 Courant pulsé

Hormis la valeur moyenne du courant d'électrodéposition, la forme de ce courant est également déterminante. En effet, différentes formes de courant sont utilisées en électrochimie allant du courant continu au courant pulsé avec différentes formes d'onde représenté en figure 1-16.

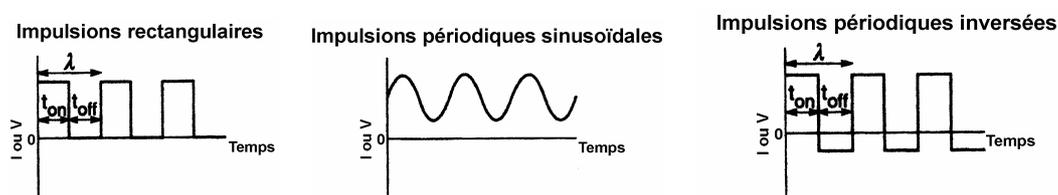


Figure 1-16 : Différentes formes d'onde de courants pulsés

L'utilisation des courants pulsés permet d'améliorer la distribution, le nivellement et la brillance du dépôt. Ces propriétés sont liées à la modification de la couche de diffusion et du mouvement des ions au voisinage de l'électrode par la variation du courant [52][53].

5.2.7 Influence de différents paramètres sur le procédé d'électrochimie

Nous avons vu le principe de base de l'électrochimie, il apparaît cependant qu'un grand nombre de facteurs ont un rôle prépondérant dans le procédé d'électrodéposition. Comme nous l'avons vu, la densité de courant ainsi que sa forme d'onde participent grandement à la qualité du dépôt. En effet, le courant va modifier la répartition des ions au niveau de la surface de l'électrode, le réarrangement des atomes à la surface du réseau cristallin du métal déposé et ainsi la distribution globale de la croissance métallique.

D'autres paramètres tout aussi importants vont également contribuer à la qualité du dépôt. Ces paramètres sont aussi variés que la concentration en ions, le type et la vitesse d'agitation, la température de la solution, la géométrie et la disposition des électrodes dans le banc d'électrochimie ou encore la forme des motifs dans lesquels le métal vient croître. Tous ces facteurs sont corrélés et leurs influences propres sur les dépôts sont extrêmement délicates à déterminer.

5.3. Couches d'accrochage

L'opération d'électrolyse met en jeu une circulation d'ions métalliques et par conséquent d'un courant électrique. Pour être déposé, ces ions doivent entrer en contact et adhérer sur une électrode conductrice (cathode) avec laquelle ils échangent des électrons. La couche dite d'accrochage doit ainsi assurer à la fois les fonctions de fixation du dépôt métallique et de conduction du courant électrique. La résistance électrique de cette couche doit être suffisamment faible pour assurer une distribution uniforme du courant, et son adhérence au substrat doit être forte [49]. Plusieurs techniques ont été développées pour préparer les substrats à l'électrodéposition. La méthode utilisée en micro-électronique consiste à déposer par PVD (évaporation ou pulvérisation cathodique) une couche de métal à haute adhérence, recouverte d'une couche conductrice épaisse. Les métaux qui s'oxydent facilement au contact de l'air peuvent encore être recouverts d'une couche dite de protection.

Dans un dépôt de couches métalliques de natures différentes, des problèmes de diffusion peuvent apparaître et avoir des effets néfastes : c'est le cas de la diffusion du cuivre à travers sa couche de protection en or. Toutefois ce phénomène peut être bénéfique si l'on regarde le cas de l'interdiffusion du chrome et du cuivre, qui augmente leur cohésion. La diffusion peut être stoppée par dépôt d'une couche intermédiaire appelée barrière de diffusion. Le nickel est généralement utilisé comme barrière de diffusion entre le cuivre et l'or.

L'adhérence au substrat est un paramètre très important. Il s'agit en quelque sorte d'une soudure (chimique ou physique) entre différents matériaux. Les couches cathodiques sont généralement déposées par PVD et composées d'un film mince d'adhérence, pouvant servir de barrière de diffusion vers le substrat, et d'une couche conductrice plus épaisse. En fonction du procédé de fabrication choisi, différentes combinaisons sont employées comme : Cr\Cu, Cr\Cu\Cr, Cr\Au, Cr\Ag, Ti, Ti\Au, Ti\Ni\Pd, TiW\Au,... [49]. Parmi les métaux couramment utilisés qui adhèrent le mieux sur les isolants, citons : Cr, Ti, Au, Mo,... qui établissent des liaisons stables avec l'oxygène de surface. La couche conductrice est très souvent formée à l'aide du métal à déposer, afin de réduire l'effet de décalage des réseaux cristallins et de stress.

5.4. Mise en œuvre des résines (isolant et moules) [50]

Lors de l'élaboration de dispositifs microélectroniques, le procédé clé de la fabrication est la photolithographie. En effet, la majeure partie des procédés (gravure, dopage, métallisation etc...) utilisés pour la réalisation de composant électronique en technologie "planar" emploient cette technique. Elle est basée sur la reproduction de l'image d'un masque sur une couche de résine photosensible qui, suivant sa nature chimique, reproduit l'image du masque en positif ou en négatif par des pleins et des vides. Le principe de base de ce type de procédé est la dénaturation d'un polymère par exposition à un rayonnement au travers d'un masque. Le rayonnement peut être de différente nature : lumière visible, ultraviolet, faisceau d'électrons, rayons X etc... Trois types de résine sont utilisés : positive, négative ou réversible (amélioration d'une résine positive par l'adjonction de monazoline). Les résines sont formées de trois composants : le solvant, le polymère et le composé photoactif.

Le solvant permet de maintenir le polymère et le photoinitiateur en solution. La concentration en solvant va permettre de jouer sur la viscosité de la résine et de ce fait sur son épaisseur lors de son enduction.

Le polymère confère à la résine ses propriétés d'adhérence, d'étalement et sa résistance aux contraintes physique et chimique.

Le composé photosensible quant à lui va offrir la sensibilité de la résine lors de l'exposition. Il va être soit inhibiteur dans le cas de résine positive, c'est-à-dire qu'il va rendre les parties exposées solubles dans le révélateur, soit activateur dans le cas de résine négative où il va activer la polymérisation des parties exposées.

5.4.1 Résine positive

Le solvant : Mélange de N-butyl acétate, xylène, PGMEA (1 méthoxy-2propyl acétate)

Polymère : Métacrésol-formaldéhyde, chaîne du type novolaque de faible poids moléculaire soluble dans le révélateur alcalin.

Composé photoactif : une diazonaphtoquinone insoluble dans le révélateur.

Principe : En l'absence d'irradiation, la diazonaphtoquinone forme un complexe avec la résine, diminuant ainsi la solubilité dans le révélateur. En présence d'irradiation il y a décomposition photochimique de la diazonaphtoquinone. Ceci donne un cétène, l'hydrolyse de ce cétène donne un acide carboxylique soluble dans le révélateur. Ainsi, sans la diazonaphtoquinone qui maintenait les chaînes novolaques entre elles, la résine devient soluble dans le révélateur.

5.4.2 Résine négative :

Solvant : c'est un solvant aromatique xylène, diméthyl-benzène, toluène.

Polymère : Polyisoprène (caoutchouc synthétique)

Composé photosensible : Aryldiazide

Principe : En l'absence d'irradiation, la résine est soluble dans le révélateur, le composé photoactif agit comme activateur de dissolution. En présence d'irradiation, il va se transformer en nitrène, qui créera des liaisons transverses avec les chaînes du polymère (réticulation).

Les réactions d'un rayonnement sur les résines photosensibles sont de trois sortes :

- *La polymérisation* d'un monomère, c'est-à-dire la formation d'une chaîne macromoléculaire à partir d'une petite molécule. Ce phénomène est peu exploité en microlithographie car la résine est déjà constituée de polymère.
- *La réticulation* des chaînes polymères, c'est-à-dire l'apparition de liaisons de pontage entre ces chaînes. Ceci engendre une augmentation de la masse moléculaire et une insolubilité des zones irradiées par formation d'un réseau tridimensionnel (résines négatives)
- *La scission* des chaînes polymères, c'est-à-dire la rupture de certaines liaisons dans les chaînes elles-mêmes, conduisant à des fragments de masse moléculaire plus faible que celle de la résine. La solubilité est ainsi accrue (résines positives).

En réalité pour les résines organiques positive ou négative les deux types de phénomène, réticulation et scission sont présents. En fonction du type de résine, l'un est prépondérant par rapport à l'autre.

D'un point de vue mise en œuvre, les propriétés optiques d'une résine vont directement agir sur la résolution et l'épaisseur envisageable de celle-ci. Le contraste et la sensibilité d'une résine photosensible vont déterminer le degré de verticalité des flancs des motifs et par conséquent déterminer la résolution. Des phénomènes de diffraction et de dispersion pourront diminuer le contraste des résines. L'absorption du rayonnement dans le volume de la résine va limiter l'épaisseur de celle-ci. En effet, il faut que les agents photosensibles soient activés sur la totalité de l'épaisseur de la résine.

Le choix de l'utilisation du type de résine va s'établir en fonction des objectifs visés. En effet, les résines positive et négative n'ont pas les mêmes propriétés physico-chimiques. Les résines négatives ont une bonne tenue face aux agents chimiques, et une stabilité dans le temps supérieure à celle des résines positives. Une fois traitées le retrait de ces résines est difficile. À l'inverse les résines positives sont plus sensibles aux agents extérieurs et elles seront utilisées lors d'étapes ponctuelles et peu agressives pour la résine.

Lors de la réalisation de nos dispositifs, les résines vont avoir un rôle important. Nous utiliserons des résines positives pour les étapes de métallisation et notamment pour l'attaque de la couche d'accrochage pour réaliser les amenées de courant.

Afin de former les motifs métalliques que nous allons déposer par électrochimie, nous utiliserons aussi des moules de résine. Dans ce cas, la résine doit supporter à la fois les agents chimiques du bain d'électrochimie et, dans l'optique d'une utilisation en tant qu'isolant, montrer des aptitudes à la tenue dans le temps. Dans ce cas, une résine négative sera la plus appropriée.

5.5. Étapes de fabrication relatives aux grandes familles de microbobine

Après avoir vu les procédés utilisés en microélectronique pour fabriquer des dispositifs 3D, nous allons décrire les principales étapes de réalisation des structures de base des bobines intégrées. Ces grandes lignes de réalisation de structures de microbobines sont inspirées d'une recherche bibliographique et peuvent faire l'objet d'améliorations en termes de topologie ou de choix de matériaux. Ces étapes ne sont qu'indicatives au regard de la complexité de la réalisation de ces dispositifs.

5.5.1 Bobine de type "spirale"

Les étapes de fabrication consistent à déposer sur un substrat de silicium isolé par oxydation, une couche magnétique soit par "sputtering", soit par électrochimie à travers un moule. Puis au-dessus de celle-ci nous déposons une couche isolante. Nous déposons la spirale par électrolyse au travers d'un moule aménagé sur une couche d'accrochage. Pour terminer l'empilement, une couche d'isolant puis une nouvelle couche magnétique sont déposées. La figure 1-17 illustre les étapes de fabrication de ce type de bobine :

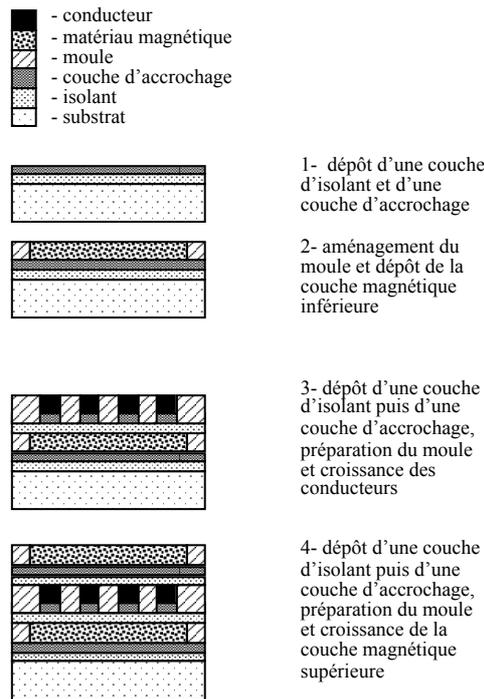


Figure 1-17: Étapes de fabrication pour une bobine de type "spirale"

5.5.2 Bobine "toroïdale"

Pour cette topologie, l'exemple de réalisation s'inspire des travaux de C. H. Ahn et al [36]. Sur une plaquette de silicium oxydée, une couche d'accrochage a été déposée (Cr\Cu\Cr), puis un moule en polyimide pour les conducteurs inférieurs a été aménagé. Sur les brins en cuivre, obtenus par croissance électrochimique, on dépose une couche d'isolant en polyimide. Une nouvelle couche d'accrochage et un nouveau moule sont réalisés pour le dépôt du noyau en NiFe (81%/19%), puis une couche isolante est ajoutée par-dessus. Pour préparer le contact entre brins inférieurs et supérieurs, le polyimide est gravé au niveau des extrémités des brins enterrés jusqu'à ce qu'ils soient dégagés. Ces trous verticaux sont remplis de cuivre par électrochimie. Enfin, une nouvelle couche d'accrochage et un nouveau moule

sont mis en place pour déposer les brins supérieurs qui viennent fermer les spires. La figure 1–18 illustre l'enchaînement des étapes technologiques :

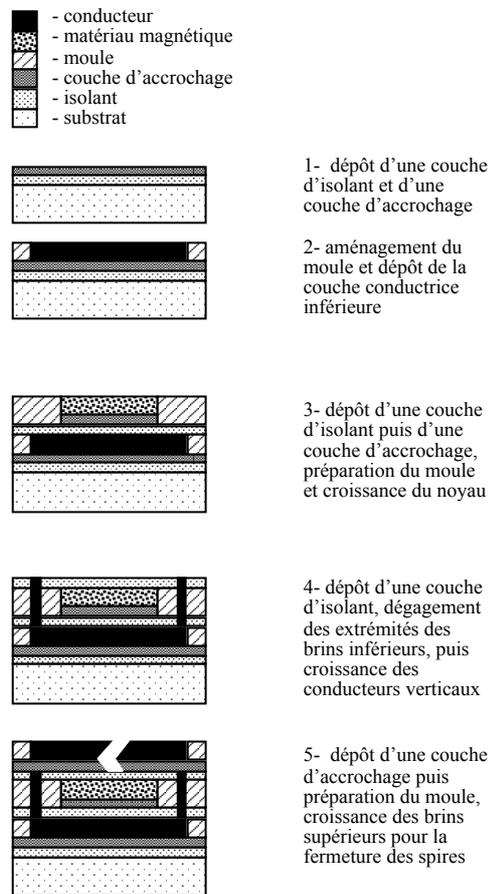


Figure 1-18: Etapes technologiques de fabrication des bobines toroïdales

Löchel et al [37] ont réalisé des structures similaires en utilisant des résines photosensibles moins coûteuses et plus simples d'emploi que les polyimides. Ils ont employé une technique de couches sacrificielles en cuivre pour déposer un conducteur en or et un noyau en NiFe. Avec cette méthode, les produits d'attaque des métaux doivent être sélectifs avec un rapport de gravure important, afin de pouvoir éliminer le cuivre sans endommager le reste du dispositif.

5.5.3 Bobine "en serpentín"

Le procédé typique d'élaboration consiste à déposer sur un substrat isolant une couche d'accrochage, puis un moule pour les parties inférieures du noyau. Ces parties de noyau sont fabriquées par électrochimie, puis recouvertes d'une couche d'isolant. Une nouvelle couche d'accrochage et un nouveau moule sont réalisés pour le dépôt du conducteur, puis une couche isolante est ajoutée par-dessus. Pour assurer la continuité du circuit magnétique, l'isolant est

gravé au niveau des extrémités des blocs enterrés jusqu'à ce qu'ils soient dégagés. Ces trous verticaux sont remplis par électrolyse de matériau magnétique. Une nouvelle couche d'accrochage et un nouveau moule sont mis en place pour fermer le noyau magnétique [35], [36]. La figure 1-19 illustre l'enchaînement des étapes technologiques :

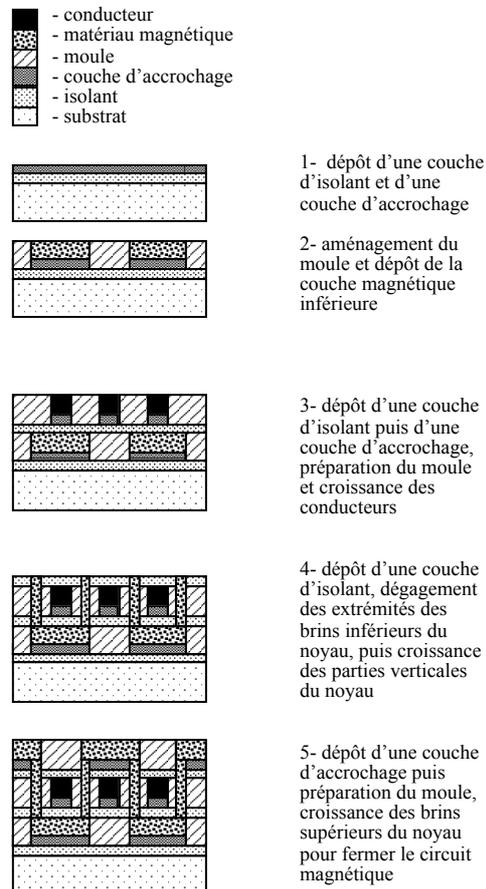


Figure 1 19: Etapes technologiques de fabrication des bobines de type "serpentin"

6. Conclusion

Nous avons fait dans ce chapitre un état de l'art en termes de réalisation de microbobine. Nous avons vu que les microbobines sont présentes dans des domaines aussi variés que les hyperfréquences, les capteurs, les micromoteurs ou l'électronique de puissance. Après études bibliographiques, nous voyons une disparité des avancées dans ces différents domaines. Notamment il apparaît un net déficit en termes de développement pour les applications orientées petite puissance. Des travaux ont malgré tout fait avancé l'étude de ces composants dans ce domaine et on peut distinguer trois familles de microbobines dédiées aux applications pour les petites puissances : spirale, toroïdale et en serpent. Toutefois pour le moment, nous sommes loin d'une industrialisation massive de ce type de dispositifs. Ceci est dû à la difficulté de mise en œuvre des procédés technologiques utilisés dans l'élaboration de ces composants (résine épaisse, empilement, électrochimie...).

7. Références bibliographiques

- [1] The Modeling, Characterization, and Design of Monolithic Inductors for Silicon RF IC's. Long et Copeland. IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol 32, N°3, mars 1997.
- [2] Microwave inductors and capacitors in standard multilevel interconnect silicon technology. Joachim N. Burghartz et al. IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, vol 44, N° 1, janvier 1996.
- [3] Measurement and Modelling of Si Integrated Inductors. Arcioni et al. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol 47, N° 5, octobre 1998.
- [4] A 1.8-GHz Low-Phase-Noise CMOS VCO Using Optimized Hollow Spiral Inductors. Craninckx et Steyaert. IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol 32, N° 5, mai 1997.
- [5] On-Chip Spiral Inductors with Patterned Ground Shields for Si-Based RF IC's. Yue et Wong. IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol 33, N° 5, mai 1998.
- [6] Characterization of a Planar Spiral Inductor on a Composite-Resin Low-Impedance Substrate and Its Application to Microwave Circuits. Okabe et al. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology - Part B, vol 21, N° 3, août 1998.
- [7] Study of integrated RF passive components performed using CMOS and Si micromachining technologies. López-Villegas et al. Journal of Micromachining and Microengineering, 7, 1997, 162-164.
- [8] CMOS foundry-based micromachining. Tilmans et al. Journal of Micromachining and Microengineering, 6, 1996, 122-127.
- [9] Monolithic High-Performance Three-Dimensional Coil Inductors for Wireless Communication Applications. Young et al. IEEE IEDM 97.
- [10] Integrated, variable-reluctance magnetic minimotor. O'sullivan et al. IBM Journal of Research and Development, vol 42, N° 5, septembre 1998.
- [11] A Planar Variable Reluctance Magnetic Micromotor with Fully Integrated Stator and Coils. Ahn et al. Journal of Microelectromechanical Systems, vol 2, N° 4, décembre 1993.
- [12] A new fabrication process of a planar coil using photosensitive polyimide and electroplating. Watanabe et al. Sensors and Actuators A, 54, 1996.
- [13] A Fully Integrated Surface Micromachined Magnetic Microactuator with a Multilevel Meander Magnetic Core. Ahn et al. Journal of Microelectromechanical Systems, vol 2, N° 1, mars 1993.
- [14] An energy-based design criterion for magnetic microactuators. Nami et al. Journal of Micromachining and Microengineering, 6, 1996, 337-344.

- [15] A comparative study of some electromagnetically integrated structures in hybrid technology. Hofsager et al. IEEE Power Electronics Specialists Conference 1998, pp 1957-1963.
- [16] Design of a High-Frequency Planar Power Transformer in Multilayer Technology. Van Der Linde et al. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol 38, N° 2, avril 1991.
- [17] Technology for manufacture of integrated planar L-C structures for power electronic applications. Smit et al. EPE, 13-16 septembre 1993, pp 173-178.
- [18] Technology for planar integrated output filters for hybrids. Marais et al. EPE 1997, pp 3.129-3.133.
- [19] A new hybrid technology for planar microtransformer fabrication. Dezuari et al. Sensors and Actuators A, 71, 1998.
- [20] A Low Profile Type High Frequency Transformer Using A Fine Grained Mn-Zn Ferrite. Itoh et al. IEEE Power Electronics Specialists Conference 1998, pp 1492-1498.
- [21] Fine grained Mn-Zn ferrite for high frequency driving. Takadate et al. Journal of Applied Physics, vol 83, N° 11, 1 juin 1998.
- [22] Development of high frequency coreless transformer using thick film polymer technology. Arshak et Almkhatar. Microelectronics Journal, 30, 1999.
- [23] An accurate circuit model for coreless PCB-based transformers. Hui et al. EPE 1997, pp 4.123- 4.128.
- [24] Integrated Inductors for Low Cost Electronic Packages. Allen. IEEE IEDM 1995, pp 137-141.
- [25] MMIC design. Robertson. IEE circuits and systems series 7.
- [26] The Optimum Chip Size of a Thin Film Reactor for a High-Efficiency Operation of a Micro DC-DC Converter. Sugahara et al. IEEE Power Electronics Specialists Conference 1998, pp 1499-1503.
- [27] Compatibilité électromagnétique, bruits et perturbations radioélectriques. Degauque et Hamelin. Dunod.
- [28] Electromagnetic Compatibility, applied principles of cost-effective control of electromagnetic interference and hazards. Schlicke. Marcel Dekker, inc.
- [29] Compatibilité électromagnétique. Ianovici et Morf. Presses polytechniques romandes.
- [30] A planar micromachined spiral inductor for integrated magnetic microactuator applications. Ahn et Allen. Journal of Micromachining and Microengineering, 3, 1993, 37-44.
- [31] Design of Microfabricated Inductors. Daniel et al. IEEE Power Electronics Specialists Conference 1996, pp 1447-1455.

- [32] Measured Performance of a High-Power-Density Microfabricated Transformer in a DC-DC Converter. Sullivan et Sanders. IEEE Power Electronics Specialists Conference 1996, pp 287-294.
- [33] Design of Microfabricated Transformers and Inductors for High-Frequency Power Conversion. Sullivan et Sanders. IEEE Transactions on Power Electronics, vol 11, N° 2, mars 1996.
- [34] Capacitance, inductance, and crosstalk analysis. Walker. Artech House.
- [35] A Comparison of Two Micromachined Inductors (Bar- and Meander-Type) for Fully Integrated Boost DC/DC Power Converters. Ahn et Allen. IEEE Transactions on Power Electronics, vol 11, N° 2, mars 1996.
- [36] Micromachined Planar Inductors on Silicon Wafers for MEMS Applications. Ahn et Allen. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol 45, N° 6, décembre 1998.
- [37] Microcoils fabricated by UV depth lithography and galvanoplatin. Löchel et al. Sensors and Actuators A, 54, 1996.
- [38] A New Planar Microtransformer for Use in Micro-Switching Converters. Mino et al. IEEE Transactions on Magnetics, vol 28, N° 4, juillet 1992.
- [39] Micro-Transformer Devices Using Thin-Film Electroplated Deposition. Lotfi et al. IEEE Power Electronics Specialists Conference 1998, pp 1511-1515.
- [40] New applications of nanocrystalline Fe(Co-Fe)-Hf-O magnetic films to micromagnetic devices. Sato et al. Journal of Applied Physics, vol 83, N° 11, 1 juin 1998.
- [41] High-frequency permeability of soft-magnetic Fe-Hf-O films with high resistivity. Huijbregtse et al. Journal of Applied Physics, vol 83, N° 3, 1 février 1998.
- [42] Study of frequency dependencies of the complex magnetic ac-permeability aftereffect in amorphous Fe-Co-B. Turtelli et al. Journal of Applied Physics, vol 83, N° 3, 1 février 1998.
- [43] Planar fluxgate sensors: experimental data and theoretical analysis. Wende et al. Sensors and Actuators A, 61, 1997.
- [44] Modeling of Core Losses for Soft Ferrites. Rousseau et al. IEEE Power Electronics Specialists Conference 1998, p 1486.
- [45] Copper micromoulding process for NMR microinductors realization. A.-L. Coutrot et al. Sensors and Actuators A, 99, 2002, p 49.
- [46] Soft-magnetic fluxguide materials. F. Roozeboom et al. Philips Journal of Research, vol 51, N°1 1998, p 59.
- [47] Cours d'électrotechnique. 2. traitement de l'énergie électrique. J.L. Dalmasso. DIA technique supérieur. Belin.

- [48] Modern Electroplating. M. Schlesinger and M. Paunovic. Electrochemical Society Series.
- [49] Electrodeposition of 3D microstructures on silicon. Gobet et al. Journal of Micromachining and Microengineering, 3, 1993, 123-130.
- [50] Cours de technologie microélectronique et micro systèmes. TEAM. La photolithographie. F. Rossel et N. Fabre
- [51] Integration de composant passifs sur silicium, Doctorat de H. Hakim, Institut National des Sciences Appliquées, Toulouse, 10 Juillet 2001, N°600, 144p., Président: J.-M. Dorkel, Rapporteurs: F. Costa, C. Schaeffer, Examineurs: H. Foche, P. Merle, J.-B. Quoirin, Directeurs de thèse: J.-P. Laur, J.-L. Sanchez
- [52] Effects of deposition modes on the microstructure of copper deposits from an acidic sulfate bath. Chi-Chang Hu et al. Surface and Coatings Technology. Volume 176, Issue 1, November-December 2003, Pages 75-83.
- [53] Pulse an pulse-reverse electroplating. N.V. Mandich. Metal Finishing, Volume 98, Issue 1 , 2000, Pages 375-380
- [54] Magnetic Anneal and Ordering in Fe-Ni Alloys Enhanced by Excess of Vacancies. A. Ferro et al. IEEE Transactions on Magnetics, Volume Mag-2, N°4, 1966, Pages 764-768
- [55] Design, Optimization of RF Spiral Inductors Using Scalable Compact and Accurance Models. See-Chuan Leong. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, N°37, 2003, Pages 165-177

Chapitre II : Le microconvertisseur et dimensionnement de bobine.

1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons fait un état de l'art sur ce que nous rencontrons actuellement dans la littérature scientifique en termes de micro-bobine. Nous allons, dans ce chapitre, recentrer notre étude sur nos besoins et sur les applications visées. Cela nous conduira aux spécifications d'un micro-convertisseur qui sera notre point de départ pour l'étude d'une micro-bobine. À partir des conditions de fonctionnement de ce système, nous estimerons les valeurs requises pour le dimensionnement des composants passifs nécessaires. Ensuite nous sélectionnerons les matériaux qui seront utilisés pour la réalisation de la micro-bobine. En tenant compte des caractéristiques électrique et magnétique des matériaux choisis, nous évaluerons les contraintes géométriques du composant. Ces contraintes géométriques sont les relations liant la fréquence de fonctionnement, la longueur, la section et le volume du noyau magnétique, le nombre de spire, la longueur et la section du conducteur avec la valeur d'inductance, la quantité d'énergie magnétique stockée et la résistance du conducteur requise dans les spécifications du micro-convertisseur. Nous verrons enfin les effets liés au fonctionnement en haute fréquence sur le noyau et le conducteur de la bobine et nous proposerons des solutions afin de remédier à ces phénomènes indésirables.

2. Besoins et applications

La micro-bobine que nous souhaitons développer s'inscrit dans une orientation générale tendant vers la miniaturisation et l'intégration totale des systèmes de petite puissance. Les applications visées sont l'électronique portable, dont la tendance va toujours dans le sens de la réduction en taille et en nombre de composants, ou encore les alimentations sur carte électronique comportant des composants fonctionnant avec des tensions spécifiques, et qui nécessitent une adaptation du niveau de tension in situ. Ainsi nous allons inscrire cette étude dans le domaine de la petite puissance et plus particulièrement celui de la conversion d'énergie.

3. Microconvertisseur

3.1. Cahier des charges d'un micro-convertisseur.

Nous allons nous orienter vers un micro-convertisseur continu-continu abaisseur de tension. La microbobine que nous cherchons à élaborer sera ainsi dimensionnée pour ce type d'application.

Afin d'évaluer ce cas concret, nous allons choisir le cahier des charges suivant :

- Une tension d'entrée de 3,3 Volts
- Une tension de sortie de 1,5 Volts
- Une puissance de sortie de 1 Watt

Ce type de micro-convertisseur permet par exemple d'adapter la tension entre l'accumulateur et le reste du système dans un système de téléphonie portable. Le convertisseur abaisseur de tension de type BUCK synchrone, représenté en figure 2-1, sera retenu. Nous nous tournerons vers un système de conversion le plus simple possible car une isolation galvanique n'est pas envisagée pour le moment.

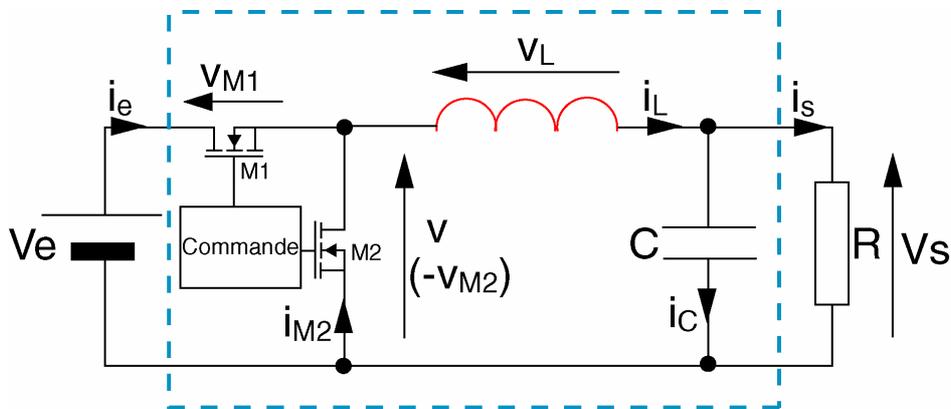


Figure 2-1 : Schéma de principe du convertisseur de configuration BUCK synchrone

Les tension et courant mis en jeu sont relativement faibles, aussi, afin d'accroître le rendement du micro-convertisseur il est impératif de réduire au maximum les pertes à l'intérieur de ce convertisseur.

Afin de rester dans un fonctionnement permettant le contrôle en tension à faible charge, c'est-à-dire indépendant du courant moyen de sortie, nous opterons pour un fonctionnement en conduction continue ou en limite de conduction continue. Ceci nous permettra en outre de pouvoir régler la tension moyenne en sortie en jouant sur la valeur du rapport cyclique.

3.2. Calcul de la valeur d'inductance de la bobine

En se référant aux ouvrages traitant de la conversion d'énergie [1][2], nous pouvons extraire les équations qui vont nous permettre de calculer les valeurs d'inductance et de capacité qui nous seront nécessaires pour la réalisation du micro-convertisseur. Ces équations sont issues d'hypothèses simplificatrices.

L'ondulation en courant est maximale pour $\alpha=1/2$. À cette valeur de rapport cyclique l'ondulation en courant a pour expression (2-1) :

$$(\Delta I_L)_{\max} = \frac{V_e}{4LF} \quad (2-1)$$

Afin de calculer la valeur d'inductance L requise pour notre micro-convertisseur nous allons déterminer la valeur des paramètres inconnus. C'est-à-dire la fréquence de fonctionnement F et la valeur de l'ondulation maximale du courant traversant la bobine $(\Delta I_L)_{\max}$.

Nous allons en premier lieu définir une fréquence de fonctionnement. Nous partirons d'une fréquence de 500 kHz qui devrait être compatible avec des dimensions raisonnables de composant passif dans un objectif d'intégration. Cette valeur est totalement arbitraire et nous servira de point de départ pour le calcul des autres paramètres du convertisseur. Rappelons que le cahier des charges nous impose une tension d'entrée V_e de 3,3V, une tension de sortie moyenne v_{smoy} de 1,5V et ceci pour une puissance moyenne en sortie de 1W.

Les puissance et tension de sortie moyennes nous permettent de calculer le courant moyen de sortie i_{smoy} :

$$i_{smoy} = \frac{P_{smoy}}{v_{smoy}} = \frac{1}{1,5} = 0,666A$$

Or $i_{smoy} = i_{Lmoy} - i_{Cmoy}$, avec $i_{Cmoy} = 0A$ puisque le courant moyen traversant le condensateur est nul en régime permanent, ainsi $i_{smoy} = i_{Lmoy}$.

Nous avons choisi un mode de fonctionnement en limite de conduction continue, c'est-à-dire que le courant dans la bobine est toujours positif et s'annule en un point, la forme du courant est représentée sur la figure 2-2.

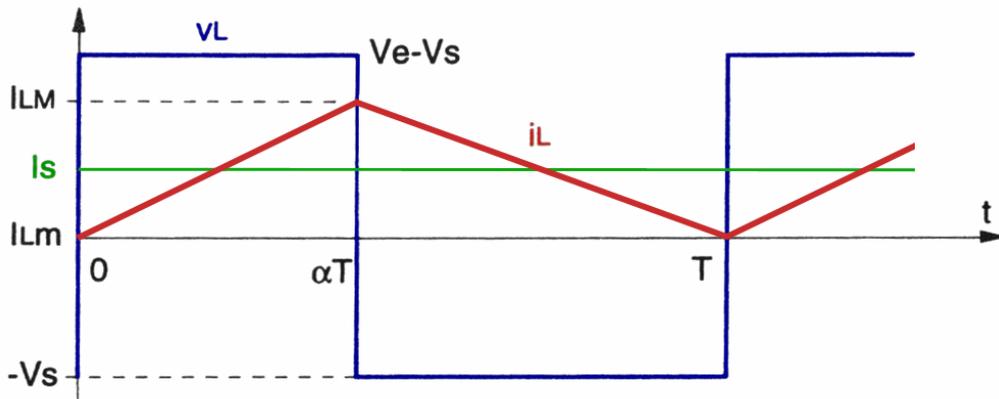


Figure 2-2 : Formes d'ondes pour le calcul de l'ondulation du courant dans la bobine en limite de conduction continue

Pour le mode de conduction critique, l'amplitude crête de courant $(\Delta i_L)_{\max}$ traversant la bobine sera $I_{LM} - I_{Lm}$ avec $I_{Lm} = 0A$ (mode de conduction critique) ainsi $(\Delta i_L)_{\max} = I_{LM} = 2 \cdot i_{Lmoy} = 2 \cdot 0,666 = 1,33A$

D'après la relation (2-1) nous pouvons également écrire :

$$(\Delta i_L)_{\max} = \frac{v_e}{4Lf} = 1,33A$$

Connaissant les valeurs de F et V_e ($f=500kHz$ et $V_e=3,3V$), nous pouvons en tirer la valeur de l'inductance de notre bobine.

$$L = \frac{v_e}{4(\Delta i_L)_{\max} f} \quad (2-2)$$

Ainsi nous devons réaliser une bobine dont l'inductance aura une valeur de $1,25\mu H$.

$$L \approx 1,25\mu H$$

3.3. Calcul de la valeur de capacité du condensateur

Afin de montrer la faisabilité du projet du micro-convertisseur intégré sur silicium, nous allons également amener quelques directions d'étude concernant le condensateur de sortie qui sera également intégré. Le calcul et les informations concernant la réalisation du condensateur sont juste informatifs. Pour le moment, seule la réalisation de la micro-bobine nous intéresse.

L'ondulation en tension maximale est donnée à $\alpha=1/2$

$$(\Delta v_s)_{\max} = \frac{v_e}{32LCF^2} \quad (2-3)$$

Maintenant que nous avons la valeur d'inductance nous pouvons extraire la valeur de la capacité par la relation (2-3).

$$C = \frac{v_e}{32LF^2(\Delta v_s)_{\max}} \quad (2-4)$$

En choisissant une ondulation de la tension de sortie de l'ordre de 10% de la valeur moyenne de v_s , soit $(\Delta v_s)_{\max}=0,15V$ nous obtenons une valeur de capacité de l'ordre de $2,2\mu F$:

$$C \approx 2,2\mu F$$

Cette valeur de capacité très élevée pour une intégration de condensateur reste toutefois possible avec l'utilisation de nouveaux matériaux diélectrique à haute permittivité [3]. De plus, du fait d'un fonctionnement en très basse tension, la tension de claquage du diélectrique restant très faible, l'épaisseur du diélectrique pourra en être diminué d'autant (2-5).

$$C = \frac{S\varepsilon_0\varepsilon_r}{e} \quad (2-5)$$

4. Choix des matériaux

Le choix des matériaux (cf. chap I) que nous allons utiliser dépend de plusieurs paramètres. Les caractéristiques électrique et magnétique en sont les facteurs les plus déterminants de nos choix ainsi que les méthodes de dépôt de ces matériaux. La vitesse de croissance, la reproductibilité, le coût et la compatibilité avec les technologies microélectroniques et MEMS doivent également être pris en compte pour le choix des matériaux et méthodes de dépôt.

Afin de réduire au maximum les pertes dans le conducteur, il nous faudra concevoir des dispositifs dont le conducteur aura une section utile la plus grande possible. De ce fait l'utilisation de fortes épaisseurs de matériau sera nécessaire. La méthode la plus adaptée pour l'obtention de forte épaisseur est l'électrochimie. Cette technique permet à la fois une croissance "rapide" de matériau et une localisation des sites de croissance au moyen d'un jeu d'électrode et de moules. L'électrochimie permet d'obtenir des épaisseurs de plusieurs dizaines de micromètres comparée aux autres techniques de dépôt, comme l'évaporation ou la pulvérisation, qui sont plus adaptées à des croissances de métaux sur des épaisseurs de l'ordre du micromètre.

Dans le but de réduire les étapes technologiques de fabrication des micro-bobines, nos premières investigations en termes de structure nous font tendre vers des topologies dont les matériaux constitutifs, c'est-à-dire le métal du conducteur et le matériau du noyau magnétique, sont sur un même niveau. Il convient ainsi de sélectionner deux matériaux (du

conducteur et du noyau magnétique) que l'on puisse faire croître par électrochimie. Cela nous permettra de générer de fortes épaisseurs de matériau tout en permettant la croissance de matériaux de nature différente sur un même niveau.

Pour l'enroulement de la bobine, il apparaît par comparaison avec d'autres conducteurs présentés dans le chapitre précédent, que le cuivre sera le matériau optimal en termes de résistivité, de dépôt et de coût. En effet, il est possible de faire croître du cuivre par différentes méthodes : évaporation, pulvérisation, électroless et en particulier par électrochimie. Sa résistivité est au environ des $1,8 \mu\Omega.cm$ ce qui est inférieur à l'or et à l'aluminium. Enfin son coût de mise en œuvre est également inférieur à celui de l'or.

Pour le noyau magnétique, nous choisirons l'alliage NiFe dans une proportion de 80% de Nickel et 20% de Fer car il peut également être déposé par électrochimie. C'est un matériau magnétique que nous retrouvons souvent dans la littérature scientifique et qui a fait l'objet de plusieurs travaux. Il est utilisé dans diverses applications dont la réalisation de tête magnétique. À ce titre, nous utiliserons les quelques informations que l'on trouve dans la littérature scientifique ainsi que des produits commerciaux existants pour la mise en œuvre des dépôts électrochimiques de ce matériau. Si l'on se réfère aux travaux traitant de cet alliage, sa perméabilité magnétique relative μ_r est en moyenne de 800 et le champ magnétique maximal B_{max} de 600mT.

Afin d'avoir une première approche de dimensionnement de la bobine nous partirons sur des valeurs typiques de paramètres électriques et magnétiques pour ces matériaux. Pour nos calculs, nous prendrons une résistivité du cuivre ρ_{cu} de $1,8\mu\Omega.cm$. Pour l'alliage Ni₈₀Fe₂₀ nous prendrons les valeurs de perméabilité magnétique rencontrées dans la littérature qui sont de l'ordre de $\mu_r=800$ et d'un champ magnétique maximal B_{max} autour de 600mT pour des dépôts n'ayant pas subi de traitements spécifiques tels que cuisson, dépôt sous champs magnétiques etc...

5. Dimensionnement de la micro-bobine

Nous avons déterminé précédemment la valeur de l'inductance, nécessaire pour le fonctionnement du convertisseur. Cette valeur va déterminer des contraintes géométriques liées par la relation (2-6) [4] :

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 S}{l} \quad (2-6)$$

Où μ_0 est la perméabilité magnétique du vide ($= 4\pi 10^{-7}$), μ_r est la perméabilité magnétique relative du matériau magnétique employé pour réaliser le noyau la bobine. S et l sont les sections et la longueur moyenne du circuit magnétique, N le nombre de spires.

Ainsi les perméabilités magnétiques étant désormais fixées par le NiFe, nous avons la possibilité de faire varier les trois autres paramètres afin de modéliser la géométrie de notre bobine. Pour une utilisation dans le domaine de la puissance, il faut aussi prendre en compte la quantité d'énergie que la bobine est capable de stocker. Cette énergie est stockée sous forme magnétique dans la bobine.

5.1. Stockage de l'énergie magnétique

Les topologies de bobines peuvent être classées en 2 catégories, en fonction du milieu où elles stockent l'énergie magnétique :

- Stockage dans le noyau magnétique
- Stockage dans l'air avec ou sans noyau (entrefer)

La nature du milieu utilisé pour ce stockage d'énergie va influencer de façon significative sur la taille du composant.

La valeur de l'inductance ayant été déterminée pour la limite de conduction discontinue au point de fonctionnement nominal, il est possible de calculer l'énergie à stocker dans ce composant par la relation (2-7) [4] :

$$W = \frac{1}{2} L I_{\max}^2 \quad (2-7)$$

Si l'on applique la relation (2-7) à notre système, c'est-à-dire avec une bobine d'une valeur d'inductance de 1,25 μ H traversée par un courant maximum de 1,33A, il faut stocker une quantité d'énergie de :

$$W = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 10^{-6} \cdot 1,33^2 \approx 1,1 \mu J$$

Afin de déterminer le volume de matériau nécessaire à ce stockage, nous devons connaître la densité volumique d'énergie caractérisant ce matériau.

Cette densité volumique d'énergie que peut supporter un matériau sans qu'il y ait saturation est donnée par l'équation (2-8) :

$$W_{v\max} = \frac{B_{\max}^2}{2 \mu_0 \cdot \mu_r} \quad (2-8)$$

Le volume nécessaire pour stocker l'énergie va donc être fixé par :

- le champ magnétique maximal B_{max} que peut supporter le matériau,
- la perméabilité relative μ_r du matériau.

Dans le cas d'un alliage NiFe et sans entrefer, en prenant les valeurs typiques $\mu_r=800$ et $B_{max}=600\text{mT}$ on obtient en utilisant l'équation (2-8) :

$$W_{v\max} \approx 179\text{J.m}^{-3}$$

Ceci signifie qu'il faut :

$$Vol = \frac{W}{W_{v\max}} = \frac{1,1 \cdot 10^{-6}}{179} \approx 6,14 \cdot 10^{-9} \text{m}^3$$

Soit $6,14\text{mm}^3$ de NiFe pour stocker $1,1\mu\text{J}$. Notons ici que plus la perméabilité magnétique μ_r sera élevée plus le volume du circuit magnétique sera important, pour une induction maximale donnée.

Le même raisonnement peut être appliqué dans l'air. La difficulté est alors de pouvoir choisir B_{max} qui, dans ce cas, devient le champ maximal que peut créer le bobinage. Rappelons que du fait que $\mu_r=1$ pour l'air, on stocke plus d'énergie dans un volume donné d'air que dans ce même volume de NiFe.

Le dimensionnement du circuit magnétique doit également prendre en compte l'existence de pertes et l'apparition de l'effet de peau liés au fonctionnement à haute fréquence du matériau. Ces effets néfastes, qui dégradent les performances du composant, peuvent être réduits en feuilletant les noyaux magnétiques. Ce feuilletage pourra cependant augmenter sensiblement le volume global du noyau. Afin de mieux comprendre les effets de l'augmentation de la fréquence de fonctionnement sur la répartition du champ magnétique dans un noyau en $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$, le L.E.G. (Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble), participant également au projet INDUCSIL, a réalisé des simulations magnétiques utilisant le logiciel Flux 3D [5].

L'échantillon simulé est défini par une longueur de 2mm , une épaisseur de $100\mu\text{m}$, une résistivité de $20 \cdot 10^{-8}\Omega\text{m}$ et une perméabilité magnétique relative de 800 . Ces simulations seront considérées comme des cas généraux et élémentaires que nous pourrons extrapoler à l'ensemble de la structure.

5.2. Simulation 3D en magnétodynamique

5.2.1 Simulation magnétodynamique à 100Hz :

Afin de s'assurer de l'homogénéité du champ dans le matériau NiFe ainsi que de sa répartition, une simulation en magnétodynamique à 100Hz a été effectuée par le L.E.G. [5]. Le résultat de cette simulation est donné en figure 2-3.

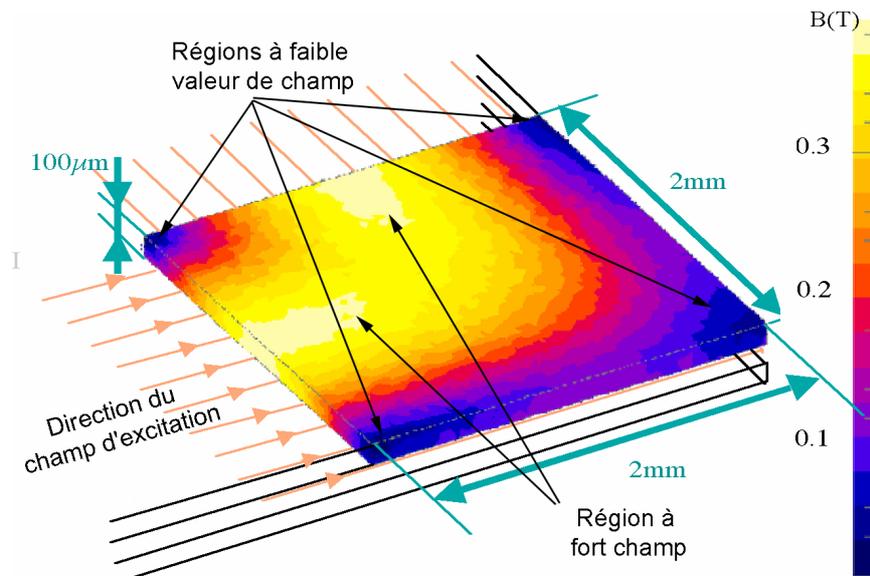


Figure 2-3 : Simulation 3D du noyau magnétique non feuilleté ($f=100\text{Hz}$) [5]

Pour les conditions de simulation, les valeurs typiques du matériau magnétique NiFe ont été prises, c'est-à-dire $\mu_r=800$ et $\rho=20.10^{-8}\Omega.m$. Le courant d'excitation est $I=1,4\text{A}$ et la fréquence $f=100\text{Hz}$.

Sur cette simulation réalisée par le L.E.G. [5], nous pouvons observer une bonne propagation verticale du champ dans le matériau. Les courants de Foucault ne sont donc pas encore suffisamment importants pour modifier la répartition des lignes de champ.

5.2.2 Simulation magnétodynamique à 500kHz :

Pour cette simulation également réalisée par le L.E.G. [5], les conditions de simulation précédentes ont été reprises, c'est-à-dire $\mu_r=800$, $\rho=20.10^{-8}\Omega m$ pour le matériau NiFe et $I=1,4\text{A}$, seule la fréquence f de fonctionnement passe à 500kHz. Nous voyons sur la figure 2-4 [5] que si l'on augmente la fréquence de l'excitation, le matériau ne réagit plus de la même façon. La figure 2-4 montre une vue en coupe de la géométrie.

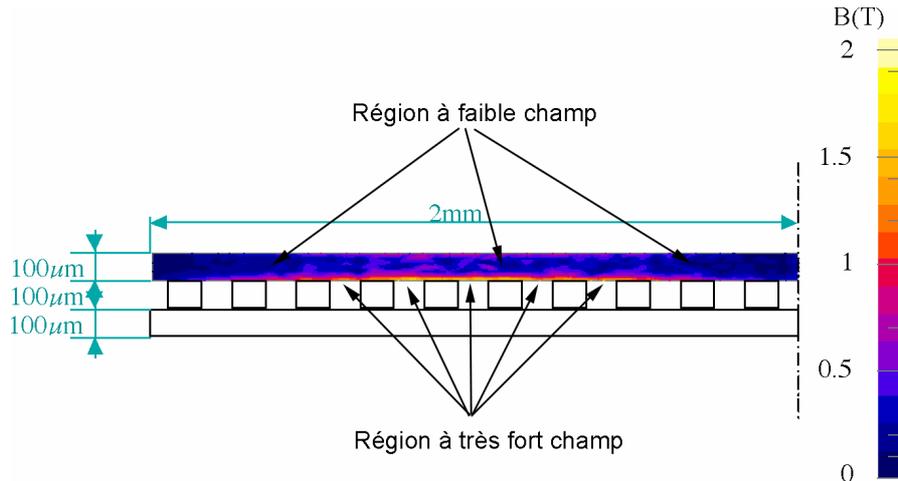


Figure 2-4 : Simulation 3D du noyau magnétique non feuilleté ($f=500\text{kHz}$) [5]

On peut constater sur cette simulation (figure 2-4)[5], que très peu de champ arrive à pénétrer dans le NiFe car des courants de Foucault prennent naissance dans ce matériau. Ainsi les lignes de champ sont repoussées par les courants de Foucault et ont tendance à se concentrer au niveau des parois du bloc de NiFe. Si l'on veut éviter ce phénomène, une solution utilisée en électrotechnique consiste à feuilletter le noyau magnétique.

5.3. Feuilletage du circuit magnétique

La profondeur de peau et donc la pénétration du champ magnétique dans ce matériau suit la loi suivante (2-9) :

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu f}} \quad (2-9)$$

ρ est la résistivité du matériau, $\mu = \mu_0 \mu_r$ sa perméabilité magnétique et f la fréquence de découpage.

Le volume utile du matériau, c'est-à-dire qui participe réellement aux phénomènes magnétiques va dépendre directement du volume délimité par la profondeur de peau.

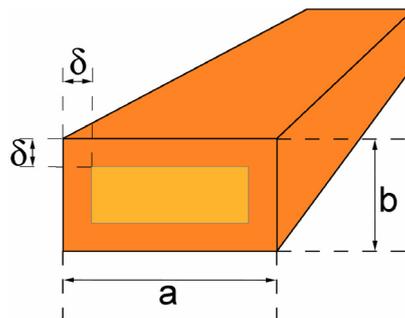


Figure 2-5 : Illustration du volume utile d'un matériau délimité par la profondeur de peau

Concrètement, afin de ne pas perdre en volume utile de matériau magnétique, le noyau ou ses parties élémentaires devront avoir une épaisseur inférieure à 2δ . L'illustration sur la figure 2-5 représente la section d'un barreau magnétique subissant une excitation d'une fréquence suffisante pour faire apparaître le phénomène d'effet de peau. La partie claire à l'intérieur est désertée par les lignes de champ qui se concentrent en périphérie (partie foncée). Ainsi, pour que la section totale d'un barreau magnétique soit utilisée il faut que $a < 2\delta$ ou $b < 2\delta$.

Dans notre cas, la très faible résistivité du NiFe aura un effet néfaste. Si l'on prend pour le NiFe les valeurs typiques suivantes : $\rho = 20 \cdot 10^{-8} \Omega m$, $\mu_r = 800$, la profondeur de peau δ pour une fréquence f de fonctionnement de 500kHz n'est que de $11 \mu m$.

$$\delta_{NiFe} \approx 11 \mu m$$

Sur la portion de structure qui a été simulée et dont les résultats sont illustrés en figure 2-3 et 2-4, il apparaît que le bloc de NiFe présente des dimensions nettement supérieures aux 2δ efficaces. En effet, l'épaisseur minimum du bloc est de $100 \mu m$ alors que l'épaisseur de peau est de $11 \mu m$ à la fréquence de fonctionnement requise. Afin de remédier à ce problème nous allons scinder le bloc de NiFe constituant le noyau magnétique en feuilles d'épaisseur inférieure à 2δ mais dont la somme des volumes est égale au volume de matériau magnétique initialement calculé afin d'obtenir la valeur d'inductance nécessaire.

Deux solutions sont alors envisageables, différenciées par le sens de feuilletage du noyau. Physiquement les deux sens ne présentent pas de différence d'un point de vue magnétique. En revanche, il faudra rechercher la solution la plus simple au niveau de la réalisation et la plus adaptée à l'intégration en technologie planar.

- le feuilletage horizontal (fig. 2-6):

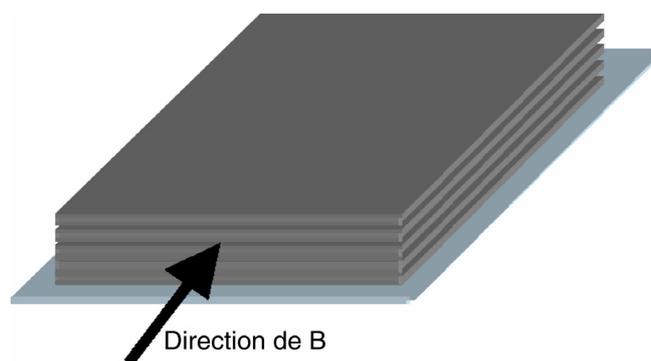
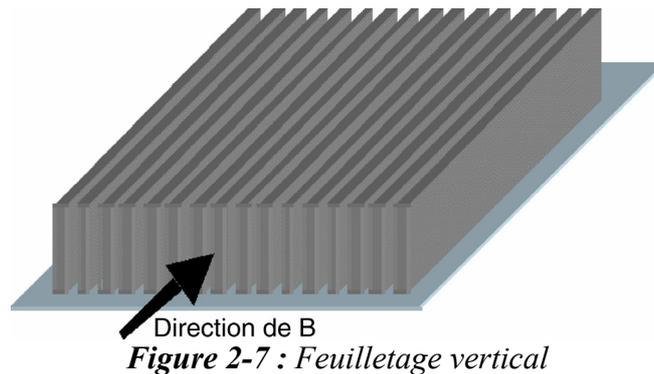


Figure 2-6 : Feuilletage horizontal

Le feuilletage horizontal peut être réalisé en utilisant une isolation par de fin film d'oxyde ou niture entre les feuilles de NiFe. Ceci aura l'avantage de ne pas trop augmenter le volume initial du noyau. Par contre cette disposition nécessite un grand nombre d'étapes technologiques supplémentaires, puisque la réalisation de chaque feuille nécessite deux étapes technologiques. L'ensemble sera long et coûteux à réaliser.

- le feuilletage vertical (fig. 2-7):



Le principal avantage de cette disposition est que toutes les feuilles sont réalisées en une seule étape. Par contre, le moule faisant office d'isolant entre les feuilles de NiFe oblige la présence d'un espacement entre les feuilles assez importantes. L'espacement minimum est imposé par la résistance mécanique et l'adhérence de la résine utilisée comme moule et isolant dans notre technologie d'intégration.

L'analyse faite ci-dessus montre que d'un point de vue technologique le feuilletage vertical est préférable, car plus proche des réalités industrielles.

5.4. Simulation 3D en magnétodynamique du noyau feuilleté

Comme nous l'avons vu précédemment, pour être efficace, ce feuilletage doit être inférieur à 2δ . La simulation réalisée par le L.E.G. [5] du comportement d'une portion de circuit magnétique constituée de 10 feuilles de NiFe de $15\mu\text{m}$ d'épaisseur, de $100\mu\text{m}$ de hauteur et 2mm de longueur, séparées par un isolant de $15\mu\text{m}$ d'épaisseur est représentée sur la figure 2-8.

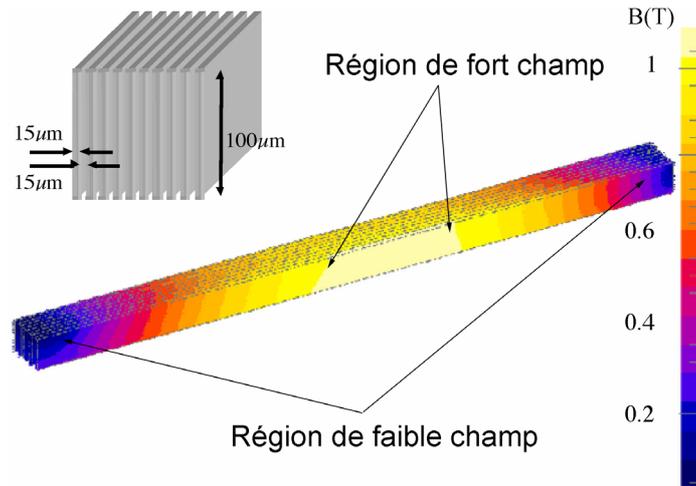


Figure 2-8 : Simulation 3D du noyau magnétique feuilleté ($f=500\text{kHz}$) [5]

Les conditions de simulation sont identiques à celles de la simulation de la figure 2-4.

NiFe : $\mu_r=800$, $\rho=20.10^{-8}\Omega\text{m}$

Excitation : $I=1,4\text{A}$, $f=500\text{kHz}$

Cette simulation permet de mettre en évidence l'effet du feuilletage du circuit magnétique. On note que le champ se propage bien verticalement et que l'intégralité de la hauteur du circuit magnétique est utilisée. Sur cette simulation, seule une petite partie du circuit magnétique a été simulée car le nombre de points de maillage qu'elle nécessite est très important. Néanmoins il est possible d'extrapoler ce résultat pour une structure complète. En effet, la répartition du champ que nous observons à 500kHz dans le matériau feuilleté est similaire à celle obtenue dans un matériau massif à basse fréquence (100Hz). En nous aidant de la simulation de la bobine à basse fréquence nous pourrions déduire, en première approximation, le comportement magnétique à haute fréquence (500kHz). On voit dans cette simulation l'efficacité du feuilletage du noyau magnétique dans la répartition du champ magnétique dans l'intégralité du volume du matériau magnétique.

5.5. Conducteur

La réflexion sur le phénomène d'effet de peau dans le matériau magnétique s'applique également au bobinage. En effet, le cuivre du conducteur sera aussi traversé par les lignes de champ générées par le courant d'excitation passant dans le bobinage. Au même titre que le matériau NiFe du noyau, le cuivre du conducteur est sujet à l'apparition de courants de Foucault au cœur du conducteur qui provoque l'apparition de l'effet de peau. Il convient d'avoir également une approximation de ce phénomène afin d'en tenir compte lors du dimensionnement du bobinage. À partir l'équation 2-9, nous pouvons obtenir une estimation

de la profondeur de peau, de la résistance et des pertes en fonction de la fréquence pour un conducteur rectiligne en cuivre.

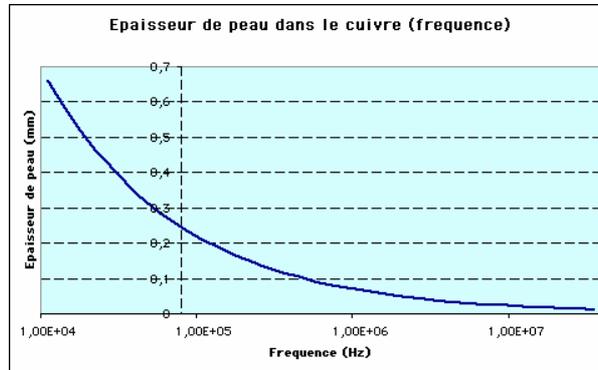


Figure 2-9 : Évaluation de l'épaisseur de peau dans le cuivre en fonction de la fréquence

Nous observons sur ce graphique (figure 2–9) que l'épaisseur de peau dans le cuivre ($\rho_{cu} = 1,7\mu\Omega.cm$ et $\mu_r = 1$) diminue rapidement avec l'augmentation de la fréquence. À partir de cette constatation, nous pouvons estimer la résistance et ainsi les pertes Joules dans un conducteur rectiligne en fonction de la fréquence et de l'épaisseur de matériau. Comme le montre la figure 2-10.

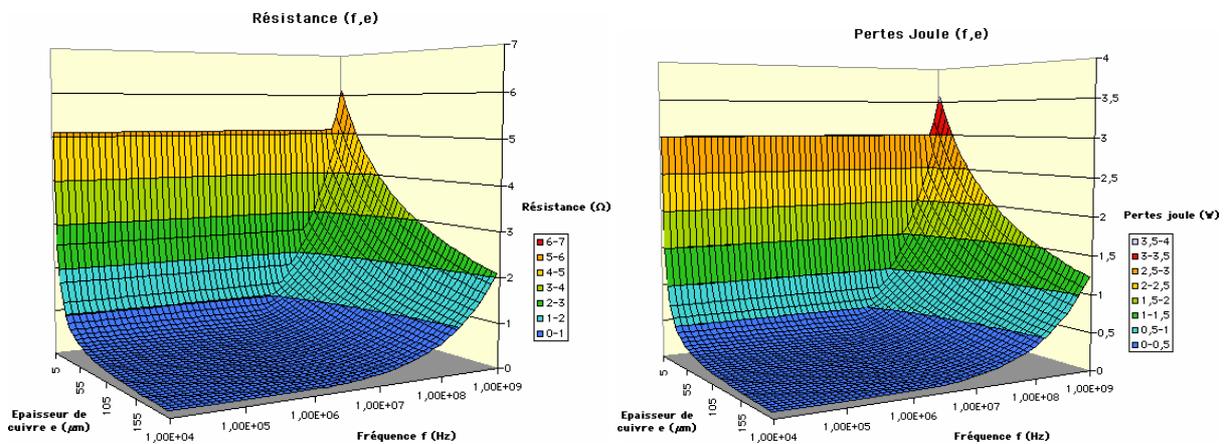


Figure 2-10 : Évaluation de la résistance et des pertes Joule en fonction de la fréquence et de l'épaisseur de cuivre

Ces estimations ont été effectuées pour une résistivité du cuivre de $1,7\mu\Omega.cm$, une longueur de conducteur de 15cm, une largeur de $100\mu m$. Ces dimensions de conducteur sont issues des premières évaluations de micro-bobines. Pour les pertes Joule dans le conducteur nous reprenons le courant de fonctionnement du cahier des charges du micro-convertisseur soit : $I_{eff} = \frac{|I_{LM}|}{\sqrt{3}}$ I_{LM} est la valeur maximale du courant i_L (Cf Fig 2-2) et I_{eff} est la valeur efficace du courant i_L qui est de forme triangulaire.

Nous voyons que pour des épaisseurs de matériau inférieures à 50 μm la résistance et les pertes engendrées seraient trop importantes, supérieures à 0,6 Ω pour la résistance totale et supérieure à 0,3W pour les pertes Joules, soit un tiers de la puissance en sortie du convertisseur.

Ci-dessous, en figure 2-11, un profil de courbe calculée avec les mêmes conditions que précédemment mais en fixant l'épaisseur de cuivre à 100 μm .

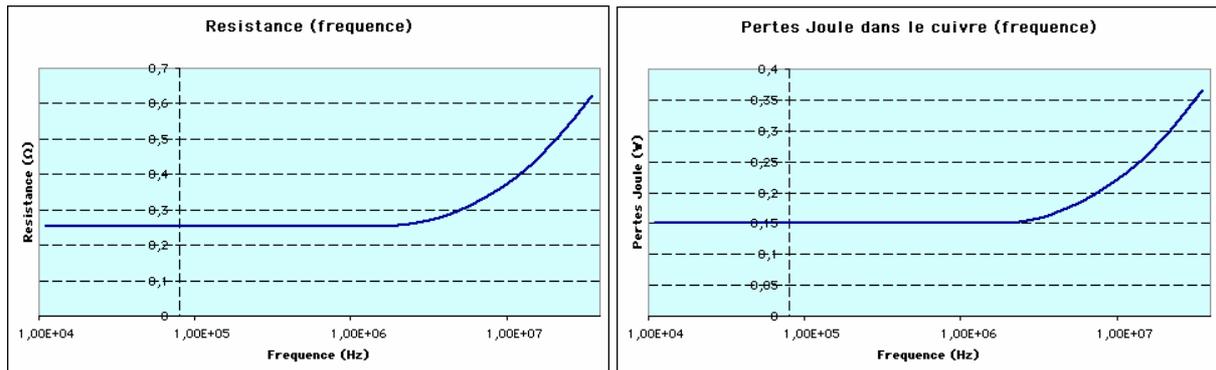


Figure 2-11 : Comportement de la résistance et des pertes Joule en fonction de la fréquence pour une épaisseur de cuivre de 100 μm

Nous voyons que le phénomène d'effet de peau n'intervient qu'aux fréquences supérieures à 1,5MHz pour les dimensions considérées (100 μm X100 μm de section sur 15cm de longueur ; $\rho_{cu}=1,7\mu\Omega.\text{cm}$; $\mu_r=1$).

Dans notre cas, pour la fréquence de fonctionnement f du micro-convertisseur fixée à 500kHz, l'épaisseur de peau est de :

$$\delta_{Cu} \approx 93\mu\text{m}$$

Aussi, lors de la conception du conducteur, nous devons veiller à ce que les dimensions géométriques minimum ne soient pas supérieures 2δ c'est-à-dire 186 μm . Il est toutefois possible de contourner ce problème en multipliant le nombre des conducteurs.

D'autres phénomènes interviennent dans le conducteur comme l'effet de proximité ou les capacités parasites dont nous ne parlerons pas dans cette thèse en raison de la difficulté de déterminer et de simuler l'influence de ces phénomènes sur des structures complexes.

6. Conclusion.

Dans ce chapitre, nous avons établi le point de départ de notre étude sur la réalisation d'une micro-bobine intégrée sur silicium. À partir des applications possibles visées, nous avons déterminé le cahier des charges du micro-convertisseur. Nous avons opté pour un convertisseur non-isolé de type Buck synchrone. À partir des conditions de fonctionnement de ce système, nous avons estimé les valeurs requises pour le dimensionnement des composants passifs nécessaires. Ces valeurs sont l'inductance de la bobine de stockage (cible de notre étude) et la capacité du condensateur de sortie. En se référant à l'état de l'art présenté dans le chapitre précédent, nous avons déterminé les matériaux que nous utiliserons pour la réalisation du composant inductif. À partir des valeurs d'inductance et de puissance ainsi que de la nature des matériaux choisis, nous avons établi les contraintes géométriques du composant. Ensuite au moyen de simulation nous avons mis en évidence des phénomènes d'effet de peau liés au fonctionnement en haute fréquence dans le noyau et dans le conducteur. Afin de remédier à cet inconvénient, surtout présent dans le noyau magnétique de la bobine, nous avons proposé la solution du feuilletage du noyau magnétique.

7. Références bibliographiques

- [1] Alimentation à découpage – convertisseurs à résonance. J.P. Ferrieux F. Forest. Masson collection Technologies
- [2] Les convertisseurs de l'électronique de puissance. R. Bausiere et Al. Lavoisier. collection Tec et Doc
- [3] Novel high capacitance materials:- BaTiO₃:La and CaCu₃Ti₄O₁₂, Journal of the European Ceramic Society, In Press, Corrected Proof, Available online 26 September 2003, Anthony R. West, Timothy B. Adams, Finlay D. Morrison and Derek C. Sinclair
- [4] Génie électrique. R. Mérat et Al. Nathan. Étapes références.
- [5] Contribution à l'intégration d'une inductance sur silicium et étude de son convertisseur synchrone associé, Doctorat de J.-M. Boggetto, Université Joseph Fourier, Grenoble, 16 Octobre 2003, N°600, 263p., Président: J. Roudet, Rapporteurs: J.-L. Sanchez, F. Forest, Examineurs: B. Rivet, Directeurs de thèse: J.-P. Ferrieux, Y. Lembeye.

**Chapitre III : Mise en œuvre des procédés
technologiques pour la fabrication de deux
structures de bobines.**

1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons déterminé le cadre de notre étude, identifié une application de conversion d'énergie et ainsi évalué les caractéristiques électrique et magnétique de la micro-bobine. De ces caractéristiques ont découlé un choix de matériaux conducteur et magnétique. Nous avons également rappelé les relations liant la géométrie des bobines à la valeur d'inductance et à la capacité à stocker de l'énergie magnétique. Nous avons aussi mis en évidence la nécessité de feuilleté le noyau magnétique.

Dans ce chapitre, nous présenterons les principes généraux de réalisation des micro-bobines que nous avons élaborés. Nous présenterons également les moyens technologiques dont nous disposons ainsi que les mises au point spécifiques pour la fabrication des micro-bobines. Ces moyens sont l'électrochimie de matériaux et la photolithographie de résines épaisses. Nous proposerons ensuite deux structures de micro-bobine ainsi que leur procédé de fabrication. La première est la structure "mixte" dont la topologie novatrice diminue le nombre d'étape de fabrication par rapport aux micro-bobines à noyau magnétique que l'on trouve dans la littérature scientifique. La seconde est la structure en "spirale" dont le conducteur en forme de spirale est pris en sandwich par un noyau magnétique feuilleté. Cette structure a été calculée et simulée avec des outils spécifiques par le L.E.G. (Laboratoire d'Électrotechnique de Grenoble) afin de répondre aux spécifications du micro-convertisseur.

2. Principe général de réalisation

Les structures que nous allons réaliser nécessitent la présence d'un noyau magnétique. La présence d'un noyau magnétique permet de réduire les dimensions de nos micro-bobines dans l'optique d'intégration tout en atteignant la valeur d'inductance requise pour le micro-convertisseur. Cette particularité nous impose des topologies comportant plusieurs niveaux et différents types de matériaux : du cuivre pour le conducteur et du NiFe (80/20) pour le noyau magnétique, tous deux déposés par électrochimie. Afin de donner la forme voulue aux matériaux lors de leur dépôt, nous allons utiliser des moules en résine épaisse. Ces moules devront également garantir l'isolation entre les motifs et le maintien de la structure.

3. Moyens technologiques

Nous avons vu que le choix technologique de croissance métallique est imposé par les dimensions et les épaisseurs de la structure. Nous allons ainsi nous orienter vers la méthode de dépôt par électrochimie sur un substrat en silicium. Cette technique implique d'autres choix technologiques. En effet, le principe d'électrochimie est basé sur la circulation d'un courant entre deux électrodes au travers d'un bain électrolytique. L'une des électrodes est constituée du matériau à déposer et se désagrège au fur et mesure du dépôt de matière, alors que la deuxième électrode est le site d'agglomération d'atomes du matériau à déposer. Trois éléments sont nécessaires pour réaliser ce procédé : le banc d'électrochimie (bâti et bain), les moules de structuration et l'électrode de travail où s'effectue le dépôt. Cette dernière n'est autre que la plaquette de silicium rendue localement conductrice au moyen d'une couche métallique dite "d'accrochage".

3.1. Electrochimie

Il est à noter que la mise au point de procédé d'électrochimie est extrêmement complexe du fait du nombre important de paramètres qui entrent en jeu. Les paramètres les plus significatifs sont :

- La géométrie du banc
- La composition et le vieillissement des bains
- La composition de la contre-électrode
- La présence et le type d'agitation
- La température
- La densité et la forme du courant d'électrolyse
- La géométrie des motifs à déposer

3.1.1 Banc d'électrochimie

Pour étudier les dépôts électrolytiques, il a fallu dans un premier temps réaliser le banc d'électrochimie, constitué d'une cuve en pyrex et d'un bâti qui supporte les électrodes et la connectique.

Le matériau utilisé pour la réalisation de ce banc doit résister à des électrolytes très acides ou très basiques. Nous avons choisi le polytétrafluoréthylène (PTFE) comme matière première dans la réalisation du bâti. Le fait que ce matériau soit un polymère tendre n'est pas un inconvénient, car les contraintes mécaniques sur ce banc sont faibles. En effet, des matériaux plus durs mécaniquement mais beaucoup moins stables comme les nylons, les

plastiques, les résines ou les métaux se dégraderaient dans les bains extrêmement corrosifs et risqueraient de polluer l'électrolyte. Nous avons veillé à garder une disposition parallèle des électrodes par une architecture massive des pieds du support d'électrode et une fixation plus solide des supports sur le bâti. Des bras de maintien dotés de contact spéciaux ont également été étudiés afin d'améliorer les contacts électriques et la tenue des plaquettes en silicium (ou électrode de travail) et de la contre-électrode sur les supports. Ces bras de maintien offrent une protection des contacts à ressorts et permettent ainsi d'allonger leur durée de vie.

Afin de déterminer les conditions optimales de dépôt nous avons conçu deux configurations de banc représentées sur la figure 3-1. Ceci nous permettra d'évaluer l'influence de la position des électrodes dans le bain.

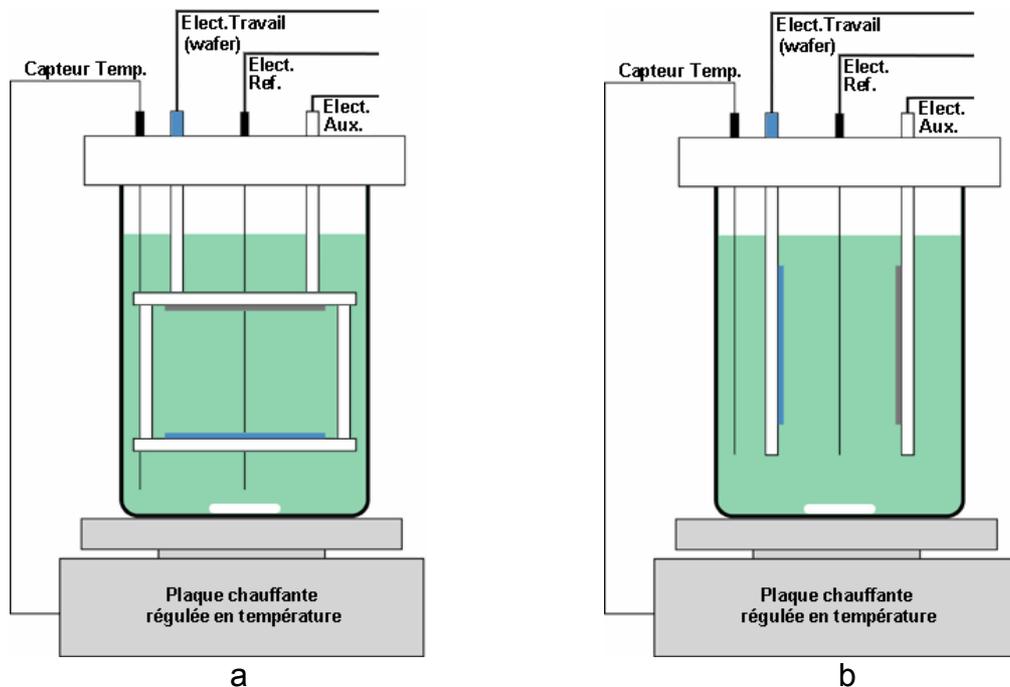


Figure 3-1 : Configurations de bâti horizontal (a) et vertical (b)

Pour évaluer l'influence du type d'agitation nous avons équipé le bâti de plusieurs systèmes d'agitation. Le bâti, compatible avec les agitateurs magnétiques classiques, est également pourvu d'un diffuseur pour une agitation par bullage d'azote.

Le générateur de courant utilisé pour l'électrodéposition est de type DEA332 (Digital Electrochemical Analyser) couplé avec un IMT102 (Electrochemical Interface) de chez Radiometer/Copenhagen. Cet ensemble est piloté par un micro-ordinateur au moyen de l'interface logicielle Voltmaster2. La figure 3-2 représente le dispositif complet.

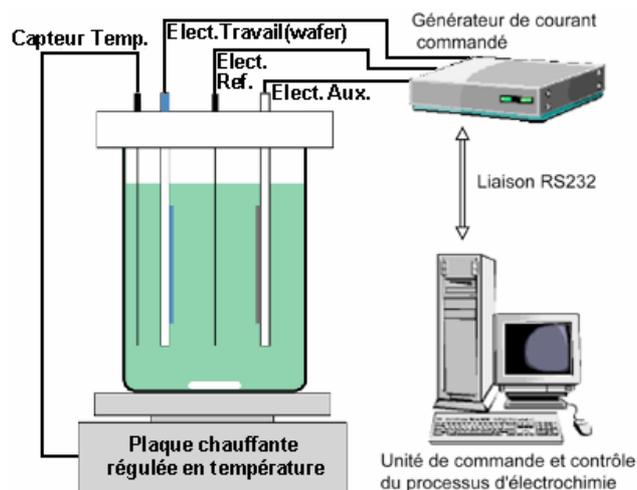


Figure 3-2 : Banc d'électrochimie

3.1.2 Bains pour l'électrochimie

Dans un premier temps et afin de profiter de l'expérience des spécialistes de l'électrochimie, nous avons employé des bains électrolytiques proposés dans le commerce. Ces bains commerciaux sont destinés à des domaines aussi variés que la microélectronique, le traitement de surface ou encore la finition. Cependant, il n'y a pas à notre connaissance de bains commerciaux pour les dépôts électrolytiques de NiFe dans le domaine de la microélectronique.

Le bain cuivre

Le dépôt de cuivre est réalisé à partir de deux bains proposés par la société Enthone-Omi. La composition du premier est présentée dans le tableau 3-1. Il s'agit d'une solution courante [1] utilisée pour les dépôts de cuivre sur les circuits imprimés. Enthone-Omi fournit un additif le Cubath Satin pour améliorer la qualité du dépôt électrochimique.

Dépôt de cuivre solution I	
<i>Composition des bains</i>	
Origine :	Bain industriel (Enthone-omi)
Sulfate de cuivre 5H ₂ O :	70g/l
Cubath Satin :	4ml/l
Acide sulfurique 96% :	180g/l
Chlorure de sodium :	100mg/l
Eau désionisée :	Complément jusqu'au volume désiré
<i>Conditions de dépôt</i>	
Temp. :	25°C
Agit. :	1100tr/min
Densité de courant. :	1 à 3,5A/dm ² (préconisé par E.-O.)

Tableau 3-1 : composition et condition de dépôt du bain cuivre solution I

Nous avons effectué des relevés permettant d'analyser l'influence de la durée de dépôt sur l'épaisseur et l'uniformité en épaisseur des couches lors de la croissance du cuivre. Ces tests ont été réalisés sur des plaquettes de silicium qui ont au préalable été traitées c'est-à-dire que le silicium a été passivé puis une couche d'accrochage en Cr/Au (500Å/2000Å) a été déposée par évaporation. Cette couche d'accrochage a été ensuite gravée de façon à laisser apparaître un réseau de pistes conductrices pour alimenter les moules. Enfin, des moules de 50 µm d'épaisseur en résine photosensible SU-8 ont été réalisés pour former la croissance du cuivre. La première génération de masques de micro-bobine, utilisés pour la gravure du Cr/Au et la réalisation des moules en résine épaisse de ce plan d'expérience, ont fait l'objet d'une étude développée dans des travaux de thèse antérieurs. Le protocole expérimental pour chaque plaquette est le suivant : nettoyage des surfaces à déposer par un traitement au plasma-O₂, dépôt électrolytique du cuivre en courant continu, observation de l'aspect de la résine et du dépôt, mesure du dépôt. Les résultats expérimentaux sont présentés ci-dessous :

Dépôt N°1 :

- Densité de courant continu : 2A/dm²
- Temps de dépôt : 60 minutes
- Surface : 10 cm²
- Agitation : agitateur magnétique 1100tr/min

Résultats :

- Bonne tenue de la résine.
- 22-23µm de cuivre soit une vitesse de croissance de 0,37µm/mn (mesures réalisées au TENCOR).
- Aspect du dépôt homogène localement.

Dépôt N°2 :

- Densité de courant continu : 2A/dm²
- Temps de dépôt : 102 minutes afin d'obtenir 37µm en se référant aux résultats précédents.
- Surface : 10 cm²
- Agitation : agitateur magnétique 1100tr/min

Résultats :

- Bonne tenue de la résine.
- 44-48µm de cuivre soit une vitesse de croissance de 0,45µm/mn (mesures réalisées au TENCOR).
- Aspect du dépôt homogène localement.

- Dépôt N°3 :
- Remplacement de la solution avec travail du bain sur une plaquette de test pendant quelques minutes à 1A.
 - Densité de courant continu : $2A/dm^2$
 - Temps de dépôt : 90 minutes afin d'obtenir $34\mu m$ en se référant aux résultats du premier dépôt
 - Surface : 10 cm^2
 - Agitation : agitateur magnétique 1100tr/min

Résultats :

- Bonne tenue de la résine.
- 44 à $57\mu m$ de cuivre, mais très variable suivant les quartiers de plaquette (vraisemblablement dû à des problèmes de contact sur le banc de cuivre de conception plus ancienne que celui de NiFe), ainsi qu'à l'intérieure même d'un secteur. La cartographie de ces différences d'épaisseur de dépôt montre qu'il existe une relation entre l'épaisseur de cuivre d'un motif et sa distance par rapport au contact. Ceci laisse supposer un rôle non négligeable de la résistance des pistes d'amenée de courant.
- Globalement nous observons une vitesse de croissance de $0,55\mu m/mn$ (mesures réalisées au TENCOR)
- Aspect du dépôt homogène localement.

- Dépôt N°4 :
- Densité de courant continu : $2A/dm^2$
 - Temps de dépôt : 55 minutes afin d'obtenir $30\mu m$ en se référant aux résultats précédents
 - Surface : 10 cm^2
 - Agitation : agitateur magnétique 1100tr/min

Résultats :

- Bonne tenue de la résine.
- Comme constaté avec le dépôt précédent, il y a un écart d'épaisseur entre les quatre quarts de la plaquette et à l'intérieur même des quarts de la plaquette (environ $6\mu m$).
- $30,7\mu m$ de cuivre en moyenne soit une estimation de la vitesse de croissance à $0,55\mu m/min$ (mesures réalisées au TENCOR)
- Aspect du dépôt homogène localement.

Dépôt N°5 :

- Expérience de validation du dépôt de cuivre
- Densité de courant continu : $2A/dm^2$
- Temps de dépôt : 74 minutes afin d'obtenir $41\mu m$ en se référant aux résultats précédents
- Surface : $10 cm^2$
- Agitation : agitateur magnétique 1100tr/min

Résultats :

- Bonne tenue de la résine
- Épaisseur de dépôt voulue obtenue.
- Aspect du dépôt homogène localement.

Dans ce plan d'expérience, nous avons estimé la vitesse de dépôt du cuivre pour cette solution I. Cette vitesse de croissance est de $0,55\mu m/min$ pour une densité de courant de $2A/dm^2$. Nous avons également mis en évidence l'importance des pistes d'amenée de courant. En effet, l'hétérogénéité en épaisseur des dépôts et la corrélation entre épaisseur de cuivre et distance par rapport aux contacts d'alimentation laisse supposer le lien entre la longueur des pistes et la répartition du courant dans l'ensemble des motifs. La résine n'a pas subi de contrainte lors du dépôt de cuivre et ne présente ni décollement ni cassure.

Un deuxième type de bain proposé par la société Enthone-Omi, a été testé. Cette solution, dédiée à la microélectronique, donne de très bons résultats au niveau de l'homogénéité en épaisseur et de qualité de dépôt en courant continu. La solution II et les conditions de dépôt sont présentées dans le tableau 3-2. La densité de courant traversant l'électrolyte est fonction de la forme des motifs souhaités. Aussi ces valeurs seront données dans la partie concernant la réalisation des structures. La plage de densité de courant varie de $4A.dm^{-2}$ à $8A.dm^{-2}$ en courant continu.

Dépôt de cuivre solution II	
<i>Composition des bains</i>	
Origine :	Bain industriel (Enthone-omi)
Make up :	Microfab CU 200
Starter :	Microfab CU 200 (20ml/l)
<i>Conditions de dépôt</i>	
Temp. :	25°C
Agit. :	1100tr/min

Tableau 3-2 : composition et condition de dépôt du bain de cuivre n°2

En raison de sa vocation microélectronique, ce bain d'électrodéposition de cuivre "prêt à l'emploi" n'a pas demandé autant de temps de mise au point que pour celui du bain Ni₈₀Fe₂₀, hormis lors de l'évaluation des vitesses de dépôt.

La caractérisation électrique du dépôt de cuivre réalisé avec cette solution sera présentée dans le chapitre suivant.

Le bain NiFe

Compte tenu de la difficulté de trouver sur le marché des bains Ni₈₀Fe₂₀ "prêt à l'emploi" dédiés à la microélectronique, nous avons pris comme base de départ une solution également proposée par la société Enthone-Omi destinée au traitement de surface.

Cette société ne fournit que très peu d'informations sur la composition de ses bains, notamment sur les produits additifs, ce qui ne facilite pas l'adaptation de ce produit à une utilisation dans un procédé microélectronique. Néanmoins, nous essayons de mettre au point de façon expérimentale la composition des électrolytes avec les informations dont nous disposons.

Dans un premier temps, nous avons pris la solution I proposée par la société Enthone-Omi pour réaliser le bain en Ni₈₀Fe₂₀. La composition de cette solution et les conditions de dépôt sont présentées dans le tableau 3-3 ci-dessous.

Dépôt Ni₈₀Fe₂₀ Solution I	
<i>Composition des bains</i>	
Origine :	Enthone-Omi (NIRON)
Sulfamate de Nickel :	150g/l
Chlorure de Nickel :	60g/l
Acide ortho borique :	45g/l
NIRON Stabilisateur D :	10g/l
Sulfate ferreux :	18g/l
Brillanteur FN1	25ml/l
Brillanteur 84	18ml/l
Brillanteur FN2S :	1,5ml/l
Mouillant 62A :	2ml/l
Eau désionisée :	Complément jusqu'au volume désiré
<i>Conditions de dépôt</i>	
PH :	3,5 au repos
Contre Électrode	Nickel
Temp. :	40 °C
Agit. :	Magnétique 800tr/min ; bullage d'azote ; sans agitation

Tableau 3-3 : composition et conditions de dépôt de la solution I (Enthone-Omi)

Nous avons réalisé des tests de dépôt afin d'évaluer les possibilités de ce bain et éventuellement d'améliorer la technique de dépôt afin de la rendre compatible avec la réalisation des micro-bobines.

Comme pour le premier bain de cuivre, nous avons effectué ces tests sur des plaquettes de silicium traitées en utilisant la première génération de masques. La contre-électrode étant en nickel, la quantité d'ions Ni^{2+} restera stable, par contre un appauvrissement du bain en ions Fe^{2+} sera inévitable. Cependant, cet appauvrissement est négligeable car les quantités de fer déposées sont faibles. De plus le bain est renouvelé régulièrement car les ions Fe^{2+} s'oxydent rapidement (noircissement du bain). Dans un premier temps, un diffuseur d'azote assurera le brassage de la solution car nous ne maîtrisons pas l'influence d'une agitation magnétique sur les composés magnétiques présents dans l'électrolyte. La température du bain est de 58°C (recommandée par le fournisseur).

Les résultats de ces tests expérimentaux sont présentés ci-dessous :

Dépôt N°1 :

- Durée du dépôt 20 minutes
- Densité de courant continu : $6\text{A}/\text{dm}^2$ (densité préconisée par Enthone-Omi)
- Température du bain à 58°C (Température préconisée par Enthone-Omi)
- Surface: 10cm^2 (estimée)
- Agitation par bullage d'azote

Résultats :

- Épaisseur du dépôt atteignant $200\ \mu\text{m}$ par endroits
- Vitesse de croissance $10\ \mu\text{m}/\text{min}$ (non fiable)
- Tenue de la résine correcte
- Arrachement du dépôt NiFe avec la couche d'accrochage.
- Aspect du dépôt : épaisseur non homogène
- Débordement et court-circuit du NiFe sur le réseau cuivre.

Dépôt N°2 :

- Durée du dépôt : 10 minutes
- Densité de courant continu : $1,2\text{A}/\text{dm}^2$
- Température du bain à 58°C
- Surface : $10\ \text{cm}^2$ (estimée)
- Agitation par bullage d'azote

Résultats :

- Fine pellicule de NiFe non mesurée
- Tenue de la résine correcte
- Arrachement du peu de dépôt NiFe avec la couche d'accrochage.
- Possibilité de contrainte de dilatation trop importante lors du refroidissement (choc thermique). En effet, lors du rinçage à l'eau, le décollement se produit.

Dépôt N°3 :

- Durée du dépôt : 10 minutes
- Densité de courant continu : 2 A/dm²
- Surface : 10 cm² (estimée)
- Température du bain abaissée à 20°C (T° ambiante) afin d'éliminer le choc thermique
- Agitation par bullage d'azote

Résultats:

- Épaisseur : 3µm environ
- Vitesse de croissance : 0,3 µm/min (non fiable)
- Tenue de la résine correcte
- Décollement du dépôt NiFe avec la couche d'accrochage.
- Aspect du dépôt : épaisseur non homogène
- Dépôt sur deux secteurs complets et non sur les motifs destinés au NiFe seulement. Le dépôt ne reste pas dans les moules, les contraintes sont trop importantes même à froid.
- Problème au niveau de l'amenée de courant sur les moules du noyau magnétique. En effet, un arrachement de tous les premiers plots des bobines a été constaté. Ces plots, une fois décollés, coupent le circuit d'alimentation. Répartition de l'amenée de courant, peut-être à revoir.
- L'hypothèse d'une couche de passivation non appropriée aux fortes contraintes a été émise.

Pour les huit prochaines expériences, afin d'éliminer les problèmes liés à la résistance des pistes d'amenée de courant, nous allons laisser la couche d'accrochage (Cr/Au 500Å/2000Å) sur toute la plaquette, seuls les moules en résine épaisse seront présents. Pour ces huit wafers, la couche de passivation est obtenue par un dépôt de nitrure de silicium.

Dépôt N°4 :

- Durée du dépôt : 20 minutes
- Densité de courant continu : 2 A/dm²
- Surface : 20 cm² (estimée)
- Température du bain abaissée à 20°C (T° ambiante) afin d'éliminer le choc thermique
- Agitation par bullage d'azote

Résultats :

- Épaisseur : 5 µm environ
- Vitesse de croissance : 0,25 µm/min (non fiable)
- Tenue de la résine correcte

Dépôt N°5 :

- Durée du dépôt : 20 minutes
- Densité de courant continu : 2 A/dm²
- Surface : 20 cm² (estimée)
- Retour à une température de bain de 58°C
- Agitation par bullage d'azote

Résultats :

- Tenue de la résine correcte
- Croissance NiFe dans les moules en résine très perturbée (Voir photos MEB de la figure 3-3)

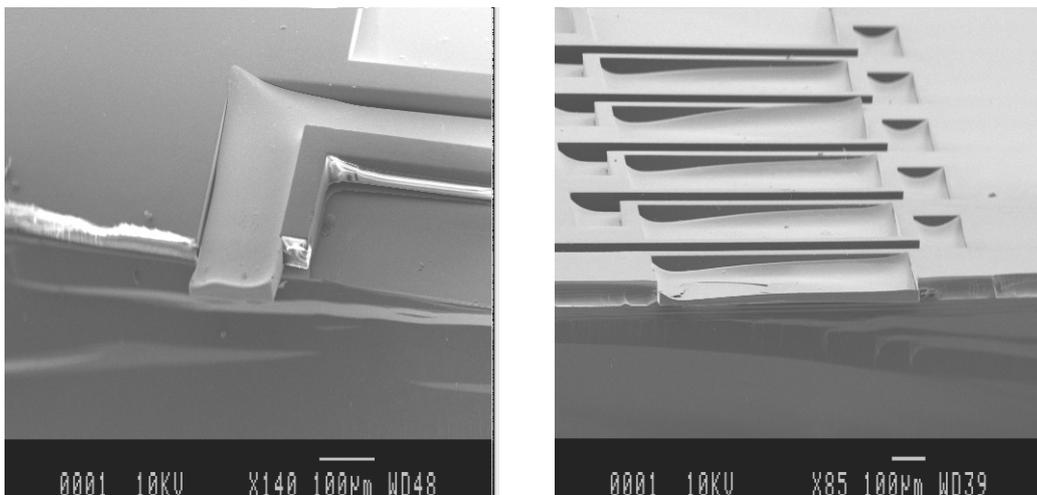


Figure 3-3 : Photographie MEB ; détails de la croissance NiFe du dépôt N°5.

Dépôt N°6 :

- Durée du dépôt : 20 minutes
- Densité de courant continu : 2 A/dm^2
- Surface : 20 cm^2 (estimée)
- Agitation par bullage d'azote
- Température de bain de 58°C

Résultats :

- Tenue de la résine correcte
- Croissance NiFe dans les moules en résine très perturbée (Voir photos MEB de la figure 3-4)

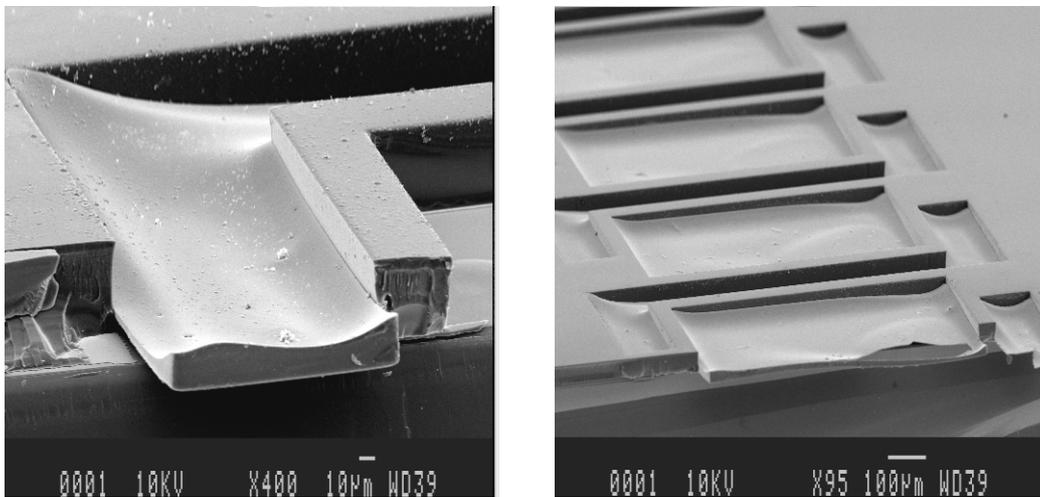


Figure 3-4 : Photographie MEB ; détails de la croissance NiFe du dépôt N°6.

Dépôt N°7 :

- Durée du dépôt : 400 secondes
- Densité de courant continu : 6 A/dm^2
- Surface : 20 cm^2 (estimée)
- Agitation par bullage d'azote
- Température de bain de 58°C

Résultats :

- Hypothèse d'une influence sur le dépôt de la résistance de la plaque chauffante qui pourrait produire un champ magnétique (ions ferreux dans la solution).
- À 6 A/dm^2 le dépôt paraît être plus uniforme, moins d'effet de bord. Pour le dépôt suivant, nous augmenterons la densité de courant. (Voir photos MEB de la figure 3-5)

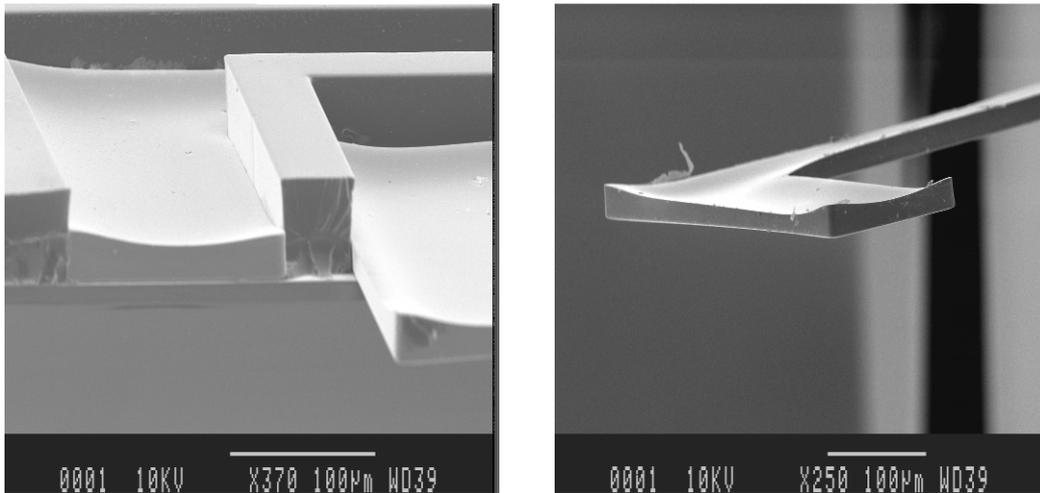


Figure 3-5 : Photographie MEB ; détails de la croissance NiFe du dépôt N°7.

Dépôt N°8 :

- Durée du dépôt : 240 secondes
- Densité de courant continu : 10 A/dm²
- Surface : 20 cm² (estimée)
- Agitation par bullage d'azote

Résultats :

- Épaisseur : 19 µm en coins et 16 µm en lisière du moule (mesures MEB)
- Localement, décollement des motifs (avec couche d'accrochage) et de la résine.
- Nous constatons une certaine dissymétrie dans les motifs. L'hypothèse d'une conséquence de l'agitation par bullage a été émise. Le prochain dépôt s'effectuera sans agitation.
- Globalement le dépôt semble moins homogène qu'avec une densité de courant de 6 A/dm² (figure 3-6).

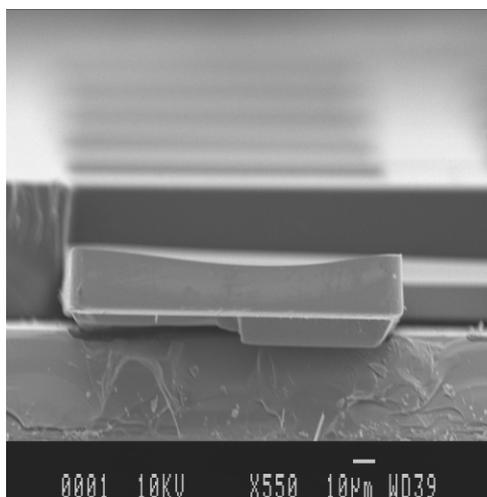


Figure 3-6 : Photographie MEB ; détails de la croissance NiFe du dépôt N°8.

Dépôt N°9 :

- Pas d'agitation
- Durée du dépôt : 400 secondes
- Densité de courant continu : 6 A/dm²
- Surface : 20 cm² (estimée)
- Température de bain de 58°C

Résultats :

- Les motifs en NiFe semblent tenir.
- L'agitation par bullage semble jouer un rôle dans l'aspect du dépôt (figure 3-7).

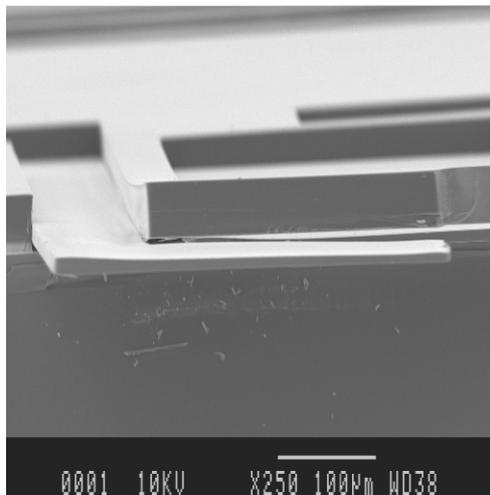


Figure 3-7 : Photographie MEB ; détails de la croissance NiFe du dépôt N°9.

Dépôt N°10 :

- Pas d'agitation
- Durée du dépôt : 1000 secondes
- Densité de courant continu : 6 A/dm²
- Surface : 20 cm² (estimée)
- Température de bain de 58°C

Résultats :

- Épaisseur : 20µm mesurée au MEB
- Vitesse de croissance : 1,2 µm/min
- Tenue de la résine : décollement de plaques de résine.
- Tenue du dépôt : correct
- Aspect du dépôt : homogène et uniforme (photographies MEB figure 3–8)

-La résine ne tient pas, retour sur l'hypothèse d'un choc thermique.
Prochain dépôt avec rinçage dans une eau à 58°C puis refroidissement plus lent.

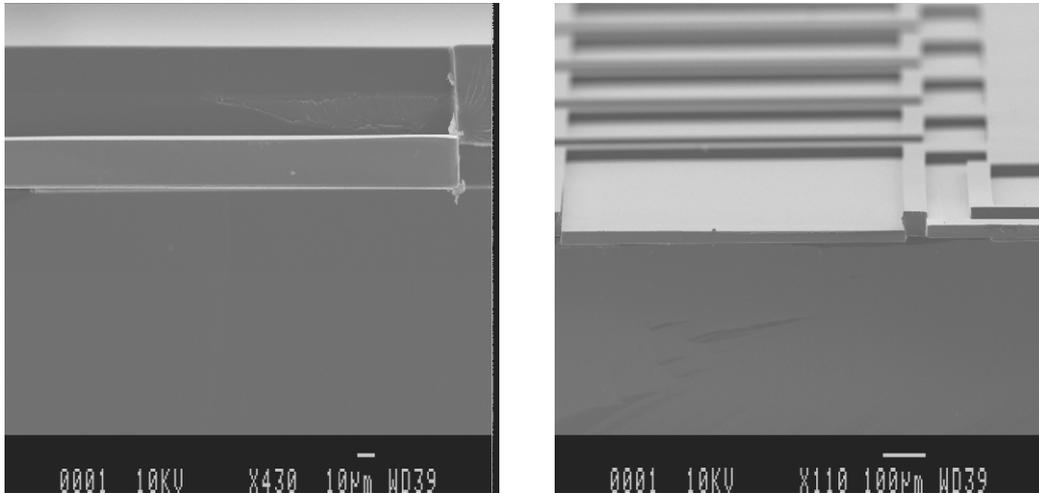


Figure 3-8 : Photographie MEB ; détails de la croissance NiFe du dépôt N°10.

Dépôt N°11 :

- Pas d'agitation
- Durée du dépôt : 2000 secondes
- Densité de courant continu : 6 A/dm²
- Surface : 20 cm² (estimée)
- Température de bain de 58°C
- Rinçage avec eau à 58°C pour limiter le choc thermique puis refroidissement progressif.

Résultats :

- La résine a tenu.
- Le dépôt est un peu plus homogène dans les motifs (figure 3-9). Lors de l'électrodéposition, nous observons un dégagement d'hydrogène qui peut être la cause du manque d'homogénéité en épaisseur.
- Épaisseur : Autour de 30-35 µm mesurée au MEB
- Vitesse de croissance : 1µm/min
- Tenue du dépôt : décollement à certains endroits

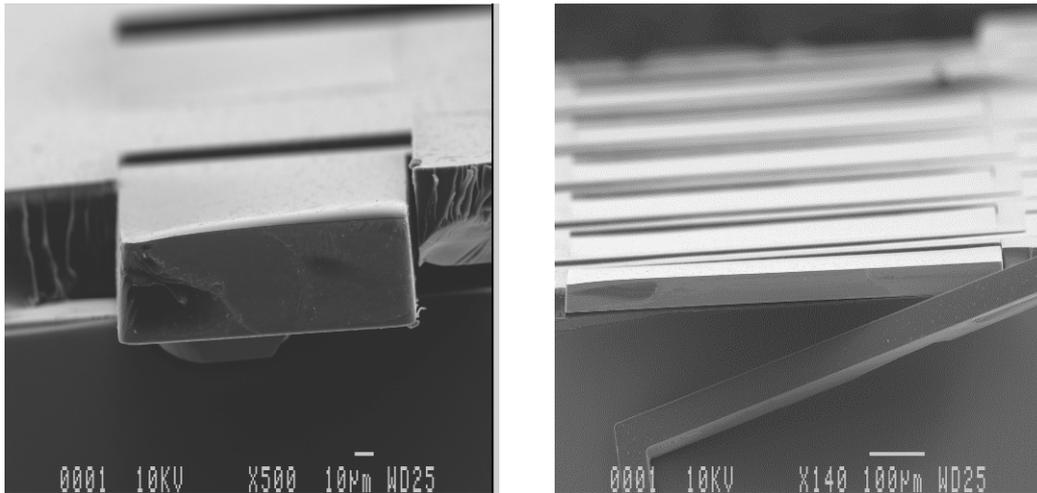


Figure 3-9 : Photographie MEB ; détails de la croissance NiFe du dépôt N°11.

Pour le dernier dépôt de cette série, nous reprenons sur une plaquette dont la préparation est complète (pistes d'amenée de courant pour sélection des motifs, oxyde de silicium pour la passivation) donc identique aux wafers des trois premières expériences. Nous reprendrons les mêmes paramètres et conditions utilisés dans le *Dépôt N°11*. En effet, les résultats obtenus lors de ce dépôt sont tout à fait corrects.

Dépôt N°12 :

- Pas d'agitation
- Durée du dépôt : 2000 secondes
- Densité de courant continu : 6 A/dm²
- Surface : 10 cm² (estimée)
- Refroidissement progressif de la plaquette.

Résultats :

- Épaisseur : non mesurée
- Dégagement d'hydrogène
- Tenue de la résine correcte
- Arrachement du dépôt NiFe avec la couche d'accrochage par endroits.
- Grande disparité des épaisseurs de dépôt : le seul facteur changeant étant les pistes d'amenée de courant, on met ici en évidence l'influence de la résistance de ces pistes.

Ces tests de dépôts de NiFe utilisant la solution I permettent de tirer quelques conclusions concernant la croissance électrolytique du NiFe. Ainsi il apparaît que la résine et le dépôt sont sensibles aux chocs thermiques. Ce bain de NiFe est utilisé à 58°C et le rinçage des plaquettes

à une eau à 58 °C que l'on refroidit progressivement semble être une solution permettant d'éviter le décollement.

Nous avons également pu mettre en évidence l'influence de l'agitation sur l'homogénéité du dépôt. Nous avons observé que plus il y a de mouvement de fluide dans l'électrolyte et plus le dépôt est "perturbé". Même lors d'un dépôt sans agitation, il apparaît une légère croissance en forme de vague (figure 3-9). On explique cet effet par le dégagement d'hydrogène en surface de la plaquette qui crée un mouvement de fluide vertical et donne une forme irrégulière au dépôt. Nous sommes parvenus à réduire ce phénomène en tournant régulièrement la plaquette de silicium d'un quart de tour.

Afin de s'affranchir de cette manipulation nous avons également essayé une configuration du banc différente. Ainsi, en optant pour une configuration avec un positionnement horizontal de la plaquette de silicium et de la contre-électrode, nous pensions éviter la perturbation du dépôt due au déplacement des bulles d'hydrogène le long de la surface de la plaquette. Il apparaît en fait que les bulles qui se dégagent à la surface de la plaquette ne glisse plus le long de la paroi pour créer un flux de surface mais au contraire, ont tendance à rester collées à la surface et accroître les irrégularités du dépôt. Les photographies MEB de la figure 3-10 montrent les perturbations en surface sur le motif du dépôt réalisé sur le banc horizontal et la planéité de la surface du dépôt réalisé sur le banc vertical en tournant la plaquette régulièrement.

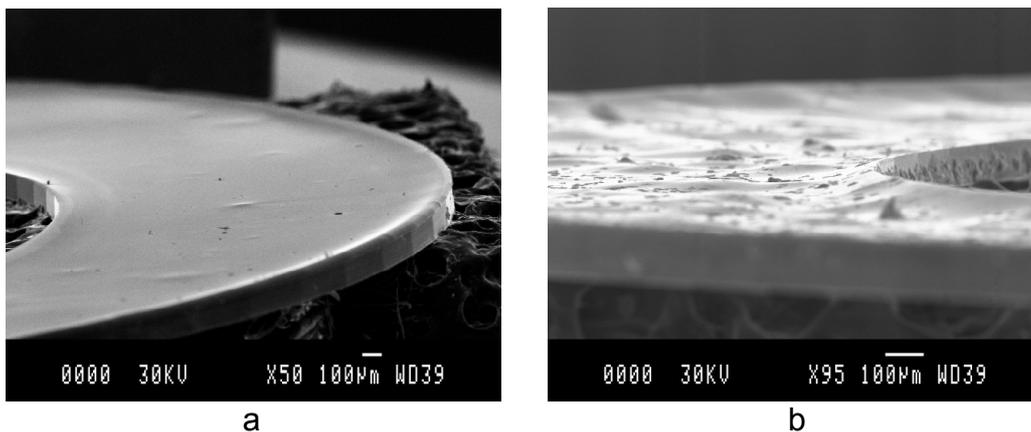


Figure 3-10 : Photographies MEB ; détails de la croissance NiFe sur banc vertical (a) et horizontal (b).

Cette solution I proposée par Enthone-Omi ne nous donne pas entière satisfaction. Le dépôt est contraint et la planéité n'est pas parfaite. Le fait de ne pas connaître le rôle des différents additifs et la difficulté à se procurer un bain adapté à nos besoins nous ont conduit à

rechercher une composition issue de la littérature scientifique [1][2][3]. Le tableau 3-4 donne la composition et les conditions de dépôt de cette solution II.

Dépôt Ni₈₀Fe₂₀ Solution II	
<i>Composition des bains</i>	
Origine :	[1] [2] [3]
Sulfamate de Nickel :	0,2 M/l
Chlorure de de Fer :	0,02 M/l
Acide ortho borique :	0,4 M/l
Saccharinate de sodium :	1,5 g/l
Dodecylsulfate de sodium :	0,2 g/l
Acide ascorbique :	1g/l
Eau désionisée :	Complément jusqu'au volume désiré
<i>Conditions de dépôt</i>	
PH :	3,45 au repos
Contre Électrode	Nickel 80% Fer 20%
Temp. :	40 °C
Agit. :	800tr/min

Tableau 3-4 : composition et conditions de dépôt de la solution II (sources venant de la littérature scientifique)

Nous avons ainsi mené une campagne de tests sur cette nouvelle solution afin de déterminer la densité de courant, la température du bain, le pH et l'agitation optimaux pour la croissance du NiFe. Nos sommes parvenus à obtenir des dépôts homogènes que l'on peut observer sur la figure 3-11.

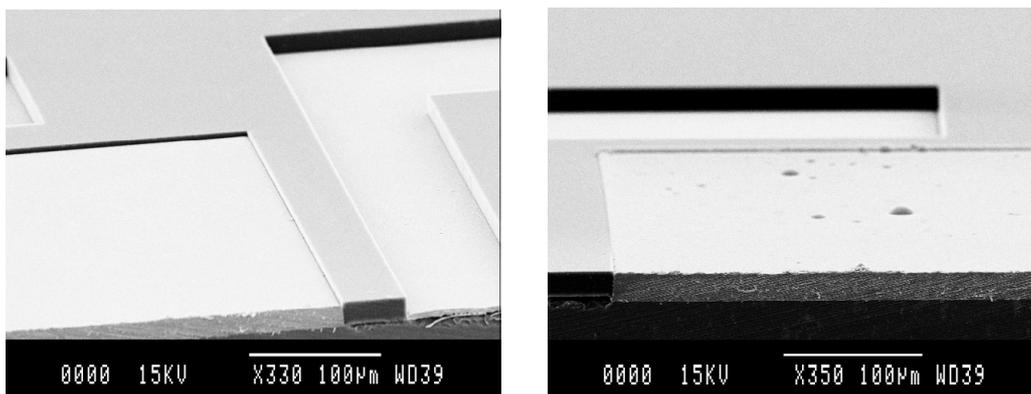


Figure 3-11 : Photographies MEB ; détails de la croissance NiFe avec la solution II

Afin de vérifier la compatibilité des bains, nous avons essayé de faire croître le cuivre et le NiFe sur un même niveau. Cette compatibilité nous est imposée pour la réalisation de la structure "mixte" que nous étudierons plus loin dans ce chapitre. Les résultats ont été concluants comme le montre les photographies MEB de la figure 3-12 pour les bains "solution

I de cuivre" et "solution I de NiFe". En effet, si l'on procède au dépôt du cuivre puis au dépôt du NiFe, le cuivre n'est pas détérioré dans l'électrolyte du NiFe. Nous n'observons pas non plus de phénomène de dépôt "electroless".

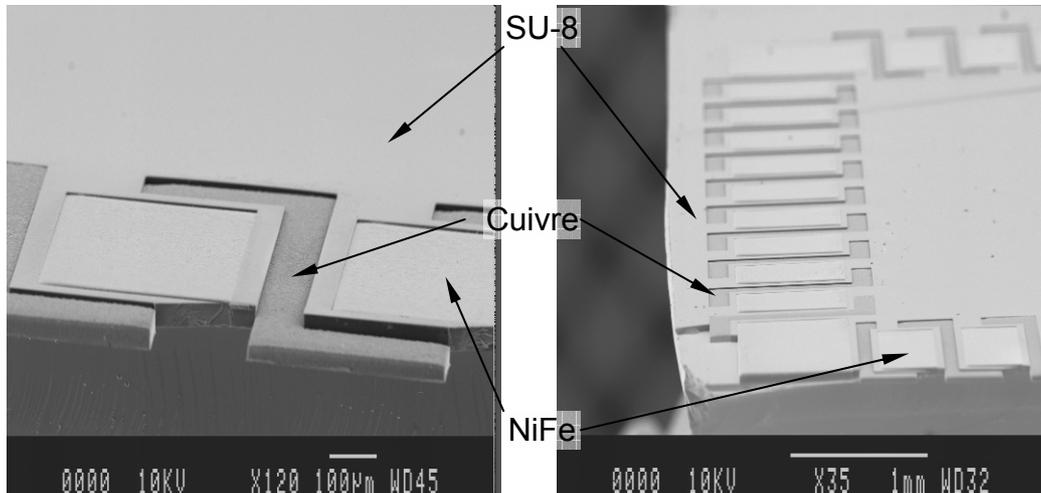


Figure 3-12 : Photographies MEB ; détails de la croissance Cuivre de la solution I et NiFe de la solution I sur un même niveau.

Cependant, lors de l'utilisation des électrolytes "solution II NiFe" et "solution II Cuivre", nous observons des problèmes de compatibilité. En effet, la croissance électrolytique de cuivre est dissoute dans le bain de NiFe "solution II", et il se produit un phénomène de dépôt "electroless" du cuivre sur le NiFe déposé par électrochimie si l'on plonge la plaquette dans le bain de cuivre "solution II". Il nous faudra alors trouver des moyens pour protéger les métaux précédemment déposés lors de l'utilisation des solution II de cuivre et de NiFe.

3.2. Couches d'accrochage

La couche d'accrochage a un double rôle dans notre application. Elle permet de maintenir ou de faire l'interface entre le substrat et le matériau déposé par électrochimie, et de répartir les courants vers l'ensemble des motifs. Ainsi nous allons voir quels sont les matériaux les mieux adaptés à la réalisation de nos structures. Dans la partie de ce chapitre relative aux structures, nous étudierons la forme à donner à cette couche d'accrochage afin d'améliorer la répartition des courants lors de l'électrodéposition de matériaux (Cf. Chap. I).

Nous avons utilisé lors des dépôts trois types de couches d'accrochage : Cr/Au, Ti/Au, Ti/Cu. Pour la couche d'accrochage qui est directement en contact avec le substrat, nous avons, dans un premier temps, essayé une couche de Cr/Au (500Å/2000Å). Il s'est avéré que cette couche déposée sur nitrure de silicium est contrainte et que l'adhérence n'est pas suffisante pour supporter les propres contraintes du NiFe déposé avec la solution I. À la suite

de nombreux décollements, nous nous sommes tournés vers une couche d'accrochage en Ti/Cu. Le titane semble avoir une meilleure adhérence sur le nitrure ou l'oxyde de silicium. Une raison supplémentaire qui nous a amené à ne plus utiliser le chrome comme couche d'interface est un problème de compatibilité d'attaque chimique. En effet, la solution chimique que nous utilisons lors de l'attaque du chrome attaque également le cuivre. Notre conducteur étant réalisé avec ce matériau, cela posera un problème de sélectivité d'attaque au cours de la réalisation des structures.

La couche d'accrochage Ti/Cu a été abandonnée car le cuivre s'oxyde très vite. Le traitement de surface par plasma-O₂ dégrade très visiblement la surface de la couche de cuivre. L'oxyde de cuivre étant isolant, la couche d'accrochage ne peut plus remplir la fonction de contre électrode pour l'électrochimie. Une solution consistant à désoxyder le cuivre avec de l'acide chlorhydrique est envisageable. Afin de réduire le nombre de manipulation de la plaquette de silicium nous préférons changer de matériau et ainsi remplacer le cuivre par de l'or. Nous déposerons une couche d'or plus épaisse pour réduire la résistance de la couche d'accrochage.

Après avoir testé l'adhérence de la couche d'accrochage sur le substrat silicium passivé, nous allons voir si l'adhérence de cette couche d'accrochage est identique si le substrat est en résine SU-8. En effet, la fabrication de nos structures impose de déposer une couche d'accrochage sur les moules de résine SU-8.

Contrairement au silicium, la comparaison (figure 3-13) entre une couche d'accrochage déposée sur de la résine utilisant une interface en chrome (a) et une interface en titane (b) montre une meilleure adhérence du chrome que du titane.

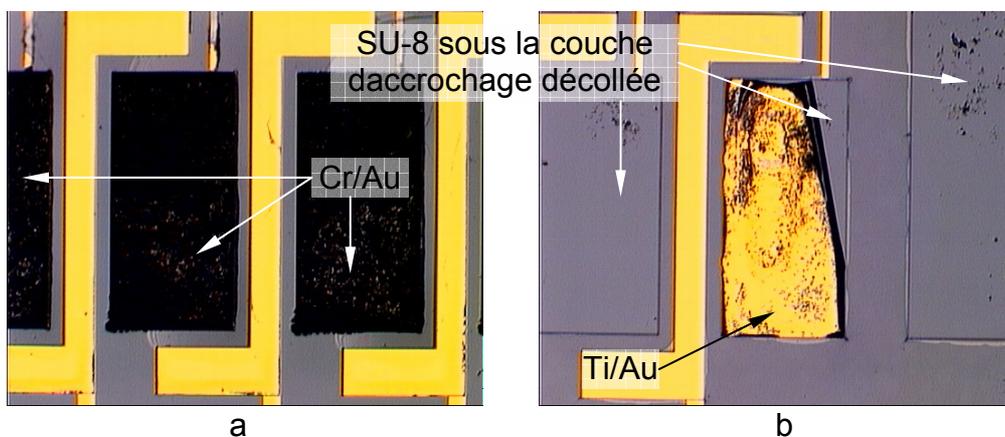


Figure 3-13 : Observations au microscope optique du comportement de la couche d'accrochage sur la résine SU-8 ; Cr/Au (a) et Ti/Au (b)

Cela pose le problème évoqué ci-dessus de la sélectivité de l'attaque chimique entre le chrome et le cuivre. Ne pouvant pas utiliser le chrome, nous choisissons de pulvériser du titane à haute énergie sur la résine. Les atomes pénètrent plus profondément dans le polymère et contribuent ainsi à une meilleure adhérence. Nous n'avons plus eu de problème de décollement de la couche d'accrochage sur la résine avec cette technique. En conclusion, nous utiliserons une double couche métallique titane et or respectivement d'une épaisseur de 1000Å et 5000Å comme couche d'accrochage avec pulvérisation sur un substrat en résine.

3.3. Résine photosensible SU-8

Comme nous l'avons vu, la réalisation des structures proposées est basée sur la croissance de matériau dans des moules. Ces moules restent dans le composant et jouent ensuite le rôle d'isolant entre les différents matériaux. Les spécifications du matériau constitutif de ces moules doivent répondre aux critères suivants :

- Une mise en œuvre par photolithographie.
- Procédés de fabrication par technologie froide.
- Forte épaisseur par couche (100µm) et flancs droits
- Résistance aux agressions chimiques (bains électrolytiques).
- Stabilité chimique.

Des publications scientifiques concernant les applications de type MEMS (MicroElectroMechanical Systems) fournissent des informations sur les différents matériaux utilisés pour la réalisation de structure à fortes épaisseurs. J. M. Shaw et al [4], B. Loechel [5], M. Brunet et al [6], J. O'Brien et al [7] ont comparé plusieurs types de résine de forte épaisseur utilisés dans la fabrication de microsystemes. Leurs investigations ont porté sur des résines positives (AZ4562, AZ9260, ma-P100), négative (SU-8) ou encore des résines déposées par voie électrochimique (PEPR2400, ED2100).

Il apparaît que la résine de type SU-8 répond à nos besoins. En effet, cette résine est déposée par un procédé de photolithographie, et permet d'obtenir de grande épaisseur de matériau (jusqu'à 200µm) en une seule couche avec un fort rapport de forme. De plus elle est chimiquement et thermiquement stable [4].

La SU-8 est une résine époxy de type novolac dont la structure chimique de la fonction de base (Éther Glycidique de Diphénol A) est représentée sur la figure 3-14.

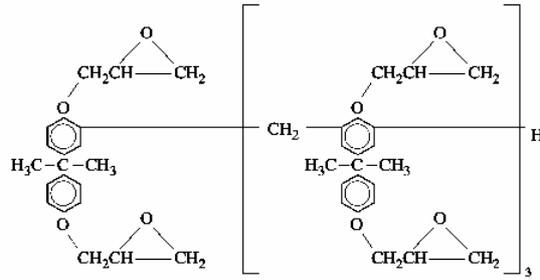


Figure 3-14 : Structure chimique de la résine SU-8. Éther Glycidyle de Diphénol A [4]

En lui adjoignant un photo-initiateur (sel triaryl sulfonium) et un solvant organique de type PGMEA (Propylene Glycol Methyl Ether Acetate), GBL (Gamma-Butyrolactone), MIBK (Methyl Iso-Butyl Ketone) ou encore du Cyclopentanone, la SU-8 devient une résine photosensible négative. Le photo-initiateur est sensible dans la gamme d'onde de l'ultraviolet (365nm-436nm). Dans cette plage d'onde, la SU-8 absorbe très peu d'énergie ceci lui confère la potentialité d'atteindre de forte épaisseur [4] [8] tout en conservant un très bon rapport de forme pouvant atteindre des valeurs de 20 à 50 [8] et des flancs proches de la verticale [9].

Après exposition, la SU-8 est chimiquement et thermiquement stable du fait de sa fonction aromatique et de sa structure hautement réticulée [4] [10] [11] [12]. Cette particularité est l'avantage principal de cette résine. En effet, les moules devront résister à l'immersion dans des bains corrosifs lors des dépôts électrochimiques. De plus ces moules font partie intégrante du composant, et leur stabilité chimique est indispensable. À ce titre, les températures auxquelles peuvent résister les polymères sont également un point clef, car lors du fonctionnement, la micro-bobine et son environnement sont susceptibles de dissiper de la puissance. Pour la SU-8, la température de transition vitreuse est de $T_g=200^\circ\text{C}$ et la température de destruction du polymère est de $T_d=380^\circ\text{C}$ [13]. La conductivité thermique de ce matériau est généralement rapprochée de celle des thermoplastiques d'une valeur de $0,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [14]. Cette faible valeur devra être prise en compte lors de la conception de système complet car elle pourra limiter la dissipation thermique du composant. Une autre caractéristique qu'il sera intéressant de connaître lors de la conception de composant à base de SU-8 est la valeur de sa constante diélectrique. Cette valeur de permittivité électrique a été mesurée lors des travaux de J. R. Thorpe et al [15], elle vaut $\epsilon_r=4$.

Si par ses caractéristiques, cette résine paraît convenir à nos besoins, elle n'en reste pas moins délicate à mettre en œuvre. En effet, la réticulation du polymère entraîne un important "stress" interne [9] [16] [12] [17] qui induit des craquelures et des décollements de la résine.

Nous avons mis au point les procédés technologiques de photolithographie de cette résine à partir des procédés standard fournis par le fabricant (MicroChem Corp.) et avec les informations recueillies dans la littérature scientifique [8] [9] [11] [13]. Une difficulté majeure dans ce travail réside dans l'approvisionnement de ce type de produit. En effet, chaque nouveau lot de résine appartient généralement à une génération dont les performances sont supérieures à la précédente mais qui nécessite à chaque fois une nouvelle mise au point pour son traitement. Les trois générations de SU-8 sont : SU-8 ; SU-8 série 2000 ; SU-8 Série 2000 Flex

Les différences se situent dans la composition des résines. Le solvant de la première est du GBL (Gamma-Butyrolactone). Ce solvant est remplacé dans la seconde (série 2000) par du Cyclopentanone. Cette modification permet d'améliorer la mouillabilité de la résine, d'obtenir un séchage plus rapide des films jusqu'à une épaisseur de 50 μm et enfin de faciliter l'enlèvement de la surépaisseur de résine qui apparaît en périphérie de la plaquette de silicium lors de l'enduction [16]. La troisième variante dite "Flex" a été mise au point, par l'adjonction de composés chimiques (de type triméthylolpropane, triacool caprolactone, polyol aliphatique) dans le but d'améliorer l'adhérence et de réduire les contraintes internes de la résine (source MicroChem Corp.).

Les procédés de traitement des résines SU-8 série 2000 et SU-8 série 2000 Flex sont identiques. Ces résines ont été mises au point pour des épaisseurs de 15 μm , 40 μm et 100 μm .

Les techniques de photolithographie utilisées pour la mise en œuvre des trois types de résines sont identiques et ceci pour toutes les épaisseurs. L'enchaînement des étapes de ce procédé est l'enduction de la résine sur le "wafer" (plaquette de silicium) puis une première cuisson (Soft Bake), exposition aux U.V. de la résine, cuisson post-exposition PEB (Post Exposure Bake), révélation et enfin cuisson finale (Hard Bake). Afin de limiter les chocs thermiques et les contraintes internes de la résine, les différentes cuissons suivent des montées et descentes en température comme le montre les courbes représentées à la figure 3-15.

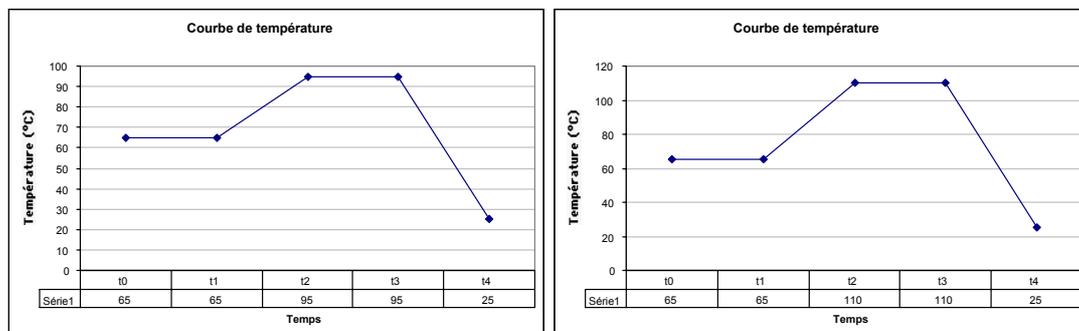


Figure 3-15 : Courbe de température de cuissons du "soft-bake" et du PEB (à gauche) et du hard-bake (à droite)

Le tableau suivant donne le détail des procédés que nous utilisons pour les résines SU-8 série 2000 et 2000 Flex.

Epaisseur Étapes	Procédés SU-8 série 2000 (Flex)					
	15 µm		40 µm		100 µm	
Enduction	N° SU-8:	2025	N° SU-8:	2025	N° SU-8:	2075
	Volume:	4ml	Volume:	8ml	Volume:	9ml
	capot:	fermé	capot:	ouvert	capot:	ouvert
	Vit. Rot.:	-	Vit. Rot.:	-	Vit. Rot.:	500tr/min
	Acc:	-	Acc:	-	Acc:	100tr/min/sec
	Temps:	-	Temps:	-	Temps:	5sec
	Vit. Rot.:	500tr/min	Vit. Rot.:	1700tr/min	Vit. Rot.:	1600tr/min
	Acc:	300tr/min/sec	Acc:	300tr/min/sec	Acc:	300tr/min/sec
Cuisson post-enduction	t1-t0:	1min	t1-t0:	1min 30sec	t1-t0:	5min
	t3-t2:	2min	t3-t2:	4min	t3-t2:	19min
Insolation	λ UV:	365nm	λ UV:	365nm	λ UV:	365nm
	Puis. lampe:	10mW/cm2	Puis. lampe:	10mW/cm2	Puis. lampe:	10mW/cm ²
	Temps exp.:	30sec	Temps exp.:	35sec	Temps exp.:	65sec
Cuisson post-insolation	t1-t0:	1min	t1-t0:	1min	t1-t0:	1min
	t3-t2:	1min 30sec	t3-t2:	3min	t3-t2:	9min
Révélation	Révéléateur:	PGMEA	Révéléateur:	PGMEA	Révéléateur:	PGMEA
	Temps rév.:	30 sec	Temps rév.:	1min	Temps rév.:	4-5min
Cuisson finale	t1-t0:	1min	t1-t0:	1min	t1-t0:	1min
	t3-t2:	1min	t3-t2:	1min	t3-t2:	1min

Tableau 3-3 : Procédés complets de mise en œuvre de la résine SU-8 pour des épaisseurs de 15µm, 40µm et 100µm.

Les forces latérales (contraintes internes) dues à la réticulation s'opposent à l'adhérence verticale de la résine au substrat. Ces contraintes internes augmentent avec la surface et l'épaisseur de la résine réticulée. Pour minimiser les effets des contraintes internes de la résine, il faut améliorer l'adhérence de la résine au substrat, optimiser la forme des motifs des moules pour minimiser les surfaces de résine, diminuer les stress internes en améliorant le procédé de mise en œuvre (cuisson, insolation).

Adhérence sur substrat :

La nature du substrat est prédominante sur l'adhérence sur la résine [12]. Ce substrat doit être isolé électriquement afin de ne pas créer de court-circuit sur le composant, et l'adhérence de la résine dépendra du type de passivation utilisé pour recouvrir le substrat en silicium. Plusieurs possibilités sont envisagées : Nitrure de silicium, oxyde de silicium ou encore une fine couche de résine.

Des essais sur le nitrure de silicium n'ont pas donné de bons résultats. Les décollements de résine sont plus importants sur ce type d'interface comme le montre la figure 3-16.

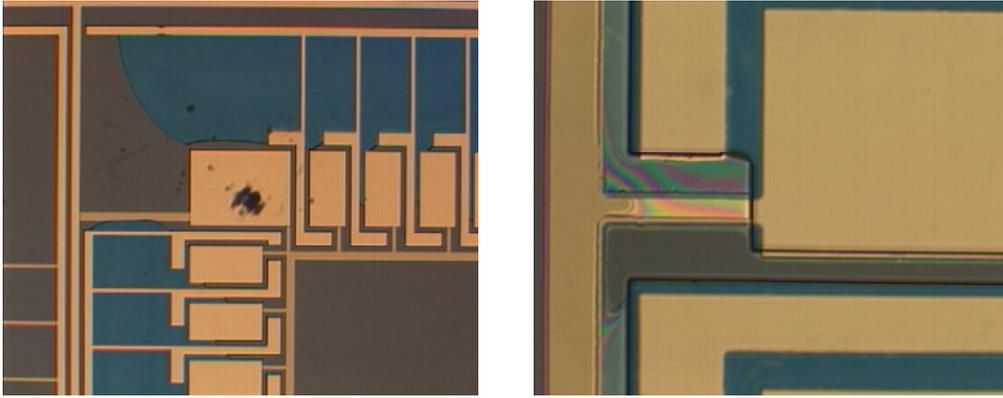


Figure 3-16 : Problèmes d'adhérence de la résine SU-8 sur du nitrure de silicium

Par contre, l'adhérence est satisfaisante si l'on utilise une fine épaisseur de SU-8 (5 μ m) comme couche de passivation. En effet, la couche de passivation en résine est suffisamment fine pour ne pas engendrer de fortes contraintes internes [17] et donc de décollement. L'adhérence des moules en SU-8 sur la couche de passivation en SU-8 est très bonne comme le montre la figure 3-17.

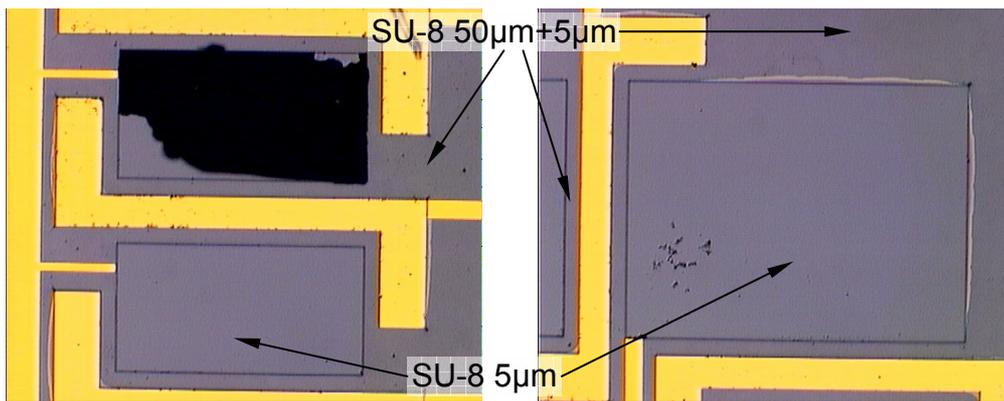


Figure 3-17 : Adhérence de la résine SU-8 50 μ m sur de la résine SU-8 5 μ m

En ce qui concerne l'oxyde de silicium, il permet également d'obtenir une bonne adhérence de la résine SU-8. C'est l'oxyde de silicium qui sera retenu comme couche de passivation. La figure 3-18 montre la bonne adhérence des moules en SU-8 sur l'oxyde.

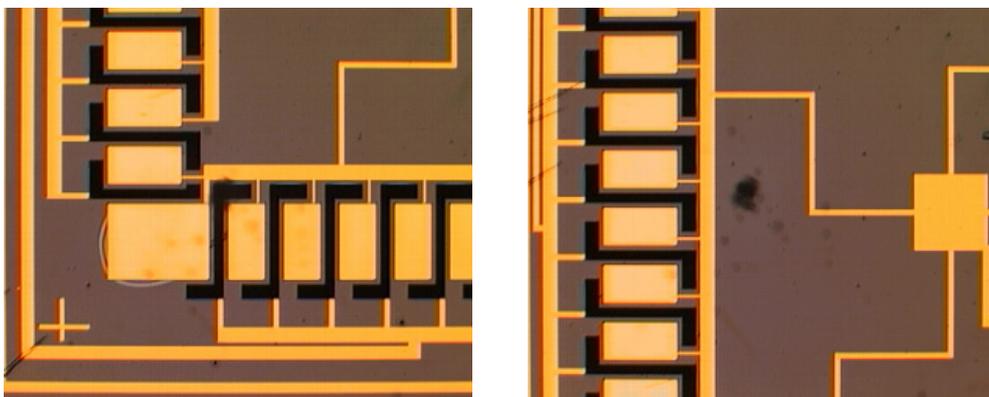


Figure 3-18 : Adhérence de la résine SU-8 sur de l'oxyde de silicium

Lors de la conception des motifs servant à la caractérisation des matériaux déposés par électrochimie, nous avons pensé à une simplification des étapes de fabrication. Le principe consiste à faire croître les matériaux au travers de moules directement déposés sur une métallisation recouvrant toute la surface du wafer. Ainsi, nous avons été amenés à tester l'accroche de la résine sur du métal et en particulier l'or. Des décollements de résine et des craquelures sont apparus comme le montre la figure 3-19.

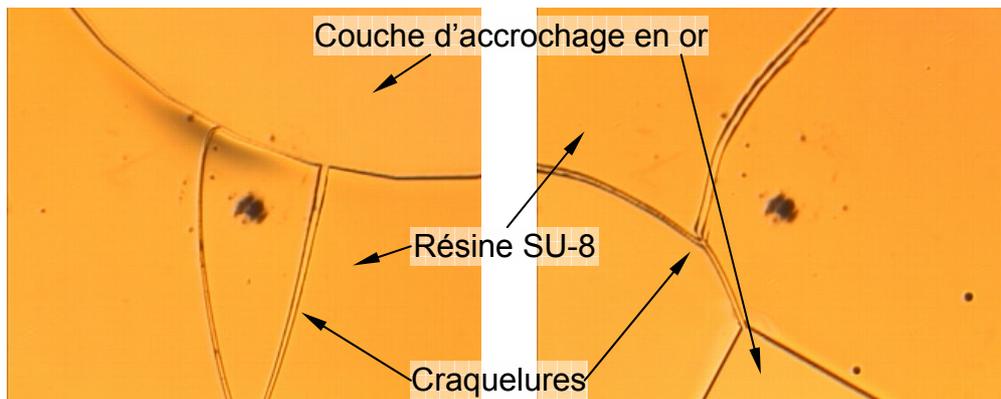


Figure 3-19 : Adhérence SU-8 sur l'or

En résumé, nous pouvons conclure sur la mauvaise adhérence de la résine sur nitrure de silicium et or, et une adhérence satisfaisante sur oxyde de silicium et polymère. Ces résultats corroborent les travaux de H.-K. Chang et al [12] sur l'étude des contraintes de la résine épaisse SU-8. Toutefois, il faut rester prudent sur les résultats publiés. En effet, les travaux de H. Lorenz et al [11] sont en contraction avec ceux de H.-K. Chang et al [12] par rapport à l'adhérence de la résine sur l'or, par exemple.

Une autre solution, non testée, consiste à agir sur l'état surface du substrat par attaque chimique afin d'augmenter la surface de contact entre la résine SU-8 et le substrat.

Afin d'améliorer encore l'adhérence de la résine, nous effectuons avant enduction, un traitement qui consiste à bombarder la surface avec des ions oxygène au moyen d'un réacteur à gravure plasma-oxygène. L'oxygène emprisonné permet d'augmenter le nombre de liaison avec le polymère.

Optimisation des motifs :

Du fait de la polymérisation de la résine, les contraintes internes augmentent. Ces contraintes sont d'autant plus importantes que la surface de résine réticulée est grande. Aussi, lors de la réalisation des moules, il faut prendre en compte ce phénomène et limiter les surfaces de résine en séparant les moules élémentaires par des barrières de contraintes, c'est-à-dire des tranchées gravées dans la résine. La figure 3-20 illustre cette technique [12].

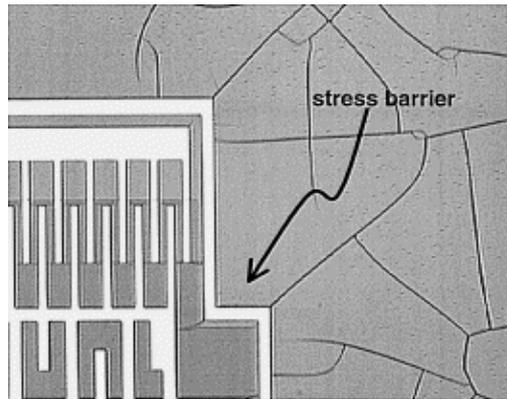


Figure 3-20 : Barrière de contraintes [12]

Optimisation du procédé :

Un autre point délicat dans la mise en œuvre de la résine SU-8 est le PEB (Post Exposure Bake). Lors de cette cuisson, la polymérisation est activée et c'est à ce moment que les contraintes apparaissent. Comme nous l'avons vu précédemment, nous effectuons des montées et descentes en température (Fig. 3-15) de façon à ne pas engendrer de chocs thermiques. Les rampes de température sont de l'ordre de 5°C/min en montée et en descente [12] [18].

Malgré la quantité d'informations recueillies, il est difficile de prévoir le comportement de la résine SU-8 notamment lors de l'empilement de couches. En effet, les couches inférieures devront supporter les traitements thermiques effectués pour la réalisation des niveaux supérieurs. Ces cuissons successives et les contraintes imposées par les niveaux supérieurs peuvent éprouver les résines des niveaux inférieurs.

Nous avons également envisagé comme solution alternative à la SU-8 un oxyde de silicium déposé par un procédé Sol-Gel photosensible. Toutefois, avec ce matériau, nous ne pouvons pas déposer des hauteurs de moule supérieures à 12µm en une seule étape. Cette épaisseur est insuffisante pour les structures envisagées. La figure 3-21 montre des défauts d'adhérence et de cassures dans ce matériau lors d'un dépôt électrolytique de NiFe.

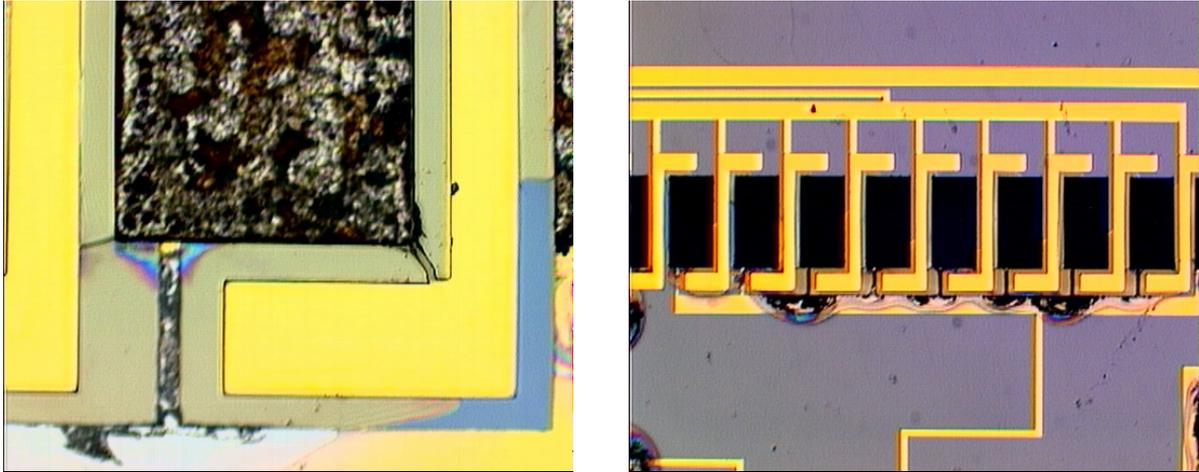


Figure 3-21 : Défauts d'adhérence et cassure de l'oxyde de silicium déposé par un procédé Sol-Gel

4. Les topologies

Afin de réaliser la micro-bobine, nos investigations ont porté sur deux types de topologies. La première structure est appelée "mixte" du fait qu'il s'agit d'une forme intermédiaire entre une structure "toroïdale" (solénoïde) et une structure en "méandre". La seconde structure est de type "spirale" dont le conducteur est pris en sandwich par le noyau magnétique. La topologie "mixte" est le résultat de travaux effectués par Hedi Hakim, dont je poursuis les travaux. La topologie "spirale" a été dimensionnée par le Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble (L.E.G.) qui possède les outils de simulation adaptés à l'étude des composants magnétiques.

4.1. Structure "mixte"

4.1.1 Présentation de la structure

Cette structure dérive de deux structures déjà existantes dans la littérature scientifique (Cf. Chap I). Elle est le résultat d'un compromis entre la topologie de type "toroïdal" et la topologie de type "méandre". La figure 3-22 représente la corrélation entre ces structures. La topologie "toroïdale" (a) se caractérise par un noyau magnétique réalisé sur un seul niveau (plan) tandis que le conducteur vient s'enrouler autour de ce noyau. À l'inverse, dans la topologie en "méandre", c'est le conducteur qui est réalisé sur un même plan et le noyau magnétique vient s'imbriquer à l'intérieur du conducteur. Ces deux structures nécessitent trois niveaux de matériaux. Concernant ce dernier point, la structure "mixte" est novatrice car elle est réalisée sur seulement deux niveaux de matériaux ce qui permet d'aller dans le sens d'une réduction des étapes de fabrication de la micro-bobine.

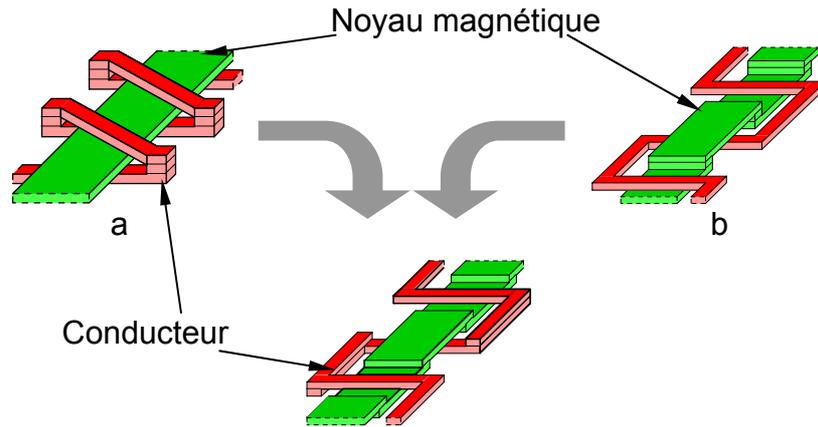


Figure 3-22 : Principe des structures "toroïdale" (a), "méandre" (b) et "mixte" (bas)

L'inconvénient de la réalisation d'un conducteur sur plusieurs niveaux (ici deux) est l'accroissement de sa résistance du fait de la présence d'interconnexions entre les couches de matériaux. Ces interconnexions augmentent cette résistance car elles sont le résultat d'une croissance du conducteur en plusieurs étapes. Ainsi à l'interface de contact, la présence de pollutions, d'oxydations ou autres défauts de croissance modifiera cette résistance globale. Afin de limiter cet effet, nous avons réalisé des interconnexions présentant une large surface de contact. Ce phénomène s'applique également au noyau magnétique, mais des interconnexions de moins bonne qualité entre les deux niveaux de matériau magnétique ne dégradent pas autant les caractéristiques du composant. La modification de la composition du noyau aux interconnexions changera localement la perméabilité du noyau sur une très faible épaisseur. Cela n'aura qu'une incidence minime sur la réluctance globale du noyau et de ce fait sur la valeur de l'inductance du composant.

Du fait de l'originalité cette structure, son dimensionnement n'a pas été optimisé pour un gain de place dans un contexte d'intégration mais pour une étude de faisabilité. Le premier dimensionnement et le premier jeu de masques de photolithographie ont été réalisés par Hedi Hakim. Ces masques ont permis de faire les premiers travaux sur les dépôts électrolytiques présentés dans les paragraphes de ce chapitre concernant les bains de cuivre et de NiFe.

Pour estimer les dimensions physiques de cette inductance nous utilisons la formule classique (3-1) qui permet de déduire en première approximation, les relations géométriques en fonction de la valeur d'inductance désirée et de la nature des matériaux :

$$\frac{N^2 S_{\text{noyau}}}{l_{\text{noyau}}} = \frac{L}{\mu_0 \mu_r} \quad (3-1)$$

Où le produit $\mu_0\mu_r$ est la perméabilité magnétique du circuit magnétique, L la valeur d'inductance, N le nombre de spires de la bobine et S et l_{noyau} sont respectivement la section et la longueur moyenne du circuit magnétique. La valeur d'inductance L est donnée par le cahier des charges du micro-convertisseur ($L=1,25 \mu\text{H}$). Pour la perméabilité relative μ_r du $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ nous prendrons la valeur typique rencontrée dans la littérature scientifique soit $\mu_r=800$ (Cf. Chap I et II) ($\mu_0=4.\pi.10^{-7}\text{T.m.A}^{-1}$).

Nous devons déterminer quatre inconnues, le nombre de spires, la longueur moyenne du noyau ainsi que l'épaisseur de la couche de matériaux et la largeur du noyau formant la section moyenne. Ces travaux s'inscrivent dans le cadre d'une étude de faisabilité et non d'optimisation de cette structure. Aussi, nous prendrons des dimensions permettant de faciliter la réalisation. La bobine aura ainsi des côtes extérieures de 8mm par 8mm et une épaisseur de 50 μm de matériaux par couche. Ces dimensions sont reportées sur la figure 3-23.

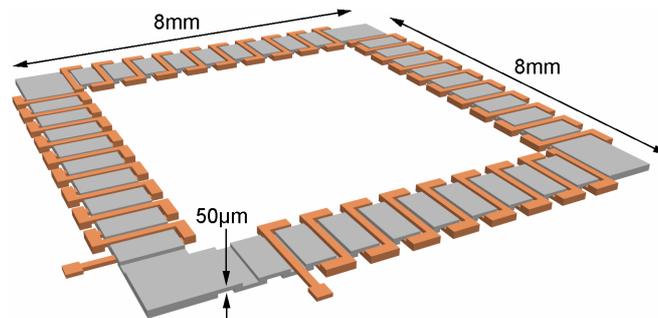


Figure 3-23 : Vue générale de la structure "mixte"

Si l'on fixe maintenant la largeur du noyau à 800 μm . Nous pouvons en déduire le nombre de spire.

En utilisant les dimensions et la géométrie choisies, nous obtenons $S=4.10^{-8}\text{m}^2$ et $l_{noy}=3,12.10^{-2}\text{m}$. Le nombre de spire peut alors être calculé par la relation :

$$N = \sqrt{\frac{l_{noy}L}{\mu_0\mu_r S_{moy}}} \quad (3-2)$$

Pour atteindre la valeur de 1,25 μH , $N=32$ spires sont nécessaires, soit 8 spires par côté de la bobine. Nous porterons ce nombre à 10 spires par côté soit 40 spires au total, ceci afin de majorer la valeur d'inductance de la micro-bobine et ainsi nous donner une marge de valeur sur la perméabilité relative du matériau magnétique. Si cette perméabilité relative μ_r correspond à la valeur typique de 800, nous obtiendrons alors une inductance de :

$$L = 1,86 \mu\text{H}$$

Ce surdimensionnement n'est pas préjudiciable au fonctionnement du microconvertisseur.

L'épaisseur d'isolant sera de 50µm entre noyau et NiFe sur un même niveau. Cette épaisseur est nécessaire non seulement pour isoler électriquement noyau et conducteur mais également pour consolider mécaniquement cet isolant qui nous sert de moule pour la croissance électrolytique. L'épaisseur de cet isolant va déterminer le parcours du conducteur autour du noyau et donc sa longueur moyenne l_{cond} et sa section moyenne S_{cond} .

Nous pouvons déduire la valeur théorique de sa résistance par la relation (3-3) :

$$R_{cond} = \rho \frac{l_{cond}}{S_{cond}} \quad (3-3)$$

Le matériau utilisé pour la réalisation du conducteur étant du cuivre, nous prenons la résistivité typique $\rho_{cu}=1,7.10^{-8}\Omega.m$ de cet élément pour nos calculs.

Avec les dimensions déterminées ci-dessus nous en déduisons les valeurs $l_{cond}=1,02.10^{-1}m$ et $S_{cond}=5.10^{-9}m^2$. Nous obtenons alors une résistance R_{cond} de :

$$R_{cond} = 3,45.10^{-1}\Omega$$

La résistance représente 15% de la charge en sortie qui est de 2,25Ω pour atteindre la puissance de sortie de 1W avec une tension de sortie de 1,5V.

Les dimensions et le détail des parties du noyau magnétique et du conducteur sont représentés séparément sur la figure 3-24. Cette représentation ne tient pas compte des quelques micromètres d'isolant qui sépareront les deux niveaux. En effet, le matériau magnétique étant également un matériau conducteur, il est nécessaire de l'isoler pour ne pas mettre les spires en court-circuit. L'épaisseur de chaque niveau de matériau est de 50µm.

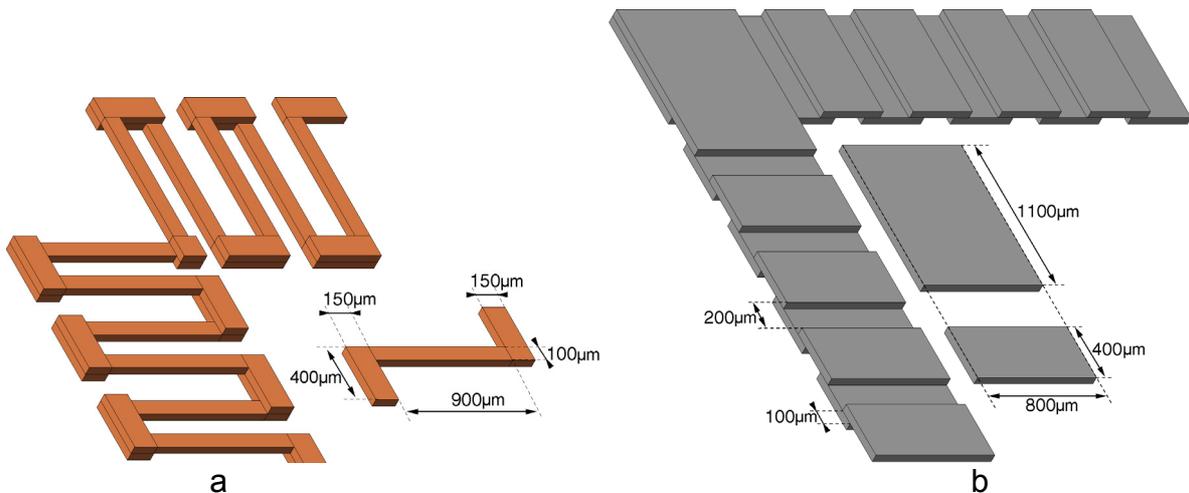


Figure 3-24 : Détails et dimensions du conducteur (a) et du noyau magnétique (b)

4.1.2 Procédé technologique complet

Comme nous l'avons présenté dans le paragraphe précédent, l'originalité de cette structure réside dans la diminution des étapes technologiques de fabrication. En effet, la micro-bobine de type "mixte" est agencée sur deux niveaux de matériaux comparée aux trois niveaux requis pour les micro-bobines à noyau magnétique rencontrées dans la littérature scientifique (Cf. Chap. I). Cette particularité permet de réduire d'une part le nombre de procédés technologiques de fabrication, et d'autre part l'épaisseur totale du composant (deux couches au lieu de trois).

En revanche, si cette structure réduit les phases délicates d'empilement de couche de matériaux, elle implique une mise au point de techniques spécifiques permettant la croissance électrochimique des deux matériaux conducteur et magnétique sur un même niveau. Les difficultés principales de cette technique résident dans l'aménagement de la couche d'accrochage servant également d'électrode de travail, et la compatibilité des matériaux dans les différents bains d'électrochimie. La figure 3-25 représente le principe général de fabrication de la micro-bobine "mixte".

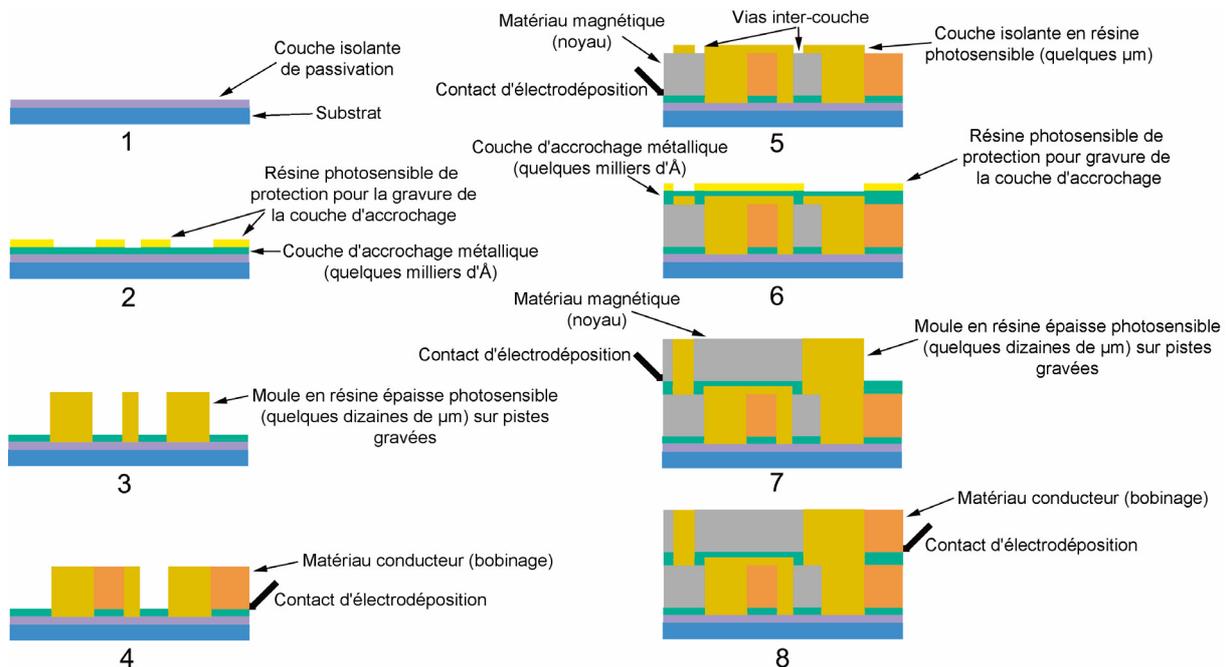


Figure 3-25 : Principe général de fabrication de la structure "mixte"

Dans un premier temps, on isole un substrat silicium par une couche de passivation (fig. 3-25-1). Nous déposons ensuite par pulvérisation une couche d'accrochage métallique qui jouera à la fois le rôle d'interface d'accrochage entre matériaux, et d'électrode de travail lors du dépôt. Cette couche est ensuite gravée par voie chimique suivant un réseau de motifs

protégés par une résine de masquage déposée par un procédé de photolithographie (fig. 3-25-2). Ce réseau est électriquement séparé en deux sous-réseaux distincts. Un réseau alimente en courant les moules servant à la croissance de la partie inférieure du conducteur et l'autre réseau alimente les moules servant à la croissance de la partie inférieure du noyau magnétique. Une fois la résine de masquage enlevée, on dépose sur ce réseau de conducteurs les moules en résine épaisse (fig. 3-25-3). La croissance des matériaux sur le premier niveau débute par le dépôt de la partie inférieure du conducteur en cuivre (fig. 3-25-4). Puis nous effectuons la croissance de la partie inférieure du noyau magnétique en $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$. La réalisation du premier niveau est alors achevée. Les moules en résine épaisse restent en place et servent d'isolant électrique entre les différents matériaux. Nous isolons ensuite ce premier niveau par l'intermédiaire d'une couche de résine comportant des "vias" d'interconnexions entre les deux niveaux (fig. 3-25-5). Sur cette résine, une nouvelle couche d'accrochage métallique est déposée par pulvérisation. Comme pour le premier niveau, cette couche d'accrochage a un double rôle. Aussi, cette couche est gravée par voie chimique au travers d'une résine de masquage déposée par une technique de photolithographie. Comme pour le premier niveau, les motifs réalisés par cette gravure laisse apparaître deux réseaux conducteurs électriquement distincts qui serviront à la croissance électrolytique (fig. 3-25-6). Nous réalisons ensuite les moules en résine épaisse que nous remplissons de $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ pour la partie supérieure du noyau magnétique (fig. 3-25-7) et de cuivre pour la partie supérieure du conducteur (fig. 3-25-8). Cette technique nécessite 5 étapes de photolithographie comparées aux 7 niveaux de masquage que nécessitent les micro-bobines à noyau magnétique que nous trouvons dans la littérature scientifique.

Nous avons vu ci-dessus le principe général de fabrication de la structure "mixte". Cependant, même si, d'un premier abord, la réalisation de cette structure paraît simple, chaque étape a nécessité une mise au point spécifique.

4.1.3 Problèmes rencontrés et solutions proposées

Pour réaliser cette structure, quatre jeux de masques ont été nécessaires. Chaque jeu de masque apporte des solutions et des améliorations face au problèmes rencontrés lors des tentatives de réalisation avec les masques précédents. La plupart des tests et mises au point de résine et de dépôts électrolytiques ont été faits avec les premiers masques de la structure "mixte".

Cette structure ayant été la première étudiée, les solutions apportées afin de surmonter les difficultés lors de la mise au point de la fabrication de cette structure, ont profité à l'élaboration de la seconde structure.

Nous n'aborderons ici que les problèmes liés à la conception des micro-bobines. Les difficultés de mise au point des résines et des bains électrolytiques ont été présentées dans les paragraphes précédents. Ainsi, Lors de la conception de cette micro-bobine, les difficultés que nous avons rencontrées concernent quatre aspects de la fabrication :

- L'adhérence de la résine et les contraintes de dépôt
- L'adhérence de la couche d'accrochage
- L'homogénéité des dépôts électrochimiques
- Compatibilité des bains d'électrochimie

Nous avons découvert et solutionné les problèmes tout au long des réalisations de jeu de masque. Aussi nous allons suivre l'ordre des jeux de masques afin de montrer les difficultés rencontrées et les solutions proposées pour y remédier. Nous sommes partis du jeu de masque réalisé par Hedi Hakim pour commencer notre étude.

Jeu de masque n°1 (Hedi Hakim) :

Ce premier jeu de masque a été réalisé avec la principale priorité de faire croître par électrochimie deux matériaux sur une même couche. Ainsi l'agencement de la piste d'accrochage en deux réseaux distincts permettant d'alimenter en courant les moules du conducteur et du noyau magnétique fut le principal objectif. Ainsi la couche d'accrochage a été aménagée de sorte que, une fois le composant découpé, la couche d'accrochage ne court-circuite pas l'enroulement de la micro-bobine. La représentation de l'aménagement de la couche d'accrochage d'un quart de plaquette et du détail au niveau de la micro-bobine est montrée en annexe.

Lors des premiers essais d'électrodéposition nous avons validé cette technique et mis en évidence la faisabilité de dépôt de deux matériaux différents sur une même couche.

Nous avons également mis en évidence la forte disparité des épaisseurs de matériau sur l'ensemble de la plaquette. Et nous avons fait le rapprochement entre la longueur de la piste d'amenée de courant et l'épaisseur de matériau déposé. Nous n'avons pu faire ces observations que sur les motifs correspondant au conducteur.

En effet, un phénomène d'arrachement, décrit dans le paragraphe relatif aux dépôts électrochimiques de NiFe, ne nous a pas permis de vérifier l'inégalité d'épaisseur sur les motifs du noyau magnétique. Si l'on observe le dessin de cette couche d'accrochage au niveau d'une bobine (figure 3-26), nous voyons qu'un des motifs du noyau magnétique sert à répartir le courant dans les autres motifs du noyau. Ceci laisse supposer que ce premier rectangle où arrive l'amenée de courant est le lieu d'une densité de courant très supérieure. Ce qui explique que ce rectangle s'arrache préférentiellement lors du dépôt. En effet, plus la densité de courant est importante, et plus les contraintes dans le matériau NiFe seront élevées [1] ce qui a pour conséquence de décoller le motif et ainsi de couper la circulation du courant vers les autres motifs du noyau de la micro-bobine.

Du fait de la mauvaise répartition du courant entre les micro-bobines sur un même quart de plaquette, les plots de répartitions de courant (fig 3-26) les plus proches des contacts d'amenées de courant et ainsi bénéficiant des plus fortes densités de courant vont s'arracher les uns après les autres, par un phénomène d'avalanche. Le courant imposé par le générateur de courant étant constant, à chaque arrachement de plot, le courant est d'autant réparti sur les autres plots et donc avec une densité à chaque fois supérieure.

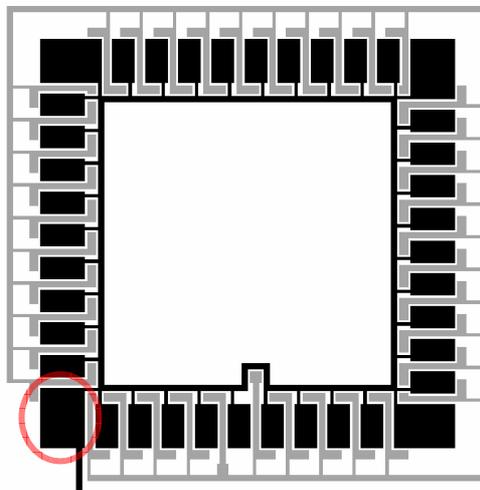


Figure 3-26 : Dessin de la couche d'accrochage au niveau d'une bobine.

Ainsi nous avons essayé de remédier à ce problème en améliorant la répartition du courant entre chaque micro-bobine, afin qu'aucune micro-bobine ne soit favorisée. Ceci a pu être réalisé en modifiant la largeur des pistes d'amenée de courant de sorte que toutes les bobines puissent "voir" la même résistance à partir du plot de contact de la plaquette. C'est cette modification dont a profité le deuxième jeu de masque.

Ce premier jeu de masque a également permis de mettre en évidence des problèmes de tenue de la résine SU-8.

Jeu de masque n°2 :

Ce second jeu de masque a été réalisé en tirant parti des problèmes rencontrés lors de l'utilisation du jeu de masque précédent. Ainsi, par rapport à son prédécesseur nous avons amélioré la répartition du courant entre les micro-bobines. Pour se faire, nous avons utilisé à nouveau la relation 3-3 (voir § 4.1.1) permettant de calculer la résistance R de la piste d'amenée de courant, où ρ est la résistivité du matériau utilisé pour la couche d'accrochage, e l'épaisseur de la couche d'accrochage, L est la longueur de la piste et l sa largeur.

$$R = \frac{\rho \cdot L}{e \cdot l} \quad (3-3)$$

Nous avons choisi de garder la même disposition des micro-bobines afin d'exploiter de façon optimale toute la surface de la plaquette. Nous avons accru les ramifications des pistes au niveau du contact de la plaquette de sorte à contrôler totalement la circulation du courant. Puis la largeur l de chaque piste est calculée afin que chaque micro-bobine soit séparée des plots de contact (conducteur et noyau) de la plaquette par une même résistance. Ainsi les micro-bobines étant toutes identiques, elles sont toutes alimentées par un courant identique. Nous avons simulé la répartition du courant sous PSPICE.

Cette amélioration a affectivement apporté des résultats positifs et a accru l'homogénéité des épaisseurs entre chaque bobine. Cette homogénéité n'a été constatée que sur les motifs du conducteur car l'amélioration escomptée au niveau de l'arrachement des plots de répartition interne aux bobines n'a pas été vérifiée. Par contre, cela a mis en évidence une nouvelle complication en terme d'homogénéité d'épaisseur mais cette fois-ci localisée au niveau de la micro-bobine. En effet, ici aussi, les motifs présentent une gradation d'épaisseur visiblement liée à la distance par rapport à l'arrivée de courant. On observe une diminution de l'épaisseur au fur et à mesure que le motif est éloigné de l'arrivée en courant. La figure 3-27 illustre ce phénomène. La différence d'épaisseur est de l'ordre de 30% (mesurée au Tencor).

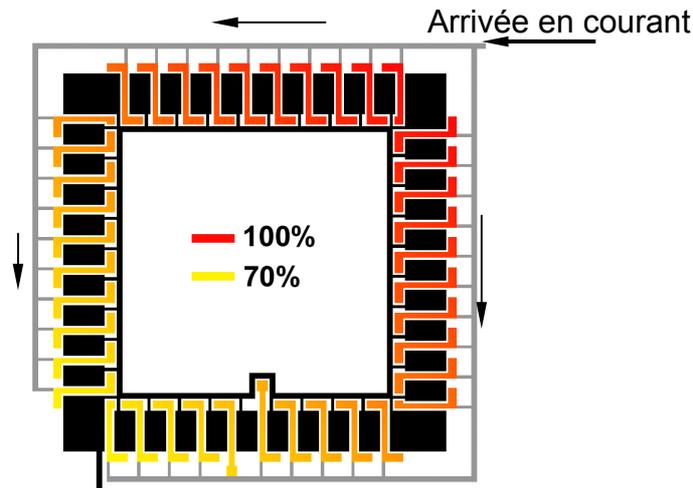


Figure 3-27 : Différence d'épaisseur liée à la distance entre le motif et l'arrivée en courant

Le décollement et le craquellement des moules en résine SU-8 restent toujours problématiques. Nous essayons d'en diminuer les conséquences d'une part en "relaxant" la résine en la faisant tremper dans son solvant le GBL (Gamma-Butyrolactone), d'autre part en diminuant les chocs thermiques lors du dépôt électrochimique de NiFe. Ce phénomène peut également être attribué aux contraintes exercées par le dépôt de NiFe sur les moules.

Afin de corriger la mauvaise répartition du courant à l'intérieur même de la micro-bobine et en conséquence l'homogénéité des dépôts, nous avons amélioré la disposition des amenées de courant dans la bobine. Ce qui nous a amené à réaliser un troisième jeu de masque.

Jeu de masque n°3 :

Ce jeu de masque corrige à la fois la disparité d'épaisseur entre les micro-bobines, ainsi qu'à l'intérieur même des micro-bobines. Afin de réaliser ce jeu de masque, nous avons utilisé une simulation de la répartition du courant sous PSPICE. Les résultats de cette simulation prévoient un écart d'épaisseur de l'ordre de 3%. La même disposition des micro-bobines a été gardée, toujours dans un souci d'optimisation de la surface utilisée de la plaquette de silicium. Sur ce jeu de masque, la résistance des pistes d'amenée de courant allant du plot jusqu'à la micro-bobine n'est plus contrôlée par la largeur de la piste mais par sa longueur. En effet, cette technique nous permet de nous affranchir d'éventuel problème de sur-gravure lors de l'attaque de la couche d'accrochage. Cette sur-gravure peut modifier le rapport de résistance entre les pistes dans le cas d'un contrôle de résistance par la largeur de piste, ce qui n'est pas le cas sur un contrôle de la résistance de la piste par sa longueur. En outre, la répartition du courant au niveau de la micro-bobines a été entièrement revue. La figure 3-28 illustre cette nouvelle configuration.

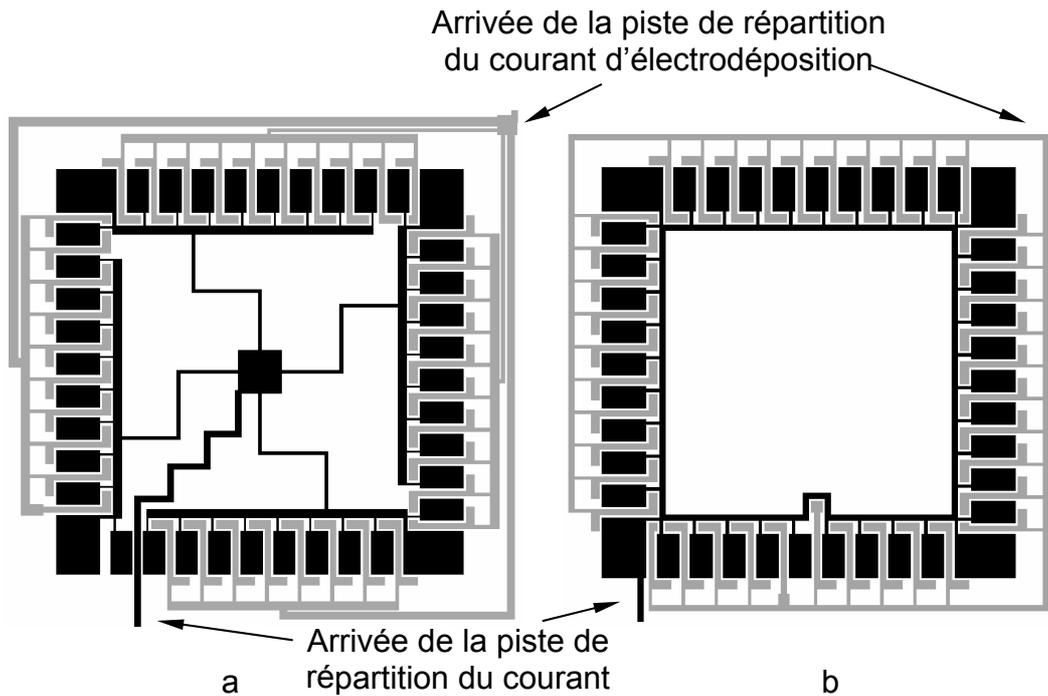


Figure 3-28 : Différence de répartition des amenées de courant dans les micro-bobines entre les jeux de masques N°3 (a) et N°2 (b)

Avec cette nouvelle disposition, nous sommes passés d'une disparité d'épaisseur du conducteur de 30% à 4% (mesuré au Tencor), à rapprocher des 3% prévu par la simulation PSPICE. Cette différence de 4% est négligeable pour la réalisation et le fonctionnement de la micro-bobine, ce qui n'était pas le cas avec les 30% précédemment obtenus avant cette modification. En effet, hormis l'accroissement de la résistance du conducteur, une différence de niveau de 30% représente, sur l'épaisseur de 50 μ m souhaitée, un creux de 15 μ m qui ne pourra pas être "planarisé" par la couche d'isolant de 5 μ m. Ainsi, la présence de forte irrégularité de surface aura pour conséquence de compromettre les photolithographies suivantes.

De plus, cette nouvelle configuration élimine le problème d'arrachement du coin du noyau servant de point de départ de la répartition du courant sur le reste du noyau, et améliore également l'homogénéité du dépôt de NiFe dans les moules du noyau.

Cependant les problèmes d'adhérence de la résine et de craquellement persistent. Ce qui va nous mener à la réalisation du quatrième et dernier jeu de masque.

Jeu de masque n°4 :

Ce nouveau jeu de masque a été optimisé pour améliorer l'adhérence et limiter les contraintes de la résine SU-8. Pour cela nous avons limité les surfaces de SU-8 afin de limiter les contraintes liées à la réticulation de surface importante d'un seul tenant. Des barrières de

"stess" séparent également chaque dispositif. Nous avons également diminué le nombre de spires afin d'augmenter la surface de résine entre les moules et ainsi accroître l'adhérence et l'adhérence de la résine autour des moules. Les pistes d'amenées de courant ont également été éloignées des moules car l'adhérence de la SU-8 sur le métal (Au) est moins bonne que sur l'oxyde de silicium. Nous avons également réduit le nombre de micro-bobines à une par quart de plaquette dans le but de minimiser le nombre de plaquette perdue lors de fréquents problèmes d'attaque de la couche d'accrochage dues à des imperfections de la résine protectrice et qui à pour conséquence de court-circuiter les deux réseaux de piste conductrice. Ainsi moins l'enchevêtrement des pistes est complexe plus la probabilité de court-circuit est faible. La figure 3-29 illustre la différence

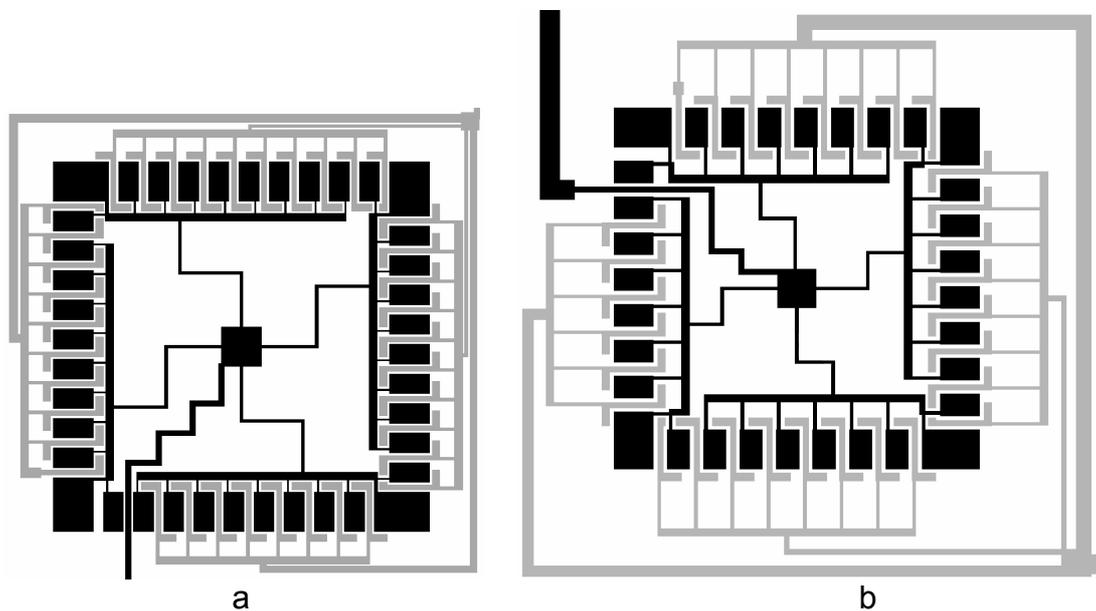


Figure 3-29 : Différence d'aménagement des pistes et moules au niveau des micro-bobines entre les jeux de masques N°3 (a) et N°4 (b)

Ce dernier jeu de masque nous a permis de sortir les premiers prototypes de micro-bobine de topologie "mixte".

Lors de l'utilisation de ce quatrième jeu de masque, nous avons changé de solution électrolytique pour les bains de cuivre et de NiFe afin d'améliorer la qualité et l'homogénéité des dépôts métalliques. Les densités de courant utilisées pour ce jeu de masque avec les solutions II de cuivre est de $8A.dm^2$ et est de $1,5A.dm^2$ avec la solution II de NiFe. Il s'est avéré que ces bains ne sont pas compatibles entre eux (voir § 3.1.2). Pour remédier à cet inconvénient nous avons mis au point une technique de protection par masquage. Une couche de protection permet d'empêcher la dissolution du cuivre dans le bain de NiFe et inversement évite le dépôt par "electroless" du cuivre sur le NiFe. Cette couche de protection est réalisée

au moyen d'une résine photosensible qui ne laisse apparaître que les moules que l'on veut charger. La figure 3-30 illustre cette technique.

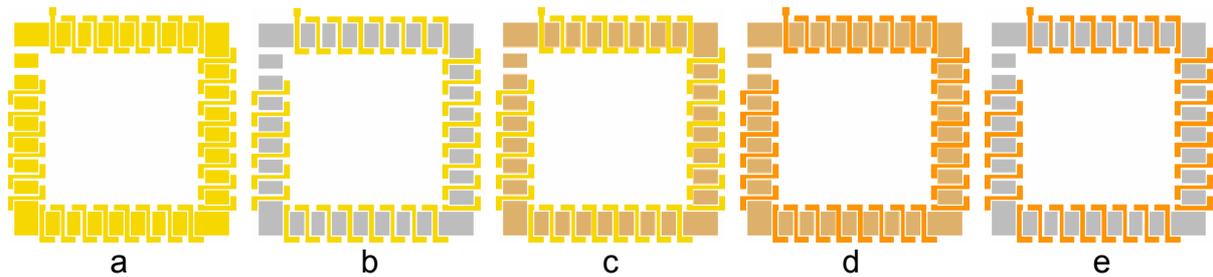


Figure 3-30 : Illustration de la technique de masquage permettant de pallier à l'incompatibilité des bains d'électrochimies. Moules du noyau et du conducteur vides (a) ; Croissance de NiFe dans les moules du noyau (b) ; Protection de la croissance NiFe précédente par une couche de résine AZ4562 (c) ; Croissance du Cu dans les moules du conducteur (d) ; Élimination de la résine de protection (e)

L'électrodéposition d'une fine sur-couche en Au peut également remplacer la couche de protection en résine positive AZ4562. Dans ce cas, cette couche protectrice sera permanente. Aussi, nous choisirons de commencer par la croissance du conducteur en cuivre enfin que ce soit ce dernier qui supporte la couche de protection en Au. En effet, si nous commençons par la croissance de NiFe du noyau, la couche de protection sera supportée par le noyau et créera un entrefer entre les deux niveaux de matériau.

Les résultats obtenus lors de la fabrication de la structure "mixte" sont présentés dans le chapitre suivant.

À la suite de simulations réalisées par le L.E.G. (Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble) sur cette structure, il s'est avéré que la topologie "mixte" n'est pas adaptée à l'application de conversion d'énergie que nous visons. En effet, la valeur d'inductance répond aux spécifications du cahier des charges du micro-convertisseur (Cf. Chap. II), mais son aptitude à stocker l'énergie n'est pas adéquate. Le volume du noyau en NiFe sans entrefer est de $1,25 \cdot 10^{-9} \text{m}^3$ qui est très inférieur aux $6,14 \cdot 10^{-9} \text{m}^3$ de NiFe requis pour stocker l'énergie nécessaire au fonctionnement du micro-convertisseur (Cf. Chap. II). L'absence d'entrefer est un handicap pour le stockage d'énergie. De plus, le noyau n'est pas adapté pour un fonctionnement en haute fréquence (500 kHz). En effet, le matériau NiFe est conducteur ($20\text{--}30 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) ainsi l'apparition de pertes par courant de Foucault et de l'effet de peau (Cf. Chap. II) impose le feuilletage du noyau magnétique. Ceci soutient le fait que cette structure n'est pas adaptée à l'application qui nous intéresse. Néanmoins, cette topologie pourra trouver sa place dans des applications à basse fréquence ne nécessitant un stockage

d'énergie, par exemple des micro-transformateurs. Aussi, notre étude s'est poursuivie sur un autre type de structure dont le dimensionnement a été réalisé par le L.E.G..

4.2. Topologie "spirale"

4.2.1 Présentation de la structure

Le dimensionnement de cette structure a été réalisé par le L.E.G. dans le cadre du projet INDUCSIL. Ces travaux ont fait l'objet d'une thèse soutenue par Jean-Marc Boggetto. Nous ne reviendrons pas sur les calculs du dimensionnement que l'on peut trouver dans le manuscrit de la thèse susmentionnée [19][20]. Cette structure doit répondre aux spécifications du micro-convertisseur par sa valeur d'inductance et sa capacité à stocker l'énergie magnétique. De plus, la réalisation de cette micro-bobine doit également être compatible avec les moyens technologiques de la microélectronique. De notre côté, nous avons posé le cadre technologique en informant le L.E.G. des limites de notre savoir-faire en matière de dépôts de résines et électrochimiques. Les matériaux utilisés ont été choisis au Chapitre II : du cuivre électrolytique pour le conducteur et du Ni₈₀Fe₂₀ électrolytique pour le noyau magnétique.

Comme nous l'avons également vu dans le chapitre II, il s'avère nécessaire de feuilletter le noyau magnétique pour un fonctionnement à 500 kHz afin d'homogénéiser la pénétration du champ magnétique à l'intérieur du noyau. Nous avons opté pour un feuilletage vertical permettant de simplifier la réalisation du noyau et de diminuer les étapes technologiques.

Nous avons fixé l'épaisseur maximale matériaux à 100µm par niveau. Cette limite est donnée par notre savoir-faire au moment du dimensionnement, sachant que nous ne connaissions pas non plus le comportement de la résine SU-8 en multicouche qui est alors une interrogation majeure susceptible de limiter le nombre de couche de matériaux. Nous avons également fixé le rapport de forme des motifs à 1:15 (largeur:hauteur) qui correspond aux limites de la résine SU-8. De ces contraintes technologiques, le L.E.G. a proposé la structure représentée sur la figure 3-31 :

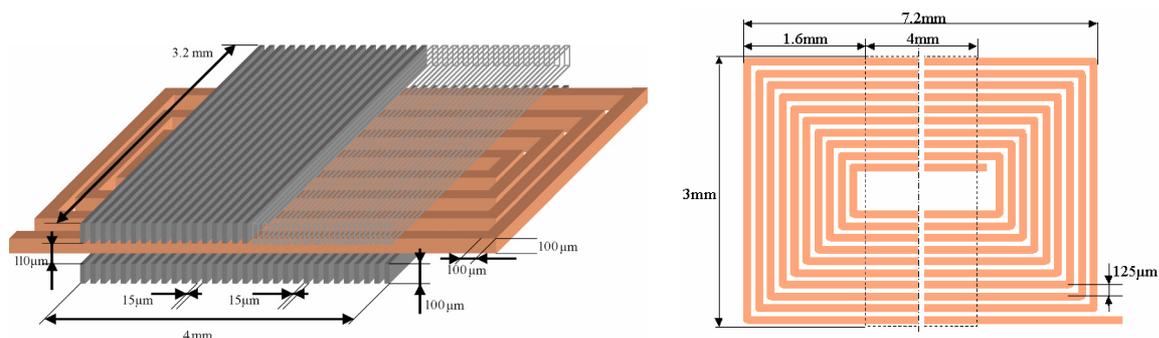


Figure 3-31 : Dimensions de la structure proposée par le L.E.G.

Cette structure est de type spirale avec un noyau magnétique prenant le conducteur en sandwich. Le composant occupe une surface de $7,2\text{mm} \times 3,2\text{mm} = 23,04\text{mm}^2$ pour une épaisseur totale de $320\mu\text{m}$. Une vue générale à l'échelle est montrée sur la figure 3-32. L'entrefer servant au stockage de la majeure partie de l'énergie se situe au milieu de la spirale et sur les côtés.

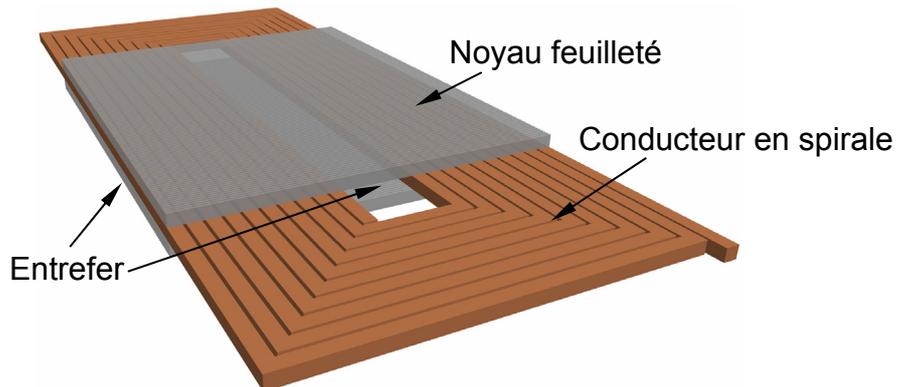


Figure 3-32 : Vue générale de la structure en "spirale"

Le conducteur est réalisé sur un seul niveau ce qui l'affranchit de vias d'interconnexions pouvant augmenter sa résistance. Il a une longueur de 15cm pour une section de $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m} = 10^4\mu\text{m}^2$ ce qui lui confère une résistance totale de $0,2\Omega$ en statique (Cf. Chap II § 5.5).

Après le descriptif de cette nouvelle structure, nous allons donner les étapes technologiques requises pour sa fabrication.

4.2.2 Procédé technologique complet

Le procédé de fabrication de cette structure s'apparente à celui de la structure mixte. Ce sont les mêmes techniques et les mêmes matériaux qui sont utilisés pour la réalisation de cette topologie. Nous voyons que pour réaliser cette structure, trois niveau de matériaux est nécessaire. Ce qui ajoute deux étapes de photolithographie supplémentaires par rapport à la structure "mixte".

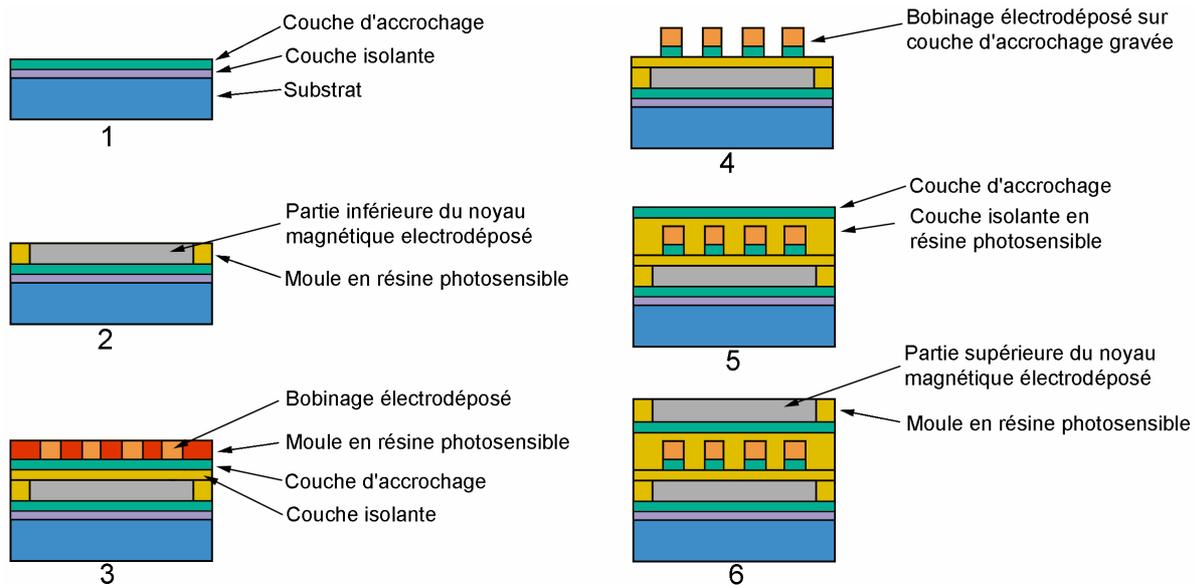


Figure 3-33 : Principe général de fabrication de la structure "spirale"

Nous commençons par isoler un substrat silicium avec une couche de passivation. Nous déposons ensuite par pulvérisation une couche d'accrochage métallique qui jouera à la fois le rôle d'interface d'accrochage entre matériaux, et d'électrode de travail lors du dépôt (fig. 3-33-1). Cette couche est ensuite gravée par voie chimique suivant un réseau de motifs protégés par une résine de masquage déposée par un procédé de photolithographie. Ce réseau alimente en courant les moules servant à la croissance de la partie inférieure du noyau magnétique. Ce réseau formé de pistes conductrices permet de répartir de façon homogène le courant d'électrochimie. Une fois la résine de masquage enlevée, on dépose sur ce réseau de conducteurs les moules en résine épaisse. Puis nous effectuons la croissance de la partie inférieure du noyau magnétique en $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$. La réalisation du premier niveau est alors achevée (fig. 3-33-2). Les moules en résine épaisse restent en place et servent d'isolant électrique entre les feuilles du noyau magnétique. Nous isolons ensuite ce premier niveau par l'intermédiaire d'une couche de résine. Sur cette résine, une nouvelle couche d'accrochage métallique est déposée par pulvérisation. Comme pour le premier niveau, cette couche d'accrochage a un double rôle. Contrairement au niveau précédent, cette couche d'accrochage n'est pas gravée et recouvre donc tout le wafer. Sur cette couche métallique, des moules en forme de spirale en résine épaisse positive sont réalisés et remplis de cuivre par voie électrochimique. La résine positive adhère très bien sur le métal et la croissance du cuivre est suffisamment homogène sans avoir recours à une distribution du courant (fig. 3-33-3). Une fois le conducteur achevé, nous enlevons la résine positive. Puis nous gravons par attaque chimique sélective les parties de la couche d'accrochage en Ti/Au non recouvertes par le

cuivre afin de ne pas mettre les spires en court-circuit (fig. 3–33–4). Une couche en résine SU-8 vient recouvrir et isoler les spirales excepté au niveau des contacts des bobines. Ceci termine le second niveau de cette structure. Nous achevons la réalisation de la structure par la partie supérieure de noyau magnétique. Ainsi, une couche d'accrochage métallique est déposée sur la résine puis gravée par voie chimique au travers d'une résine de masquage. Comme pour le premier niveau, les motifs réalisés par cette gravure laisse apparaître un réseaux de ligne conductrice qui serviront à la croissance électrolytique (fig. 3–33–5). Nous réalisons ensuite les moules en résine épaisse que nous remplissons de $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ pour la partie supérieure du noyau magnétique (fig. 3–33–6). Cette technique nécessite 7 étapes de photolithographie.

4.2.3 Problèmes rencontrés et solutions proposées

Du fait que la technologie employée dans la réalisation de cette structure est identique à celle utilisée pour la réalisation de la structure "mixte", nous avons profité de cette expérience acquise pour contourner les obstacles précédemment rencontrés. Ainsi les difficultés rencontrées ici sont liées aux formes des motifs et à l'empilement des trois niveaux de matériaux.

Tout comme la structure mixte, l'électrodéposition du noyau magnétique laminé verticalement nécessite l'élaboration d'un réseau de pistes conductrices qui contribue à la répartition du courant d'électrochimie. Ce réseau est présenté en annexe sur un quart de plaquette. Il a été optimisé en utilisant des simulations électriques sous PSPICE. La figure 3–34 montre le détail au niveau d'une bobine, de la répartition des lignes conductrices permettant d'homogénéiser la distribution du courant lors de l'électrodéposition du noyau (en rouge).

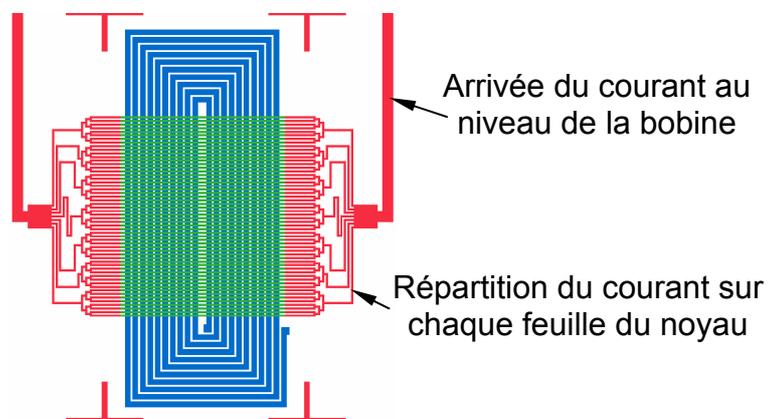


Figure 3-34 : *Détail des pistes conductrices d'amenée de courant d'une bobine pour l'électrochimie du NiFe*

La couche d'accrochage qui a été utilisée pour réaliser le niveau correspondant au conducteur en spirale n'a pas été aménagée. En effet, d'une part, il n'est pas possible de réaliser des lignes conductrices à l'intérieur de la spirale qui soient ensuite coupées comme pour la structure "mixte". D'autre part, l'homogénéité de la croissance du cuivre est bonne sans avoir recours à cette technique. Nous sommes donc obligés d'utiliser de la résine positive pour réaliser les moules servant à la croissance de la spirale en cuivre. Une fois le cuivre déposé, nous devons enlever la résine pour attaquer la couche d'accrochage de façon sélective. Dans un premier temps, nous avons utilisé une couche d'accrochage en Cr/Au (500Å/2000Å) car le chrome a une bonne adhérence sur la résine. Malheureusement, une fois la couche d'or attaquée au moyen d'une solution "KI+I₂", la solution "chromium etchant" utilisée pour enlever la couche de chrome attaque également le cuivre. La figure 3-35 montre le résultat d'une attaque par solution "chromium etchant". On distingue la spirale en Cr/Au qui est restée en place du fait de la présence de la couche d'or sur la couche de chrome lors de l'attaque du chrome et du cuivre.

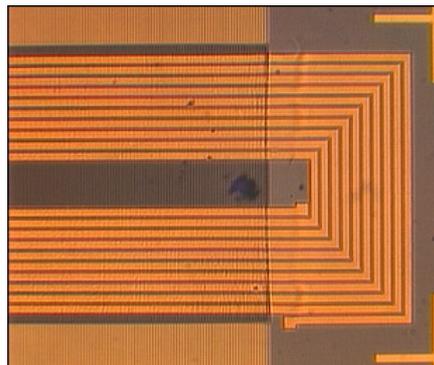


Figure 3-35 : *Problème de sélectivité d'attaque chimique. La spirale en cuivre a été attaquée en même temps que la couche de chrome.*

La couche de chrome est remplacée par une couche de titane afin de s'affranchir de ce problème de sélectivité (Cf. §3.2).

Lors de l'attaque de la couche d'or, il se produit également une réaction chimique entre le cuivre et la solution "KI+I₂". Une pellicule blanchâtre se forme en surface du cuivre et obstrue l'espace inter-spire. Ceci empêche l'attaque de la couche d'accrochage par la solution. Ce problème a été résolu en trempant le wafer dans la solution d'attaque or "KI+I₂" puis dans une solution appelée "copper cleaner", et ceci séquentiellement toute les 10s.

Ce ne sont pas les seules difficultés que l'on rencontre sur ce niveau, car une fois la spirale réalisée, nous devons la recouvrir d'une couche de SU-8 afin de l'isoler de la partie supérieure du noyau magnétique. Le pouvoir nivelant de cette résine n'est pas suffisant pour

aplanir totalement le niveau du conducteur. La résine épouse la forme de la spirale. Si l'on réalise la partie supérieure du noyau magnétique sur ce niveau non-planarisé, d'une part, l'entrefer sera modifié, d'autre part la fabrication du niveau supérieur sera compromise par les irrégularités de surface.

5. Conclusion.

Nous avons montré le principe général de réalisation des micro-bobines que nous voulons fabriquer. Nous avons également présenté les moyens technologiques que nous avons utilisés. Nous avons également travaillé sur la mise au point de ces moyens technologiques afin qu'ils répondent aux besoins de la fabrication des micro-bobines. Ces moyens sont l'électrochimie du cuivre, de l'alliage Fer-Nickel en proportion 80%/20% et la photolithographie de résines épaisses négative de type SU-8. Nous avons ensuite proposé deux structures de micro-bobine ainsi que leur procédé de fabrication. La première est la structure "mixte" dont la topologie novatrice favorise la réduction du nombre d'étapes de fabrication. Cette structure n'est pas adaptée à l'application de conversion d'énergie que nous visons mais reste néanmoins intéressante pour des applications à basses fréquences ne nécessitant pas de stockage d'énergie. La seconde est la structure en "spirale" dont le conducteur en forme de spirale est pris en sandwich par un noyau magnétique feuilleté. Cette structure, calculée et simulée par le L.E.G. (Laboratoire d'Électrotechnique de Grenoble) avec des outils spécifiques, répond aux spécifications du micro-convertisseur.

6. Références bibliographiques.

- [1] M. Schlesinger, M. Paunovic, *Modern Electroplating*, Fourth Edition, Chap 11, John Wiley and Sons, 2000.
- [2] S. D. Leith, D. T. Schwartz, "In-situ fabrication of sacrificial layers in electrodeposited NiFe microstructures", *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 9, pp. 97-104, 1999.
- [3] S. D. Leith, S. Ramli, and D. T. Schwartz, "Characterization of $\text{Ni}_x\text{Fe}_{1-x}$ ($0.10 < x < 0.95$) Electrodeposition from a Family of Sulfamate-Chloride Electrolytes", *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 146(4), pp. 1431-1435, 1999.
- [4] J. M. Shaw, J. D. Gelorme, N. C. LaBianca, W. E. Conley, S. J. Holmes, "Negative photoresists for optical lithography", *IBM J. Res. Develop.*, Vol. 41, pp. 33-39, 1997.
- [5] Bernd Loechel, "Thick-layer resists for surface micromachining", *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 10, pp. 108-115, 2000.
- [6] M. Brunet, T. O'Donnell, J. O'Brien, P. McCloskey, S. C. O Mathuna, "Thick photoresist development for the fabrication of high aspect ratio magnetic coils", *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 12, pp. 444-449, 2002.
- [7] J. O'Brien, P. J. Hughes, M. Brunet, B. Neill, J. Alderman, B. Lane, A. O'Riordan, C. O'Driscoll, "Advanced photoresist technologies for microsystems", *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 11, pp. 353-358, 2001.
- [8] J. Zhang, K. L. Tan, H. Q. Gong, "Characterization of the polymerization of SU-8 photoresist and its applications in micro-electro-mechanical systems (MEMS)", *Polymer Testing*, Vol. 20, pp. 693-701, 2001.
- [9] H. Lorenz, M. Despont, N. Fahrni, J. Brugger, P. Vettiger, P. Renaud, "High-aspect-ratio, ultrathick, negative-tone near-UV photoresist and its applications for MEMS", *Sensor and Actuators A*, Vol. 64, pp. 33-39, 1998.
- [10] E. H. Conradie, D. F. Moore, "SU-8 thick photoresist processing as a functional material for MEMS applications", *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 12, pp. 368-374, 2002.
- [11] H. Lorenz, M. Despont, N. Fahrni, N. LaBianca, P. Renaud, P. Vettiger, "SU-8 : a low-cost negative resist for MEMS", *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 7, pp. 121-124, 1997.
- [12] Hyun-Kee Chang, Yong-Kweon Kim, "UV-LIGA process for high aspect ratio structure using stress barrier and C-shaped etch hole", *Sensor and Actuators A*, Vol. 84, pp. 342-350, 2000.
- [13] K.Y Lee, N. LaBianca, S. A. Rishton, S. Zolgharnain, J. D. Gelorme, J. Shaw, T. H. -P. Chang, "Micromachining applications of high resolution ultrathick photoresist", *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 13(6), pp. 3012-3016, 1995.

- [14] L. J. Guerin, M. Bossel, M. Demierre, S. Calmes, P. Renaud, "Simple and low cost fabrication of embedded micro-channels by using a new thick-film photoplastic", Proc. Transducers'97, Chicago, pp. 1419-1422, June 1997.
- [15] J. R. Thorpe, D.P. Steenson, R. E. Miles, "High frequency transmission line using micromachined polymer dielectric", Electronics Letters, Vol. 34, pp. 1237-1238, 1998.
- [16] Che-Hsin Lin, Gwo-Bin Lee, Bao-Wen Chang, Guan-Liang Chang, "A new fabrication process for ultra-thick microfluidic microstructures utilizing SU-8 photoresist", J. Micromech. Microeng., Vol. 12, pp. 590-597, 2002.
- [17] H. Lorenz, M. Laudon, P. Renaud, "Mechanical characterization of a new high-aspect-ratio near UV-photoresist", Microelectronic Engineering, Vol. 41/42, pp. 371-374, 1998.
- [18] In-hyounk Song, Pratul K Ajmera, "Use of a photoresist sacrificial layer with SU-8 electroplating mould in MEMS fabrication J. Micromech. Microeng., Vol. 13, pp. 816-821, 2003.
- [19] Contribution à l'intégration d'une inductance sur silicium et étude de son convertisseur synchrone associé, Doctorat de J.-M. Boggetto, Université Joseph Fourier, Grenoble, 16 Octobre 2003, N°600, 263p., Président: J. Roudet, Rapporteurs: J.-L. Sanchez, F. Forest, Examineurs: B. Rivet, Directeurs de thèse: J.-P. Ferrieux, Y. Lembeye.
- [20] J.M. Boggetto, Y. Lembeye, and J.P. Keradec J.P. Ferrieux, "Micro fabricated power inductors on silicon", in 33rd Annual Power Electronics Specialists Conf., 2002.

Chapitre IV : Caractérisations et résultats

1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons montré les moyens technologiques de fabrications dont nous disposons et ceux que nous avons mis au point. Nous avons également donné le dimensionnement de deux structures de micro-bobines ainsi que leurs procédés de fabrication.

Dans ce chapitre, nous présenterons les caractérisations des matériaux ainsi que les résultats technologiques auxquels nous sommes parvenus. Dans un premier temps, nous chercherons à obtenir une estimation des caractéristiques magnétiques du matériau NiFe au moyen de dispositifs de forme torique dimensionnés en collaboration avec le CEGELY, chargé de cette caractérisation. Nous mesurerons ensuite la résistivité du cuivre et du NiFe en utilisant d'autres dispositifs spécifiques en forme de ruban. Nous terminerons par la présentation des premiers prototypes des topologies "mixte" et "spirale" que nous avons réalisés.

2. Caractérisations des matériaux déposés.

Pour dimensionner les micro-bobines, nous avons pris les valeurs typiques des caractéristiques des matériaux rencontrées dans la littérature scientifique (Cf. Chap II). Afin de savoir si nous déposons des matériaux ayant des caractéristiques similaires, nous avons réalisé des dispositifs spécifiques de test. Ces dispositifs sont de deux types. Des dispositifs en forme de ruban permettant de mesurer la résistivité du cuivre et du NiFe et d'autres en forme de tore pour obtenir la perméabilité magnétique du matériau magnétique. Il sera également possible de déterminer la proportion de fer et de nickel dans ce même matériau. Les mesures de résistivité ont été faites au LAAS/CNRS tandis que les caractérisations magnétique et stœchiométrique du NiFe ont été réalisées respectivement au CEGELY et au service "Microsonde électronique" de l'Université Paul Sabatier.

2.1. Caractérisation magnétique

Nous allons présenter dans ce paragraphe le principe de mesure des caractéristiques magnétiques et les différentes formes de motifs de caractérisation magnétique réalisés. Nous présenterons ensuite les résultats fournis par le CEGELY.

2.1.1 Principe de mesure

Afin de mesurer les caractéristiques magnétiques du matériau NiFe, nous avons réalisé des dispositifs en forme de tore. Le principe de la mesure est décrit sur la figure 4–1. Sur le tore constitué du matériau dont on souhaite connaître les caractéristiques $B(H)$, sont bobinés deux enroulements. Le premier, dit inducteur, sert à générer un champ d'excitation et le second, dit induit, permet de mesurer le flux magnétique traversant le noyau.

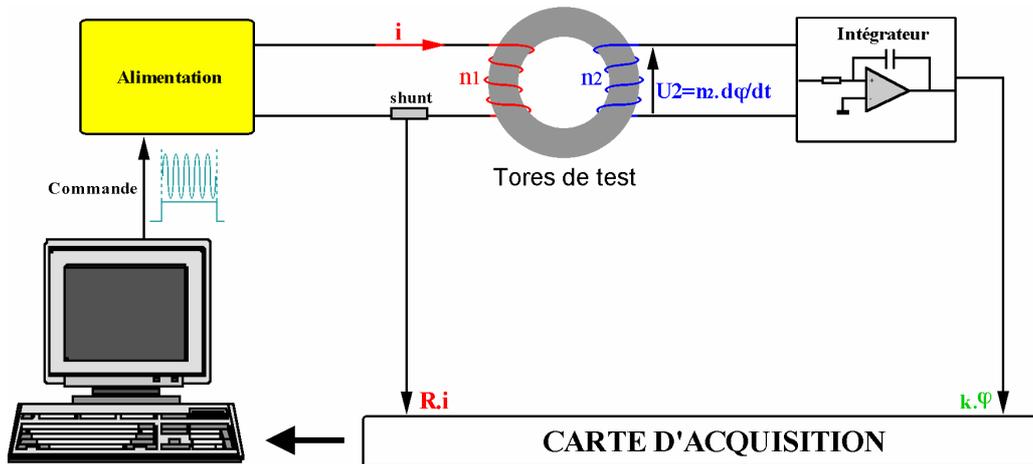


Figure 4–1: Banc de mesure $B(H)$

Du côté de l'inducteur, connaissant le nombre de spire n_1 , la longueur moyenne du noyau l_{moy} et en mesurant la valeur du courant i circulant dans les spires au moyen d'un shunt, nous pouvons déduire la valeur de H par la relation (4–1) :

$$H = \frac{n_1 i}{l_{moy}} \quad (4-1)$$

De même, pour l'enroulement induit, nous pouvons déduire le champ magnétique B circulant dans le noyau de la connaissance du nombre de spires n_2 , de la section du noyau S et de la mesure de la tension u_2 en utilisant la relation (4–2) :

$$u_2 = n_2 \cdot S \cdot \frac{dB}{dt} \quad (4-2)$$

Après intégration de la tension u_2 , la valeur du champ B est déterminée. Nous pouvons alors tracer une caractéristique $B(H)$ relative au matériau. De cette caractéristique, nous pouvons extraire la valeur de la perméabilité magnétique en utilisant les courbes de première aimantation ainsi que les pertes par hystérésis dans le matériau (aire de la courbe de $B(H)$).

2.1.2 Dispositifs de test

Le dimensionnement des tores a été réalisé en collaboration avec le CEGELY. Afin de réaliser manuellement les enroulements sur les tores, il faut des dimensions suffisamment

grandes pour que les dispositifs puissent être facilement manipulables. La réalisation de tels dispositifs est délicate car elle nécessite de grande surface de dépôt électrochimique de NiFe. En effet, plus les surfaces sont importantes et plus il est difficile de contrôler l'homogénéité en épaisseur. Les dimensions de ces tores sont données dans le tableau 4-1 :



	Tore1	Tore2	Tore3	Tore4
Ø ext	10mm	14mm	14mm	18mm
Ø int	6mm	6mm	10mm	14mm

Tableau 4-1: Dimensions des tores

L'épaisseur de NiFe requise pour les tores est de $90\mu\text{m}$. Le principe de réalisation de ces tores, analogue à celui des micro-bobines, est représenté sur la figure 4-2 :

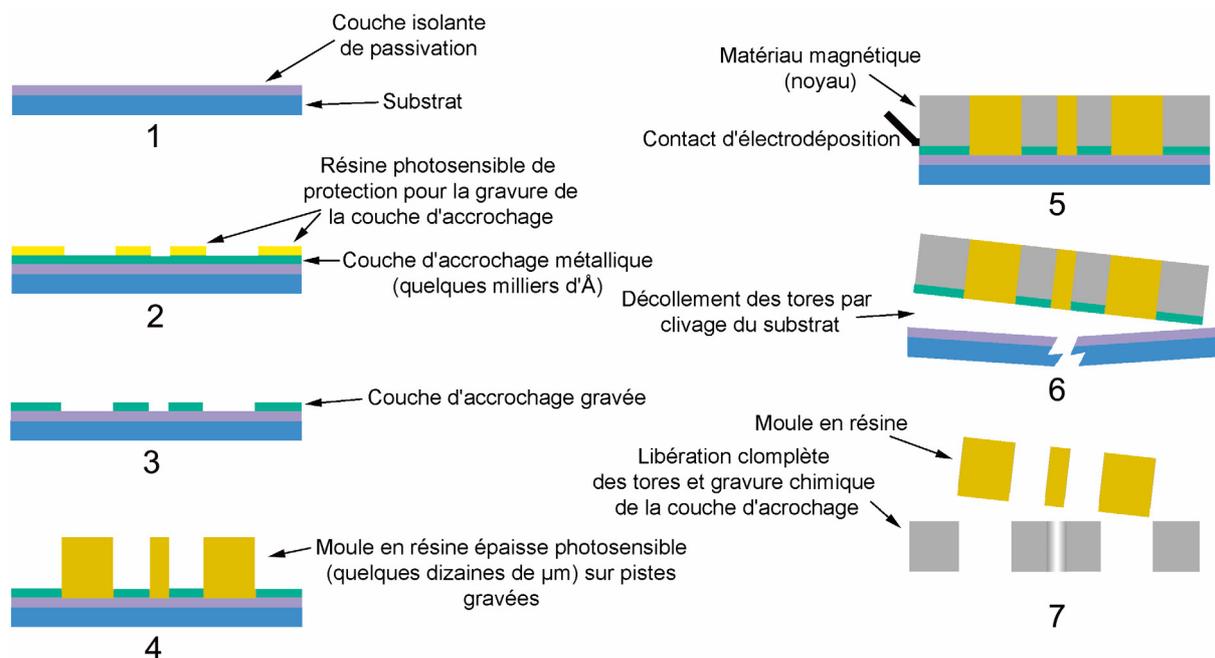


Figure 4-2: Principe de fabrication des tores

Nous commençons par passiver une plaquette de silicium avec un dépôt d'oxyde de silicium (Figure 4-2-1). Puis nous déposons une couche d'accrochage en Ti/Au ($500\text{\AA}/2000\text{\AA}$) sur l'intégralité de la surface du wafer. Par un procédé de photolithographie, une résine positive de masquage est déposée sur le métal (Figure 4-2-2). Nous venons ensuite graver la couche d'accrochage au travers du masque de résine (Figure 4-2-3). Cette étape de gravure de la couche d'accrochage n'est pas utilisée pour toutes les réalisations de tores. Les

premières réalisations ont été effectuées avec une couche d'accrochage en "pleine plaque" recouvrant ainsi tout le wafer. Après l'aménagement de la couche d'accrochage, nous réalisons les moules de 100 μ m d'épaisseur en forme de tores par photolithographie de résine négative SU-8 (Figure 4-2-4). Nous faisons alors croître l'alliage NiFe par électrochimie (Figure 4-2-5). Les tores sont ensuite décollés du substrat par clivage. La faible adhérence sur le substrat de la couche d'accrochage et des moules permet de séparer sans difficultés les tores de l'oxyde de silicium (Figure 4-2-6). La couche d'accrochage, encore présente sur les tores, est ensuite gravée chimiquement (Figure 4-2-7). Le titane est attaqué au moyen d'une solution à base d'acide fluorhydrique, tandis que l'or est retiré en utilisant soit une solution de type "KI+I₂", soit du mercure. Dans le cas de la solution "KI+I₂", il est nécessaire de protéger la face avant des tores à l'aide d'une cire protectrice car cette solution attaque également le NiFe. L'attaque au mercure est plus sélective et l'alliage HgAu qui en résulte est ensuite retiré par évaporation.

Dans un premier temps, seuls des tores de type "Tore1" nous ont été demandés. Nous avons réalisé un masque contenant ainsi 24 tores par plaquette. Pour la fabrication de ces tores, on réalise une couche d'accrochage recouvrant intégralement le wafer. Aussi, en raison du problème d'adhérence de la résine SU-8 sur l'or, bon nombre de tores sont inutilisables après le dépôt du NiFe.

Enfin d'améliorer les conditions de mesures, un autre type de tore a été réalisé. Nous devons fabriquer des dispositifs munis de 16 trous de 100 μ m de diamètre distribués au centre du circuit magnétique. Ces trous devaient permettre de faire passer un fil conducteur de diamètre inférieur à 100 μ m afin de n'exciter que la moitié du circuit magnétique. Ces trous se sont révélés inutilisables d'une part en raison de la difficulté à passer le fil sans le sectionner, et d'autre part le pourcentage de trous effectivement praticables n'est pas assez important et aucun tore n'a été réalisé avec la totalité de ses trous ouverts correctement. Ces tores n'ont pas été utilisés.

Enfin, d'ultimes géométries de tores nous ont été demandées par le CEGELY. Afin de diminuer les hétérogénéités en épaisseur des dispositifs et accroître l'adhérence des moules sur le substrat, nous avons modifié les motifs de la couche d'accrochage pour améliorer la répartition des courants d'électrochimie. La figure 4-3 ci-dessous représente ces motifs en niveau d'un tore.

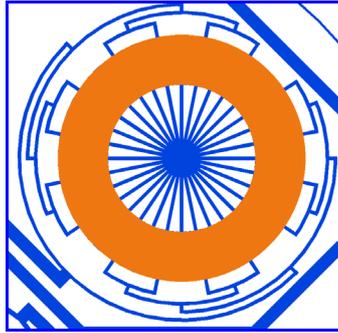


Figure 4-3: Détail de la couche d'accrochage au niveau d'un tore

Malheureusement, ce masque n'a pu être réalisé du fait de la trop grande complexité des motifs. Le masqueur utilisé au LAAS/CNRS est, au moment de la rédaction de cette thèse, trop ancien. Nous avons ainsi abandonné ce masque pour adopter un dépôt avec une couche d'accrochage en pleine plaque. Comme nous l'avons vu dans le chapitre III, la SU-8 a une très mauvaise adhérence sur l'or. Afin de remédier à cet inconvénient, nous avons aménagé la couche d'accrochage de façon à ce qu'elle soit conductrice et qu'elle laisse des surfaces de contact entre résine et substrat. Un maillage en grillage laissant 50% de surface de contact résine-substrat et 50% de couche conductrice a été choisie. Ces motifs ne nécessitant pas de rectangles obliques ont pu être réalisés sous CADENCE et sont représentés en annexe pour un quart de wafer. Les moules de forme torique simple ont pu être réalisés directement au format ELECTROMASK par un petit logiciel de dessin (CREMASQ) développé au LAAS/CNRS, mais qui n'est pas suffisamment puissant pour réaliser des formes complexes comme les couches d'accrochages. La figure 4-4 représente la couche d'accrochage au niveau d'un tore.

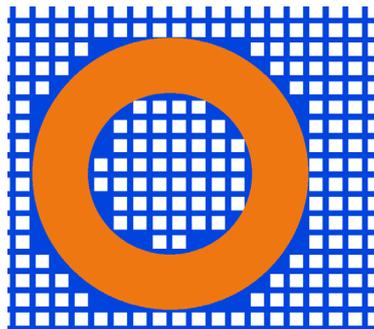


Figure 4-4: Détail de la couche d'accrochage en grillage au niveau d'un tore

Ces dispositifs de test ont été réalisés avec la composition I du bain d'électrochimie du NiFe présenté au chapitre III. Au total, trois lots de tores correspondant aux trois jeux de masques décrits ci-dessus ont été envoyés au CEGELY afin d'obtenir les caractéristiques magnétiques du NiFe déposé.

2.1.3 Résultats obtenus

Nous observons des hétérogénéités en épaisseur sur les tores que nous avons fabriqués. La figure 4–5 montre des photographies MEB de tores "sans trous". Nous voyons bien la forme en "cuvette" que l'on retrouve généralement sur les larges motifs.

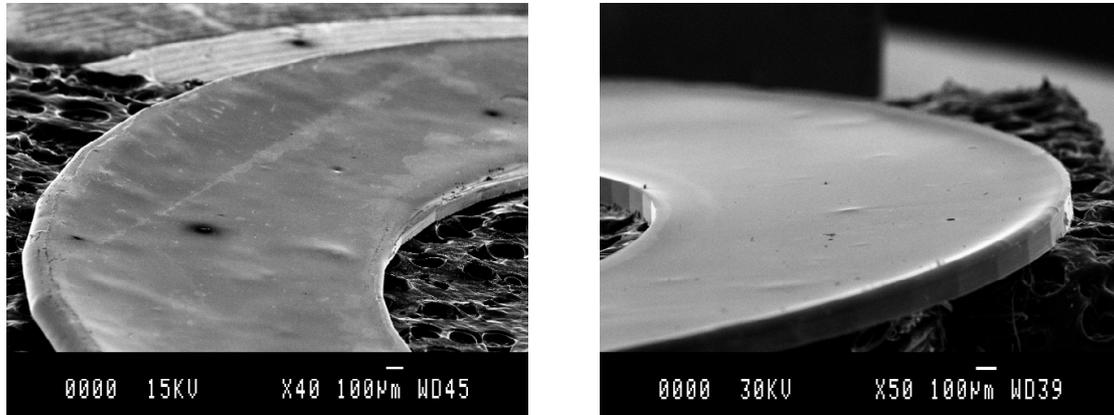


Figure 4–5: Photographies MEB de tores "sans trous".

Les photographies MEB de la figure 4–6 montrent des tores avec trous. L'aspect poreux du NiFe résulte d'une attaque chimique de la couche d'accrochage sans protection de la face avant du tore.

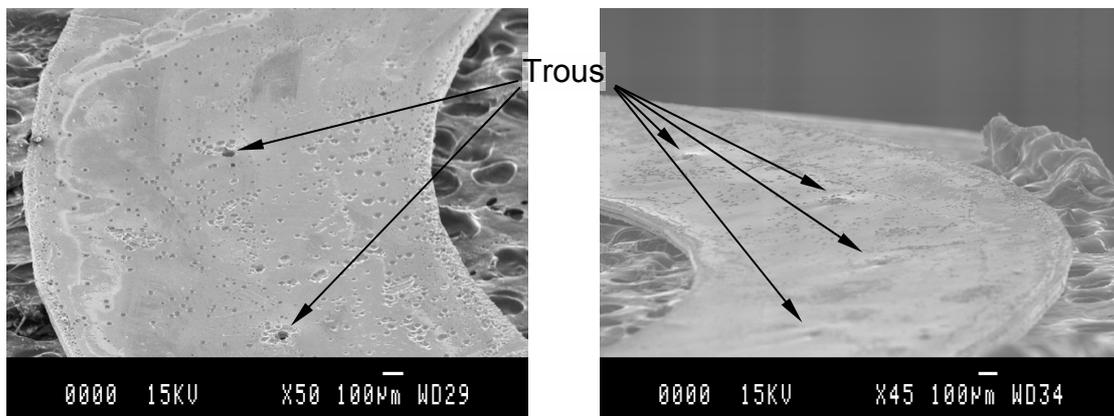


Figure 4–6: Photographies MEB de tores "avec trous".

Nous avons envoyé au CEGELY les trois lots de tores réalisés avec des bains renouvelés à chaque fois. Les bains sont identiques (solution I) et les conditions de dépôt sont les suivantes :

- Pas d'agitation et rotation de la plaque d'un quart de tour tous les quarts de temps
- Température de dépôt de 40°C
- Densité de courant de 6 A.dm⁻²

Le tableau 4–2 donne la description des échantillons qui ont été mesurés par le CEGELY. On peut observer sur ce tableau la difficulté à obtenir une bonne homogénéité d'épaisseur

pour ces grandes largeurs. Le dépôt "pleine plaque" et "quasi pleine plaque" (grillage) favorise les sur-épaisseurs de matériaux. On observe un gradient d'épaisseur de NiFe partant du centre (moins épais) vers l'extérieur de wafer (plus épais). Les tores ont une surface suffisamment importante pour qu'une différence d'épaisseur puisse être observée également au niveau du tore. Ces imperfections se rajoutent à la forme en "cuvette" du dépôt sur les bords des motifs.

lot	éch.	Φ_{int} (mm)	Φ_{ext} (mm)	épaisseur min (μm)	épaisseur max (μm)	épaisseur moyenne (mm)	Le (mm)	Ae (mm^2)	Nbre spires Excit.	Nbre spires mesure
1	1	6	10			110	25,1	0,22	10	53
	2	6	10			110	25,1	0,22	11	58
2	1	6	14	76	100	88	31,4	0,35	13	40
	3	6	10	100	221	160,5	25,1	0,32	10	60
3	2	6	14	145	217	181	31,4	0,72	13	18
	3	14	18	127	167	147	50,3	0,29	22	44
	4	6	10	116	170	143	25,1	0,29	11	45
	5	10	14	117	158	137,5	37,7	0,28	16	49

Tableau 4-2: Description des échantillons de tores

Les résultats de mesure obtenus par le CEGELY apparaissent sur les courbes de la figure 4-7. Ces mesures représentent les courbes de première aimantation à 50Hz.

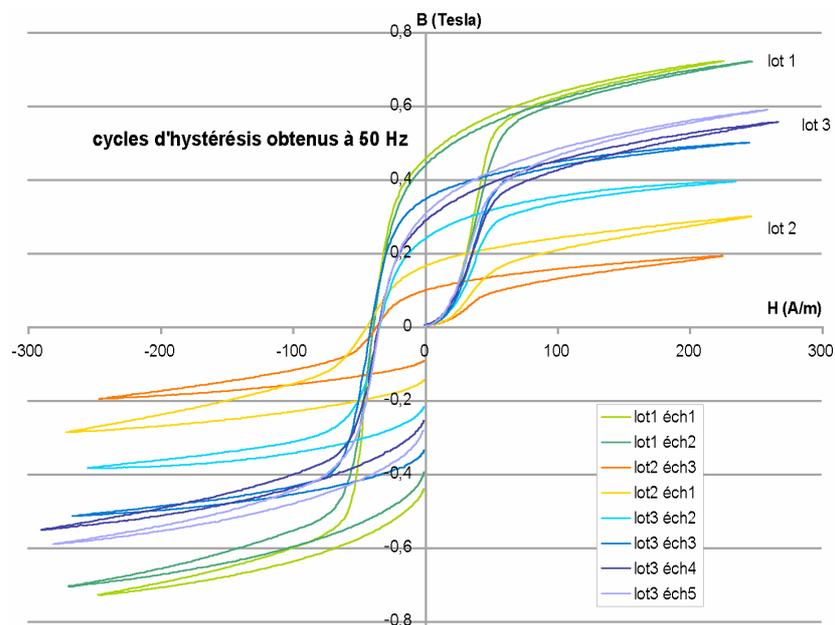


Figure 4-7: Résultat des mesures sur les tores. Courbes de première aimantation à 50Hz

D'après le CEGELY, les mesures sur un même tore sont reproductibles en gardant le même bobinage : le banc fournit les mêmes mesures.

Nous pouvons observer sur la figure 4-8 que les trois lots présentent des caractéristiques différentes.

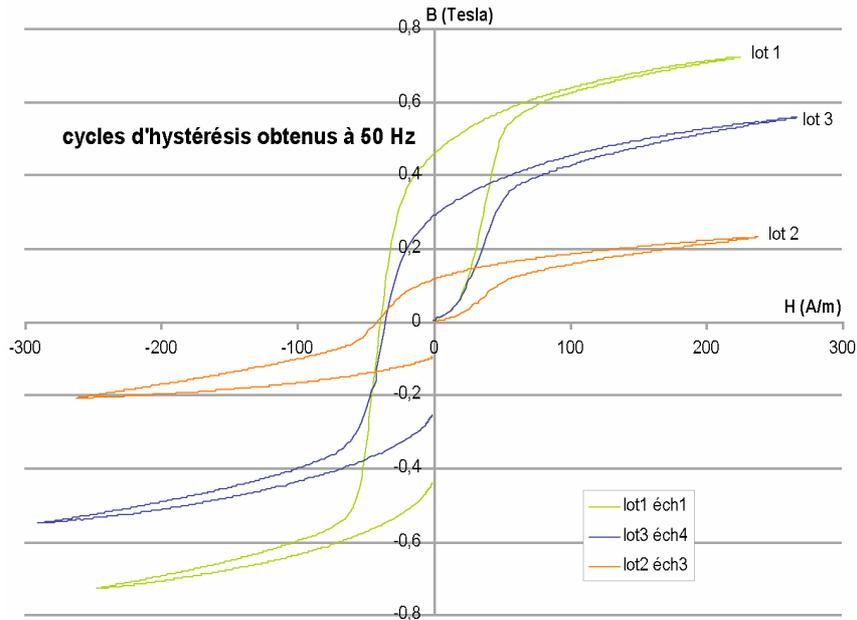


Figure 4–8: Mise en évidence des écarts de caractéristiques magnétiques des 3 lots

Les courbes de la figure 4–8, issues de mesures réalisées sur trois tores de mêmes dimensions, montrent des inductions à saturation très variables. Les valeurs relevées graphiquement vont de 700mT pour le lot 1 à 200mT pour le lot 2. Le lot 3 a un champ d'induction à saturation d'environ 500mT. Les perméabilités magnétiques relatives μ_r déduites de ce relevé de courbes en quasi statique sont comprises entre 7600 (lot 1) et 1500 (lot 3)

L'analyse du rapport entre le fer et le nickel dans le matériau donnera éventuellement une explication sur ces écarts entre les différents lots. Pour cela nous avons fait analyser au service microsonde de l'Université Paul Sabatier les échantillons des tores des lots 1 et 2. Les graphiques de la figure 4–9 présentent les résultats de l'analyse du lot 1 sur deux échantillons.

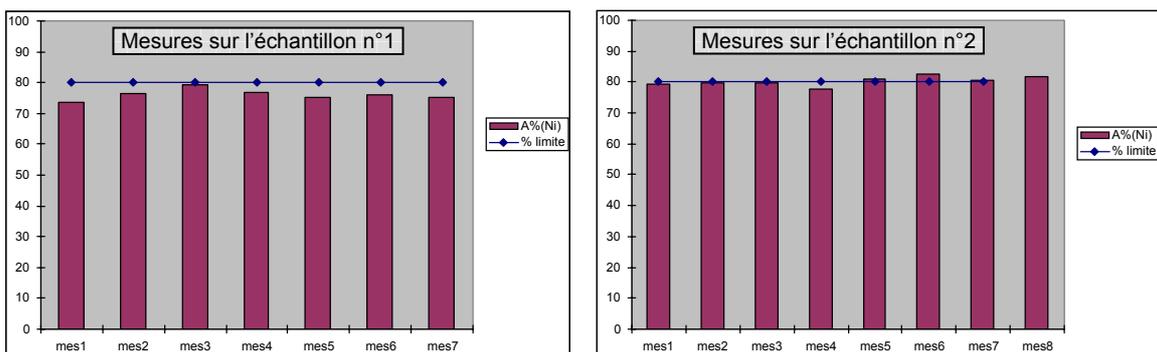


Figure 4–9: Pourcentage de Nickel dans le matériau pour deux échantillons du lot n°1

Pour ce lot n°1, la moyenne des mesures de l'échantillon n°1 est de 76,04% de Nickel pour un écart type de 1,76%. Pour le second échantillon, la moyenne des mesures est de 80,33% avec un écart type de 1,55%.

Nous allons maintenant comparer ces résultats à l'analyse du lot n°2. Les graphiques de la figure 4–10 montrent les pourcentages de Nickel dans le matériau.

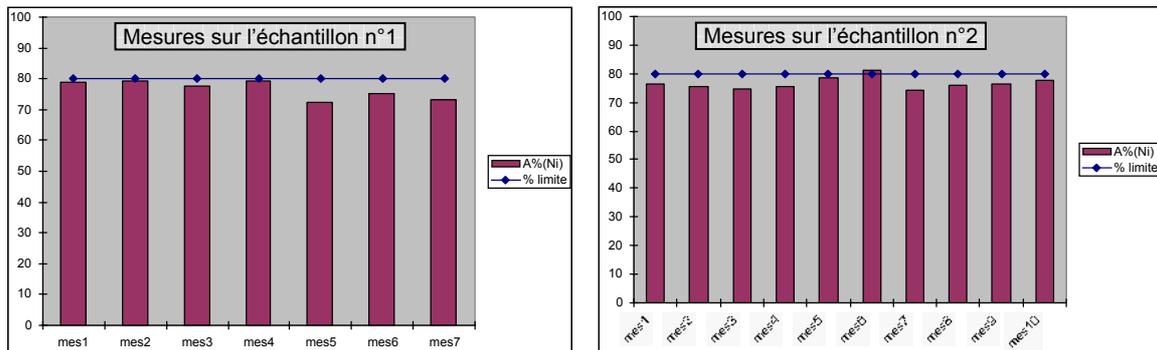


Figure 4–10: Pourcentage de Nickel dans le matériau pour deux échantillons du lot n°2

Pour ce lot n°2, la moyenne des mesures de l'échantillon n°1 est de 76,58% de Nickel pour un écart type de 2,98%. Pour le second échantillon, la moyenne des mesures est de 76,71% avec un écart type de 2,03%.

Les écarts constatés entre ces deux lots ne sont pas significatifs. Ne connaissant pas l'influence exacte du pourcentage Fe/Ni sur les caractéristiques magnétiques, nous ne pouvons pas tirer de conclusion sur les différences entre les lots. Toutefois si on considère qu'une faible variation du pourcentage de proportion Fe/Ni peut affecter de façon très significative les caractéristiques magnétiques, nous pouvons affirmer que le dépôt NiFe sera difficilement reproductible. Les proportions de Fe/Ni varient de quelques % entre les dépôts successifs mais également sur une même plaquette.

Comme le montre la figure 4–11, une dispersion sur un même lot des caractéristiques magnétiques apparaît avec une variation des géométries des composants testés.

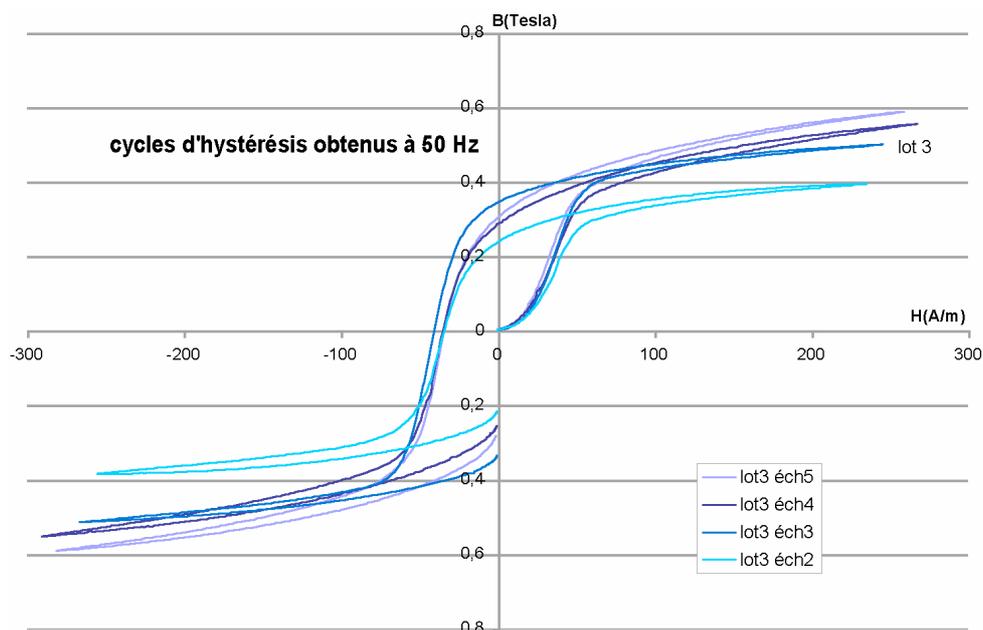


Figure 4–11: Résultat des mesures sur les tores. Courbes de première aimantation à 50Hz

Hormis la qualité du dépôt en termes de rapport Fe/Ni et d'une possible différence de structure du dépôt (taille de grains, impuretés etc...), il semblerait que le paramètre pouvant fortement contribuer à ce phénomène soit la section (A_e). En effet, pour remonter du cycle de caractérisation $\phi(I)$ mesuré au cycle $B(H)$ des différents tores, on utilise la valeur moyenne de l'épaisseur. Or pour certains tores, il y a de fortes variations de profil et donc de section (tableau 4-2). Il est donc difficile d'obtenir la valeur exacte de la section du tore.

2.2. Caractérisations électriques

Nous avons également cherché à déterminer la résistivité des matériaux déposés afin de comparer les résistivités effectives des matériaux et les valeurs typiques utilisées pour le dimensionnement.

Dans ce paragraphe, nous allons présenter le principe de mesure de la résistivité des matériaux en décrivant les différentes formes de motifs ainsi que leurs procédés de fabrication. Nous présenterons ensuite les résultats des mesures que nous avons effectuées.

2.2.1 Principe de mesure

Pour la mesure de la résistivité des matériaux, nous avons réalisé des dispositifs en forme de ruban. Connaissant les dimensions de ces motifs, il suffit de mesurer la résistance de ces rubans par la méthode "quatre points" pour en déduire la résistivité du matériau. Le principe de ce banc de mesure est représenté sur la figure 4-12.

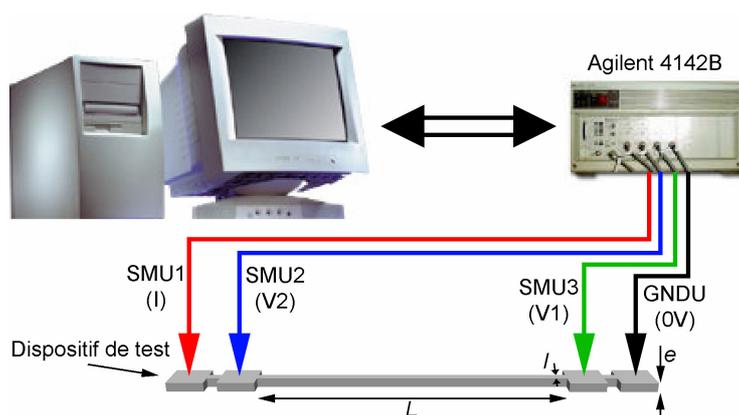


Figure 4-12: Banc de mesure quatre points

Dans le ruban de longueur, largeur et épaisseur connues, nous faisons circuler un courant continu de valeur connue I par le biais des deux points extérieurs. Les deux points intérieurs récupèrent la différence de potentiel $V = V_2 - V_1$ aux extrémités du ruban. En partant de l'hypothèse que le matériau est homogène avec une épaisseur constante e et connaissant la

longueur L , la largeur l du ruban de même que le courant I qui le traverse et la tension V à ses extrémités, nous pouvons déterminer la résistivité ρ_{mat} du matériau par la relation 4-1 ci-dessous :

$$\rho_{mat} = \frac{V}{I} \cdot \frac{e \cdot l}{L} \quad (4-1)$$

Les mesures sont effectuées à température ambiante. Le pourcentage d'erreur sur la mesure est déterminé par la précision des appareils de mesure. Ici, les éléments de mesure et d'alimentation sont des SMU (Source/Monitor Unit) HP41420A. L'erreur sur la mesure de la résistance R est donnée par la relation :

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta V_1}{V_1} + \frac{\Delta V_2}{V_2} + \frac{\Delta I}{I} \quad (4-2)$$

En utilisant les spécifications des SMU HP41420A, nous obtenons une erreur sur les mesures de :

$$\frac{\Delta R}{R} = 2,37\%$$

2.2.2 Dispositifs réalisés

Nous avons choisi des motifs en ruban dont les dimensions sont suffisamment grandes pour être aisément manipulable lors des mesures, et dont la longueur nous permet d'obtenir des valeurs de résistance suffisamment importantes pour pouvoir être mesurées. Les dimensions de ces motifs sont données sur la figure 4-13.

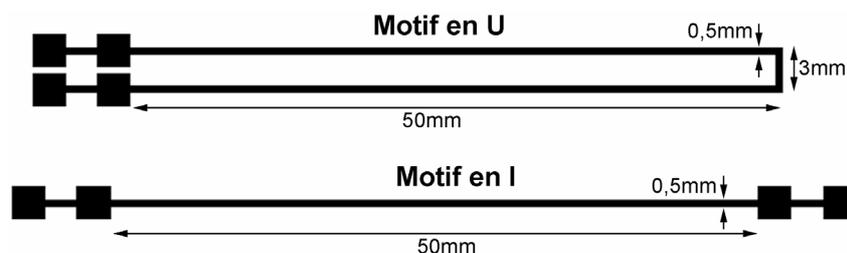


Figure 4-13: Dimensions des motifs de test de résistivité.

La section du ruban doit être constante. Le motif en U a une longueur totale de 10,3cm pour une largeur du ruban de 0,5mm, le motif en I a une longueur totale de 5cm pour une largeur du ruban de 0,5mm. Nous pouvons également faire varier la résistance des motifs en jouant sur l'épaisseur de matériau déposé. Les plots aux extrémités permettent la pose des quatre pointes de mesure. Une vue globale du dessin du masque des moules est donnée en annexe.

Le principe de fabrication est toujours le même. Nous commençons par passer une plaquette de silicium avec un dépôt d'oxyde de silicium (Figure 4-14-1). Puis nous déposons

une couche d'accrochage en Ti/Au (500Å/2000Å) sur l'intégralité de la surface du wafer (Figure 4-14-2). Nous réalisons ensuite les moules de 50µm à 100µm d'épaisseur avec la forme des motifs de test par photolithographie de résine positive (Figure 4-14-3). Nous faisons alors croître par électrochimie le matériau dont on veut connaître la résistivité (Figure 4-14-4). Nous retirons ensuite la résine positive avec de l'acétone. Cette opération est suivie d'un rinçage à l'eau désionisée afin d'enlever toutes les traces d'acétone pouvant masquer la couche d'accrochage, ceci en vue de l'étape suivante (Figure 4-14-5). La couche d'accrochage est ensuite gravée chimiquement (Figure 4-2-6) : L'or est retiré en utilisant du mercure si la solution "KI+I₂" n'est pas suffisamment sélective pour préserver le matériau déposé. C'est notamment le cas pour le NiFe. L'alliage HgAu engendré par la réaction entre l'or et le mercure est ensuite retiré par évaporation. Le titane est alors attaqué au moyen d'une solution à base d'acide fluorhydrique. Les étapes technologiques de réalisation de ces dispositifs sont représentées sur la figure 4-14 :

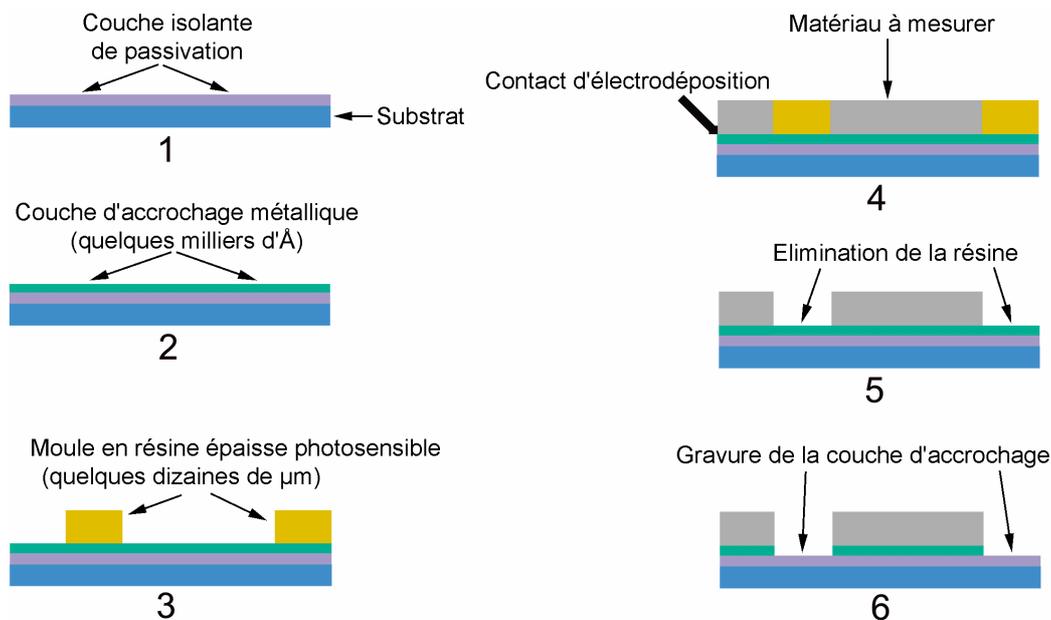


Figure 4-14: Principe général de fabrication des dispositifs de test.

Nous voyons dans ce procédé que les motifs de tests restent fixés au wafer et donc que la couche d'accrochage est toujours présente sur la face arrière. Les mesures effectuées à même le wafer, doivent prendre en compte de la présence de la couche d'accrochage. En raison de la couche isolante située entre la couche d'accrochage et le wafer, nous négligerons l'effet du substrat si l'on fait l'hypothèse que cette couche est suffisamment isolante pour délimiter la circulation du courant uniquement dans les motifs. Lors de la mesure de la résistance du motif de test, nous devons retrancher sur la valeur mesurée la valeur de la résistance de la couche d'accrochage. Si nous supposons que les couches déposées, c'est-à-dire le matériau et la

couche de Ti/Au, ont une épaisseur constante, nous pouvons alors modéliser le dispositif par deux résistances en parallèles (Figure 4–15).

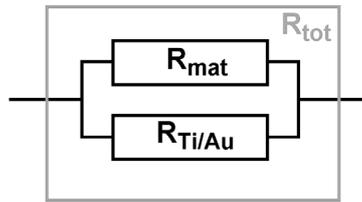


Figure 4–15: Modélisation électrique des deux couches métalliques.

Par la mesure de R_{tot} et de $R_{Ti/Au}$, nous pouvons retrouver la valeur de R_{mat} par la relation (4–3) :

$$R_{mat} = \frac{R_{tot} \cdot R_{Ti/Au}}{R_{Ti/Au} - R_{tot}} \quad (4-3)$$

La valeur de $R_{Ti/Au}$ est déterminée par mesure directe de la résistance de la couche d'accrochage sur des motifs réalisés sans croissance de matériau, c'est-à-dire des motifs en U et en I composés d'une couche en Ti/Au.

2.2.3 Résultats obtenus

Nous avons réalisé des dispositifs avec les deux types de matériaux. Le bain électrolytique utilisé pour le dépôt de cuivre correspond à la solution II, le bain utilisé pour le dépôt de NiFe correspond à la solution II (Cf. ChapIII). L'épaisseur des motifs en cuivre est de l'ordre de $75\mu\text{m}$ et celle des motifs en NiFe est de l'ordre de $30\mu\text{m}$. Les photographies au microscope optique des motifs en cuivre et en NiFe représentées sur la figure 4–16 font apparaître sur la vue (b) des taches dues à des résidus d'or après attaque par le mercure.

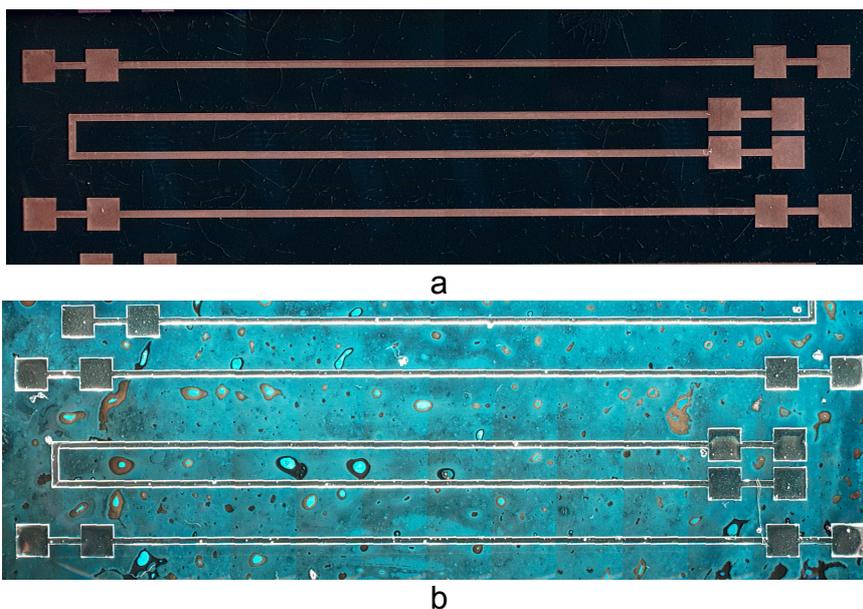


Figure 4–16: Photographies des motifs en cuivre (a) et en NiFe (b).

Afin de s'affranchir de l'influence du substrat lors des mesures de résistance des motifs, une mesure de la résistance est effectuée entre deux motifs juxtaposés, entre un motif en U et un motif en I. Nous avons trouvé une résistance de l'ordre de $7.10^9 \Omega$. Cette valeur élevée nous permet de négliger l'influence du substrat sur les mesures.

Nous mesurons ensuite la résistance $R_{Ti/Au}$ de la couche d'accrochage en Ti/Au qui est analogue à celle se trouvant sous les dispositifs. Le tableau 4-3 donne les résultats de ces mesures.

Résistance des motifs en Ti/Au (couche d'accrochage présente sous les dispositifs)				
N° motif -->	I2	U3	I1	U1
Résis. Moy. $R_{Ti/Au}(\Omega)$	24,7	48,9	24,8	51,3

Tableau 4-3: Résistance de la couche d'accrochage en Ti/Au se trouvant sous les motifs en U et I

L'épaisseur du dépôt de matériau dans les moules n'est pas homogène. Afin d'avoir une estimation de l'épaisseur moyenne pour les calculs de résistivité, nous mesurons en plusieurs points du motif la hauteur du dépôt. Pour un motif en I, l'épaisseur est mesurée en cinq points et en dix points pour un motif en U. Nous remarquons dans les tableaux 4-4 et 4-5 que les épaisseurs des dispositifs fluctuent fortement sur un même motif. La détermination de la résistivité moyenne sera effectuée à partir de motifs présentant une épaisseur la plus constante possible (I1 pour le cuivre et I3 pour le NiFe). Ces deux motifs ont des variations relatives d'épaisseur respectives de 3,7% et 2,7%.

Épaisseur des motifs en Cu (μm)												
N° motif -->	I4	U4		I3	U3		I2	U2		I1	U1	
1	85,83	72,96	70,15	74,41	74,12	72,96	72,92	68,11	69,76	76,08	81,36	86,16
2	93,33	84,03	79,76	77,66	75,37	73,35	74,22	71,97	73,30	76,66	81,50	85,32
3	95,14	83,28	79,94	77,29	72,08	72,88	71,87	70,99	73,21	77,45	81,15	84,77
4	94,81	83,91	78,81	77,01	73,18	70,32	69,81	69,50	72,41	76,34	78,86	80,90
5	95,25	84,40	78,10	74,65	64,16	59,16	69,43	68,30	72,58	74,59	63,06	63,91
Ep. Moy. (μm)	92,87	79,53		76,20	70,76		71,65	71,01		76,22	78,70	

Résistance moyenne des motifs en Cu (R_{tot}) (Ω)								
N° motif -->	I4	U4	I3	U3	I2	U2	I1	U1
Résis. Moy.	0,017	0,0403	0,0212	0,0454	0,0227	0,0463	0,0215	0,0401

Résistivité moyenne du Cu ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)								
N° motif -->	I4	U4	I3	U3	I2	U2	I1	U1
Résis. Moy.	1,58	1,55	1,61	1,56	1,63	1,59	1,64	1,53

Tableau 4-4: Détermination de la résistivité moyenne du cuivre à partir des mesures de résistances

Épaisseur des motifs en NiFe (μm)									
N° motif -->	I3	U3		I2	U2		I1	U1	
1	31	27,86	28,42	24,74	15,6	18,36	32,65	37,95	53,66
2	31,49	27,31	27,85	27,05	24,53	26,8	30,58	34,38	47,07
3	30,83	26,93	28,8	27	24,77	26,65	30,16	33,72	47,31
4	31,68	26,54	27,35	27,56	23,58	26,45	29,05	31,6	43,83
5	31,14	22	22,25	26,7	24,83	27,81	29,19	27,17	37,17
Ep. Moy. (μm)	31,228	26,531		26,61	23,938		30,326	39,386	

Résistance moyenne des motifs en NiFe (R_{tot}) (Ω)						
N° motif -->	I3	U3	I2	U2	I1	U1
Résis. Moy.	0,87	2,13	1,19	2,49	0,99	1,27

Résistivité moyenne du NiFe ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)						
N° motif -->	I3	U3	I2	U2	I1	U1
Résis. Moy.	27,9	28,4	32,9	30,1	31	24,6

Tableau 4–5: Détermination de la résistivité moyenne du NiFe à partir des mesures de résistances

À partir de ces mesures, avec une erreur sur la mesure pouvant atteindre 2,37% et des variations d'épaisseur de 3,7%, nous estimons la résistivité du cuivre à $1,64\mu\Omega\cdot\text{cm}$ et celle du NiFe à $27,9\mu\Omega\cdot\text{cm}$ à 6% près. La valeur typique de la résistivité du cuivre massif est de $1,7\mu\Omega\cdot\text{cm}$. Les résultats de mesure de résistivité obtenus semblent donc cohérents.

3. Structures réalisées

Nous avons réussi à fabriquer des prototypes des deux types de structure "mixte" et "spirale" évoquées dans le chapitre III avec leurs procédés technologiques de fabrication. Nous présentons ici les premiers résultats obtenus sur des prototypes d'épaisseur réduite. Même si ce ne sont pas les composants finaux que nous envisageons de réaliser, ces prototypes permettent de valider l'enchaînement des étapes technologiques de fabrication de chacune des deux topologies.

3.1. Structure "mixte"

3.1.1 Réalisation de prototypes

La structure "mixte" est la topologie la plus délicate à réaliser. En effet, les problèmes majeurs apparaissant lors de la fabrication de cette structure sont liés aux interactions chimiques du NiFe dans le bain de cuivre et inversement. Par ailleurs, du fait de la complexité des réseaux de pistes d'amenée de courant pour la croissance du NiFe et celle du Cuivre des courts-circuits peuvent apparaître. Ces courts-circuits qui se produisent lors des croissances métalliques du dernier niveau provoquent un dépôt de matériau dans l'ensemble des moules. Nous expliquons ce phénomène par des décollements de résine donnant lieu à des infiltrations

de solution et par conséquent à des liaisons entre les deux réseaux de pistes. La probabilité de voir apparaître ces courts-circuits augmente avec les contraintes exercées sur les moules et donc avec l'épaisseur de la résine. De ce fait, nous avons réalisé des structures "mixtes" avec des couches de faible épaisseur (de 10 μm à 30 μm par couche de matériaux) afin de s'affranchir des problèmes liés aux décollements de résine. Les photographies de ces premières réalisations sont présentées sur les figures 4-17 et 4-18.

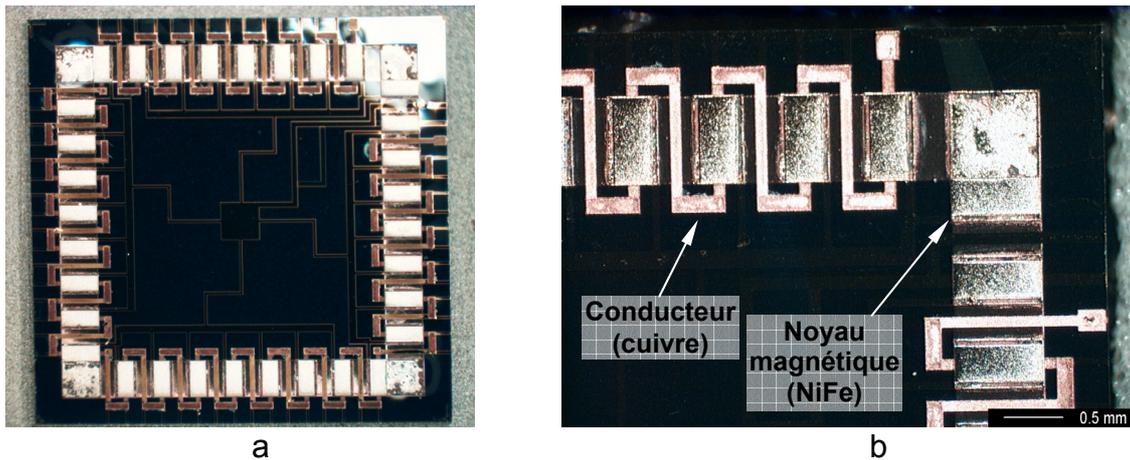


Figure 4-17: Photographies au microscope optique d'une vue générale de la micro-bobine de type mixte (a) et du détail des contacts (b).

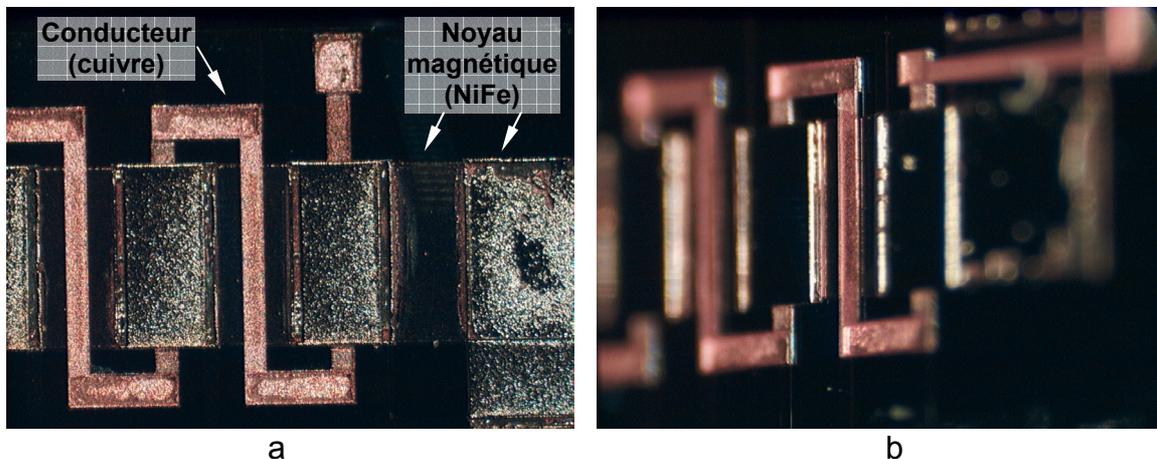


Figure 4-18: Photographies au microscope optique du détail de la topologie mixte vue de dessus (a) et en légère perspective (b).

Les photographies en coupe du noyau permettent de voir la forme des dépôts et de mieux comprendre les problèmes que nous rencontrons. La figure 4-19a montre une vue globale de l'empilement et du noyau magnétique qui serpente verticalement. La figure 4-19b représente le détail d'un élément de la partie supérieure du noyau magnétique sur lequel on observe un "sur-dépôt" de NiFe dépassant du moule.

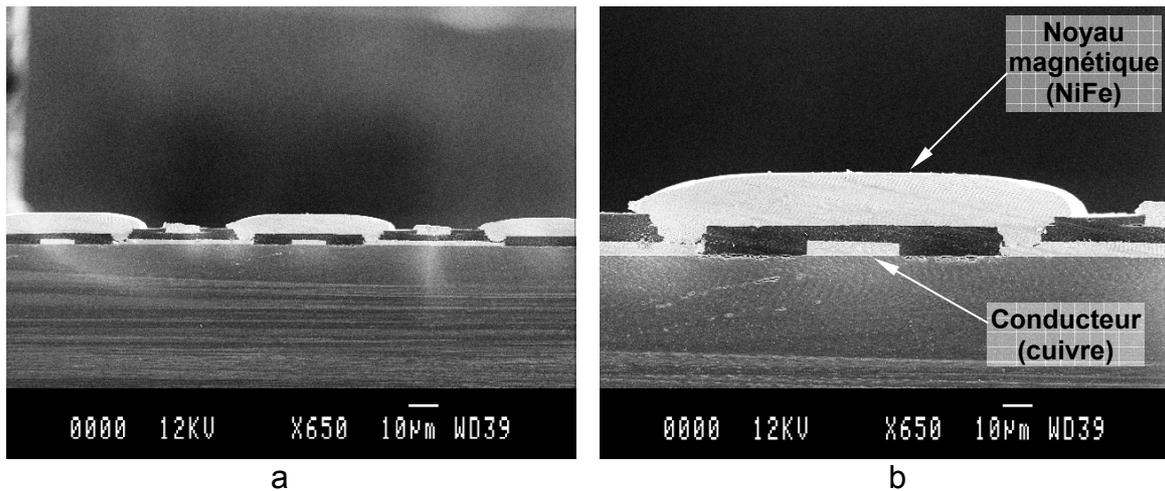


Figure 4–19: Photographies MEB d'une vue en coupe du noyau magnétique.

Ces observations permettent de mettre en évidence les problèmes au niveau des vias d'interconnexion entre les deux couches de matériaux. En effet, la figure 4–20 montre des inclusions de résine dans le NiFe au niveau d'un via dues à un problème de révélation ou d'insolation de la résine SU-8.

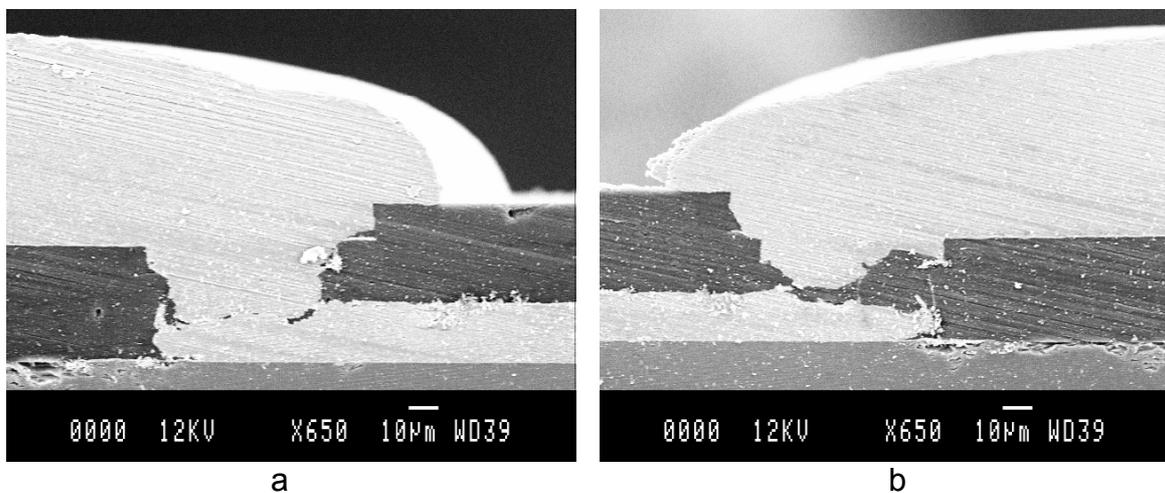


Figure 4–20: Photographies MEB de la section de vias du noyau magnétique: via traversant (a) et via isolé par une inclusion de résine (b).

La figure 4–21 montre que ce problème est également présent au niveau des traversées d'interconnexion du conducteur. Il est toutefois moins pénalisant du fait de la large surface de contact du via.

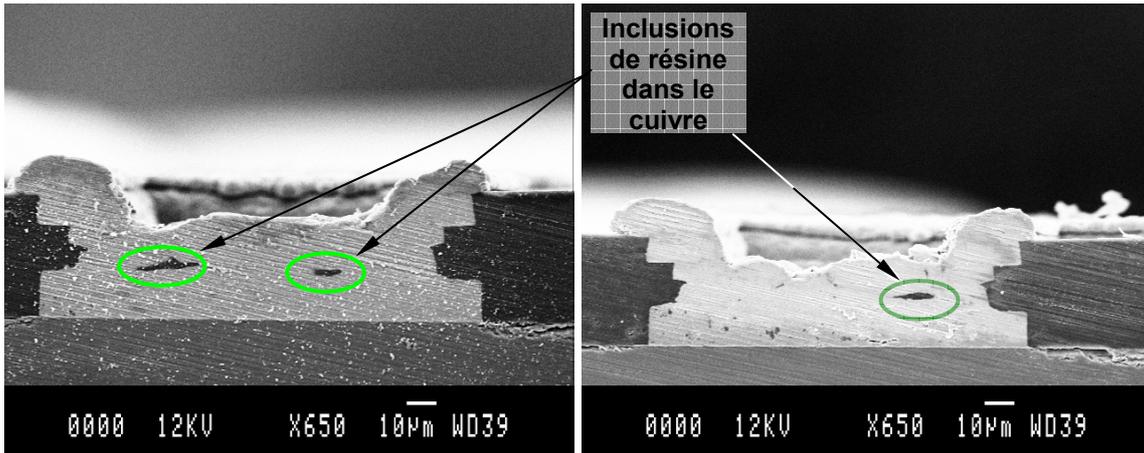


Figure 4–22: Photographies MEB de la section de vias du conducteur.

La figure 4–21a illustre les problèmes de décollement de la résine évoqués au début de ce paragraphe. Le décollement apparaît ici sur les bords d'un motif du conducteur en cuivre. Ceci est à comparer aux couches de résine inférieures (figure 4–21b) qui ne présentent pas de décollement.

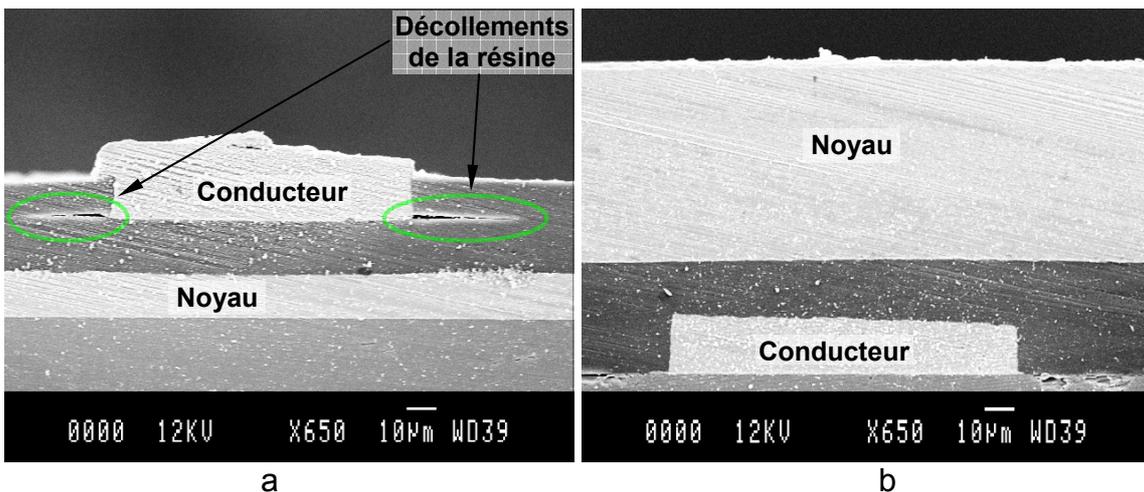


Figure 4–21: Photographies MEB d'une coupe de la partie supérieure du conducteur présentant des amorces de décollements de la résine (a) et de la partie inférieure du conducteur (b).

Au moment de la rédaction de cette thèse, de nouveaux masques ont été conçus afin de remédier aux problèmes de décollement de résine, d'inclusion de résine dans les vias et de court-circuit entre les réseaux de pistes d'amenées de courant. Plusieurs modifications ont été apportées par rapport au jeu de masque précédent. Dans le but de réduire les courts-circuits et les décollements de résine, nous avons éliminé toutes les surfaces de contact métal-résine du second niveau et nous avons encore diminué les surfaces de résine. Pour cela, nous avons choisi d'alimenter en courant les moules supérieurs en utilisant uniquement les vias. De ce fait, nous retirons l'intégralité des pistes métalliques d'amenée de courant du niveau supérieur.

Si l'on considère que les inclusions de résine sont dues à une "insolation parasite" de la résine au fond des moules, nous avons fait l'hypothèse que le fait d'aligner les murs de résine au fur et à mesure de l'empilement des couches peut entraîner un effet de miroir des couches inférieures. Pour s'affranchir de cette possibilité, nous avons également décalé les alignements des moules.

3.1.2 Caractérisation électrique d'un prototype

Après modifications des masques, nous avons pu réaliser des prototypes de la topologie "mixte" atteignant une épaisseur de 30 μm par couche de matériaux et sans inclusions de résine. Ceci nous a permis de réaliser des caractérisations électriques sur ce dispositif. Ces caractérisations ont été effectuées au moyen d'un LCRmètre de type HP4284 et d'une station de mesure sous pointes.

Avant de présenter les courbes de caractérisation inductance série et résistance série (Ls-Rs) nous allons évaluer l'ordre de grandeur des valeurs d'inductance et de résistance du conducteur sans tenir compte de l'influence de la fréquence de fonctionnement.

Ainsi avec la connaissance de la géométrie du prototype et à l'aide des équations 2-6 et 3-3 nous avons déterminé les valeurs d'inductance et de résistance du conducteur. Nous avons pris, comme caractéristiques des matériaux, les valeurs moyennes rencontrées dans la littérature scientifique, c'est-à-dire un μ_r de 800 pour le matériau magnétique et une résistivité de 1,75 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ pour le cuivre. Nous obtenons par calcul analytique une inductance de 0,8 μH pour le prototype 30 μm avec une résistance du conducteur de 0,58 Ω .

Les mesures ont été effectuées après étalonnage du HP4284 en circuit-ouvert et circuit-fermé afin que le LCRmètre prenne en compte l'impédance des câbles et les résistances des contacts. Les mesures Ls-Rs du prototype de 30 μm par couche sont présentées sur la figure 4-20.

L'observation du graphique nous montre qu'à basses fréquences, la résistance calculée du conducteur est quasiment égale à la résistance Rs mesurée. Ceci nous confirme que les résistances supplémentaires dues aux vias d'interconnexion ont très peu d'influence sur la résistance totale du conducteur. Toujours dans les basses fréquences, nous constatons également que la valeur d'inductance Ls mesurée est supérieure à la valeur d'inductance calculée. En effet, nous avons pris comme perméabilité magnétique relative μ_r pour le NiFe la valeur moyenne rencontrée dans la littérature scientifique. Or la perméabilité magnétique relative dépend de la fréquence et de la qualité du dépôt du matériau. Ainsi, comme nous

l'avons déduit de la figure 4–8 du paragraphe 2.1.3, cette perméabilité magnétique relative peut-être bien supérieure pour les basses fréquences d'excitation.

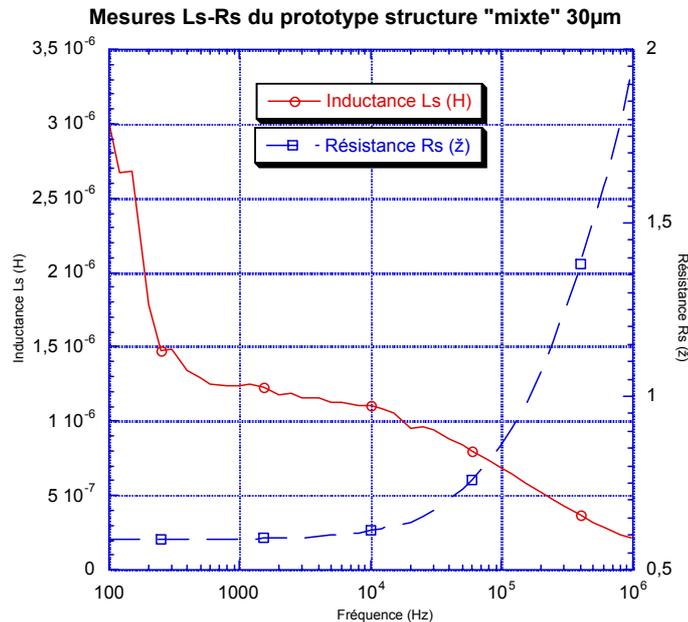


Figure 4–20: Mesures Ls-Rs du prototype "mixte" 30 µm par couche.

Nous voyons également qu'au fur et à mesure que nous augmentons la fréquence d'excitation, la valeur d'inductance mesurée Ls chute et la valeur de résistance Rs augmente. Ce comportement particulier du dispositif dans les fréquences élevées peut s'expliquer par plusieurs phénomènes corrélés comme l'apparition de l'effet de peau dans le conducteur et dans le noyau, la diminution de la valeur de μ_r avec l'augmentation de la fréquence ou encore un possible effet de substrat.

Par cette caractérisation électrique, nous pouvons confirmer que cette topologie n'est pas adaptée au système de conversion d'énergie visé fonctionnant à 500kHz.

3.2. Structure "spirale"

Les premiers prototypes, fabriqués avec les procédés décrits dans le chapitre III, ont été réalisés avec des épaisseurs de couche de matériaux de 10µm au lieu des 100µm requis pour répondre aux spécifications du micro-convertisseur. Ce premier pas nous permet de valider l'enchaînement des étapes technologiques de fabrication de la structure en minimisant les contraintes et les hétérogénéités de dépôt qui apparaissent avec des couches de forte épaisseur. Les premières structures de type "spirale" ont été réalisées avec les dimensions données sur la figure 4–21.

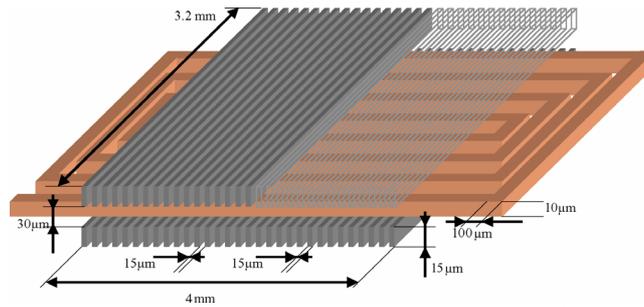


Figure 4–21: Dimensions des premières réalisations de la structure "spirale".

La figure 4–22 montre une vue de dessus de la structure et une vue en coupe suivant la diagonale.

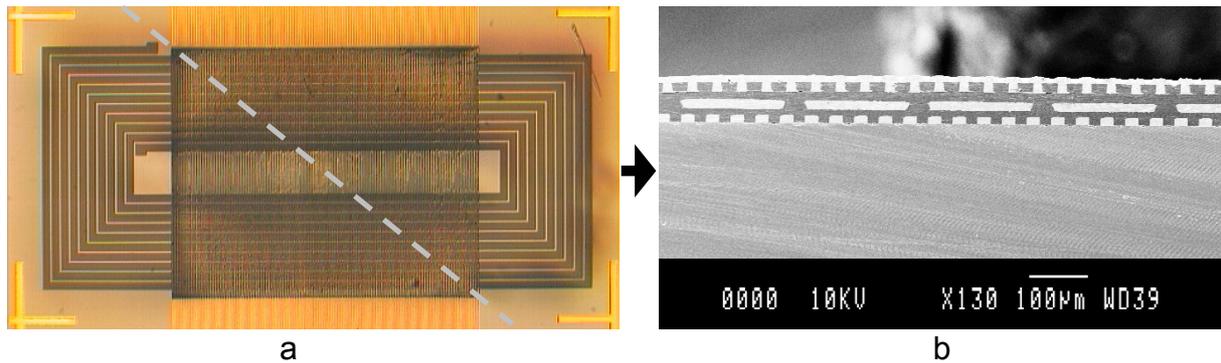


Figure 4–22: Photographies au microscope optique d'une micro-bobine de type "spirale" vue de dessus (a), et en coupe (b).

Les photographies présentées sur la figure 4–23 montrent le détail de la coupe de la structure.

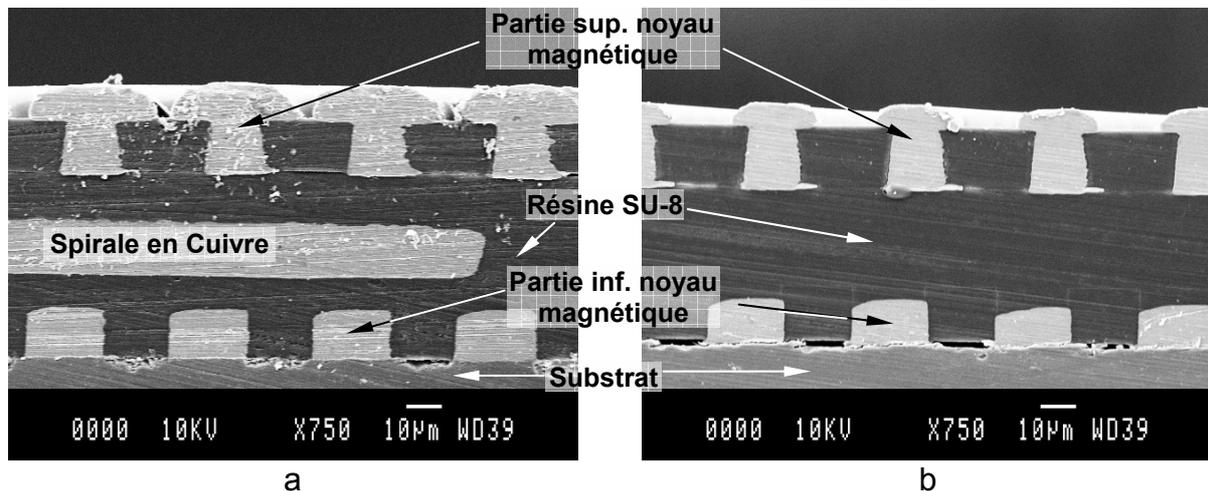


Figure 4–23: Photographies M.E.B. du détail du noyau magnétique au niveau d'une spire (a), et au niveau interspire (b).

Sur ces photographies, nous distinguons la spirale en cuivre prise en sandwich entre les deux parties du noyau magnétique feuilleté. La partie supérieure présente un débordement du

matériau NiFe des moules, ce qui donne une forme dite "en champignon". Si ce débordement est trop important, il peut y avoir des courts-circuits entre les motifs.

La figure 4–24a montre le détail du cuivre du conducteur dont on perçoit la granularité au travers de la résine SU-8 translucide. Si on focalise l'image sur le noyau magnétique, on obtient le détail d'une feuille présentant une surface relativement lisse (figure 4–24b).

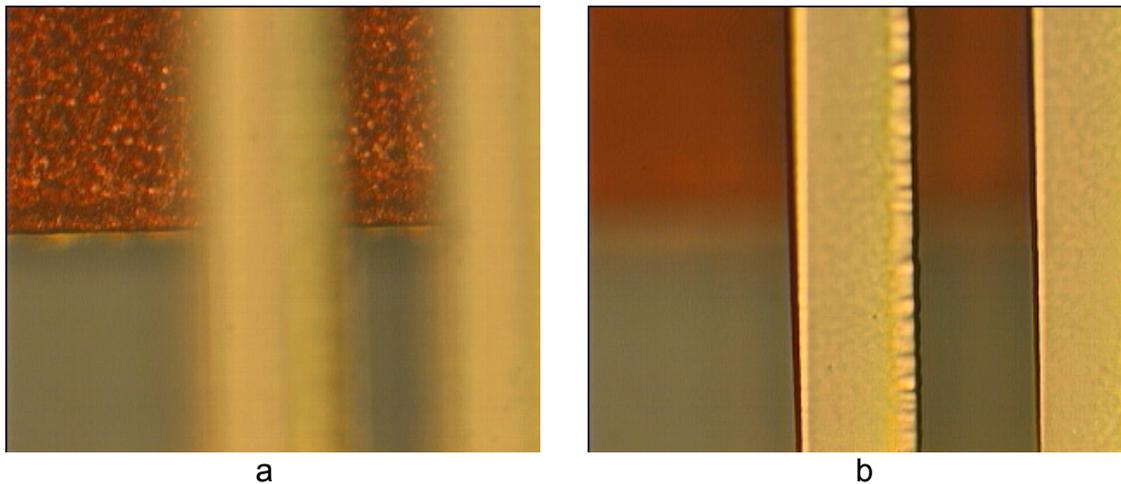


Figure 4–24: Photographies au microscope optique d'une micro-bobine de type spirale vue de dessus. Détail du cuivre (a), détail du NiFe (b).

Des problèmes demeurent au niveau de la réalisation du noyau feuilleté de cette structure. En effet, le dépôt de NiFe se fait en forme de "cuvette" dans les moules. Nous explorons de nouvelles pistes pour réduire ce phénomène, en procédant notamment à de nouvelles modifications de la composition du bain électrochimique et du banc d'électrochimie (retour à une disposition horizontale et agitation verticale par flux de solution au travers de la contre électrode).

4. Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons évalué les caractéristiques magnétique et électrique des matériaux utilisés pour la fabrication des micro-bobines. La caractérisation magnétique de l'alliage NiFe déposé par électrochimie a été effectuée par le CEGELY au moyen d'un banc de mesure permettant l'obtention de la caractéristique $B(H)$ de dispositifs spécifiques de forme torique, réalisés avec les mêmes procédés de fabrication que ceux des micro-bobines.

Nous avons également mesuré les résistivités du Cuivre et du NiFe déposés par électrochimie à l'aide de dispositifs en forme de ruban, par la méthode des "quatre pointes".

Malgré la difficulté d'obtenir des caractéristiques reproductibles, on constate toutefois tant sur le plan électrique que magnétique que les valeurs relevées sont assez proches de celles habituellement rencontrées dans la littérature scientifique.

Dans la seconde partie de ce chapitre, nous avons présenté les premiers prototypes de deux topologies de micro-bobines fabriquées en limitant de 10 μ m à 30 μ m les épaisseurs de matériaux, afin de réduire les effets des contraintes dues aux fortes épaisseurs de matériau. Ceci nous a permis de valider l'enchaînement des étapes de fabrication de ces structures et d'effectuer les premières caractérisations électriques des dispositifs de faibles épaisseurs. Ces caractérisations nous ont confirmé que la structure "mixte" n'était pas adaptée à l'application de conversion d'énergie visée.

Aujourd'hui, quelques améliorations au niveau du procédé et des masques sont toujours à l'étude afin de limiter les inclusions de résine dans les vias d'interconnexions entre les couches, d'améliorer l'homogénéité des dépôts de NiFe ou encore de réduire les décollements de résine, tout cela dans le but d'accroître les épaisseurs des couches pour obtenir des bobines avec les caractéristiques requises dans l'application envisagée.

Conclusion générale

Dans la première partie de la thèse, nous avons fait un état de l'art sur la réalisation de micro-bobine dans des domaines aussi variés que les hyperfréquences, les capteurs, les micro-moteurs ou l'électronique de puissance. L'étude bibliographique fait apparaître une disparité des avancées dans ces différents domaines, et notamment un net déficit concernant le développement pour les applications orientées petite puissance. Dans ce domaine, des travaux ont malgré tout fait avancer l'étude de ces composants et l'on rencontre actuellement trois familles de micro-bobines dédiées aux applications de petite puissance : spirale, toroïdale et en serpent. Il n'y a pas aujourd'hui d'industrialisation de ce type de dispositifs à cause du coût et de la difficulté de mise en œuvre des procédés technologiques utilisés dans l'élaboration de ces composants.

Comme point de départ de notre étude, nous avons choisi le cahier des charges d'un micro-convertisseur de type Buck synchrone, destiné au domaine de l'électronique portable ou embarquée nécessitant une conversion d'énergie de faible puissance. La seconde partie de notre travail a consisté tout d'abord, à partir des conditions de fonctionnement de ce système, à effectuer le dimensionnement des composants passifs, et plus particulièrement celui de la micro-bobine. Ensuite, après avoir choisi les matériaux à utiliser pour la fabrication du composant inductif (cuivre pour le conducteur et l'alliage NiFe pour le noyau magnétique), nous avons défini la géométrie du noyau magnétique permettant de répondre aux contraintes du cahier des charges. Au moyen de simulations réalisées par le LEG, nous avons mis en évidence les phénomènes d'effet de peau liés au fonctionnement en haute fréquence, et des modifications de structure ont été apportées afin de remédier à cet inconvénient.

Le troisième chapitre fait état du travail de mise au point des moyens technologiques requis pour la fabrication de deux topologies de micro-bobines. L'électrochimie du cuivre et du Fer-Nickel (80%/20%) et la photolithographie de la résine négative SU-8 utilisée pour les moules ont fait l'objet d'une étude particulière. En prenant en compte les limitations technologiques, nous avons détaillé les procédés de fabrication des deux structures de micro-bobine. La première structure dite "mixte" est novatrice et permet de réduire le nombre d'étapes de fabrication. Même si cette topologie est mal adaptée pour l'application visée, elle reste néanmoins intéressante pour des applications ne nécessitant pas de stockage d'énergie. La seconde structure en "spirale", dimensionnée et simulée par le L.E.G. avec des outils logiciels appropriés, permet de répondre aux spécifications du micro-convertisseur. Dans cette partie de la thèse, nous soulignons les problèmes technologiques rencontrés et proposons des solutions pour pallier à ces difficultés.

Dans la première partie du chapitre IV, nous avons évalué les caractéristiques magnétique et électrique des matériaux utilisés pour la fabrication des micro-bobines. La caractérisation magnétique de l'alliage NiFe déposé par électrochimie a été effectuée par le CEGELY au moyen d'un banc de mesure permettant l'obtention de la caractéristique $B(H)$ de dispositifs spécifiques de forme torique.

Nous avons également mesuré les résistivités du Cuivre et du NiFe déposés par électrochimie à l'aide de dispositifs en forme de ruban, par la méthode des "quatre pointes".

Dans la seconde partie de ce chapitre, nous avons présenté les premiers prototypes de deux topologies de micro-bobines fabriquées en limitant à $10\mu\text{m}$ les épaisseurs de matériaux, afin de réduire les effets des contraintes dues aux fortes épaisseurs de matériau. Ceci nous a permis de valider l'enchaînement des étapes de fabrication de ces structures et d'effectuer les premières caractérisations électriques des dispositifs de faibles épaisseurs. Ces caractérisations nous ont confirmé que la structure "mixte" n'était pas adaptée à l'application de conversion d'énergie visée.

Aujourd'hui, quelques améliorations au niveau du procédé et des masques sont toujours à l'étude afin d'améliorer l'homogénéité des dépôts de NiFe ou encore de réduire les décollements de résine, tout cela dans le but d'accroître les épaisseurs des couches (environ $100\mu\text{m}$) pour obtenir des bobines avec les caractéristiques requises dans l'application envisagée.

En parallèle, nous explorons également de nouvelles pistes en vue de trouver des matériaux magnétiques naturellement adaptés au fonctionnement en haute fréquence et dont la mise en œuvre est compatible avec la technologie CMOS.

ANNEXES

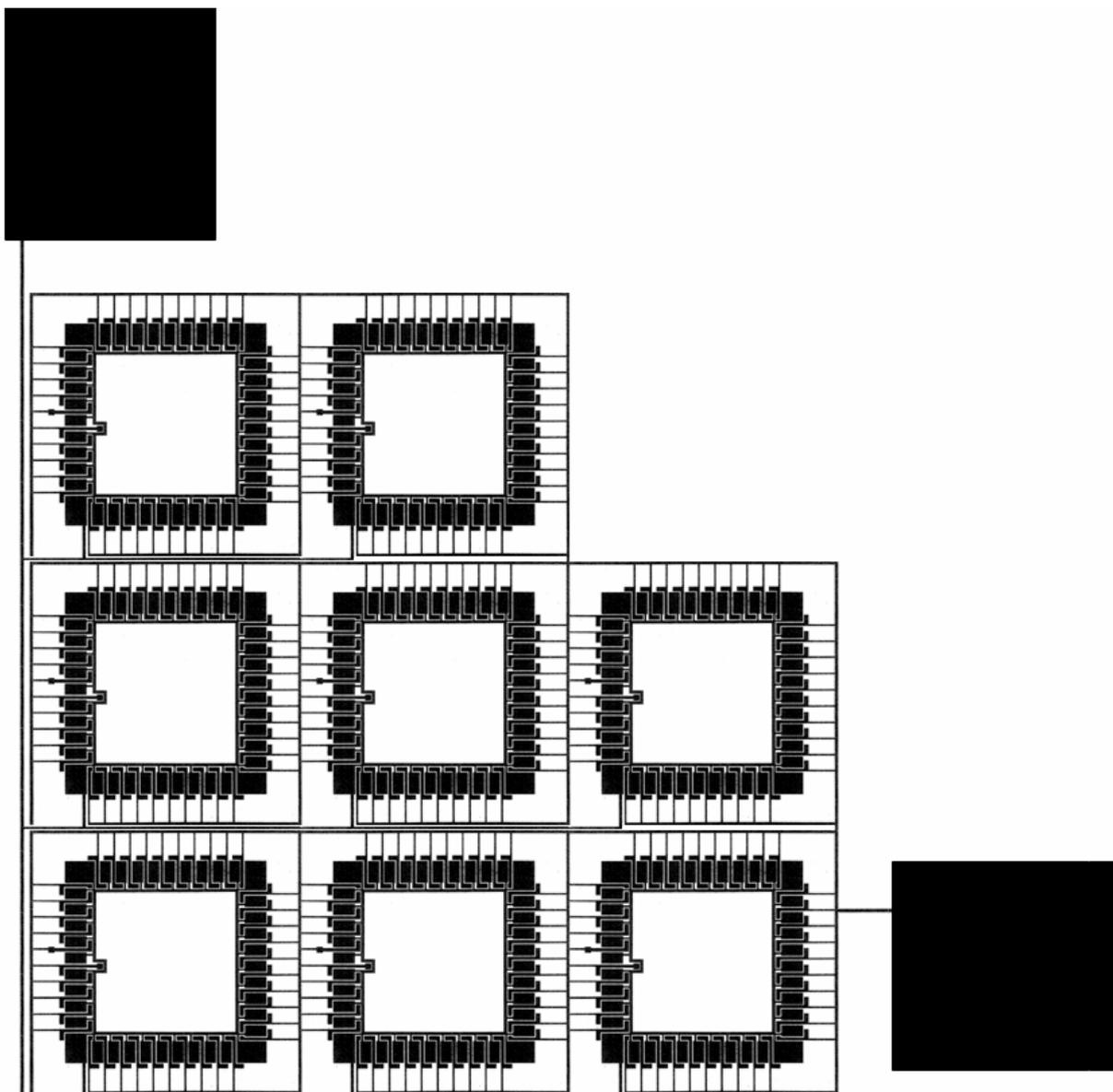


Figure A-3-1 : Quart de wafer du jeu de masque N°1 - couche d'accrochage

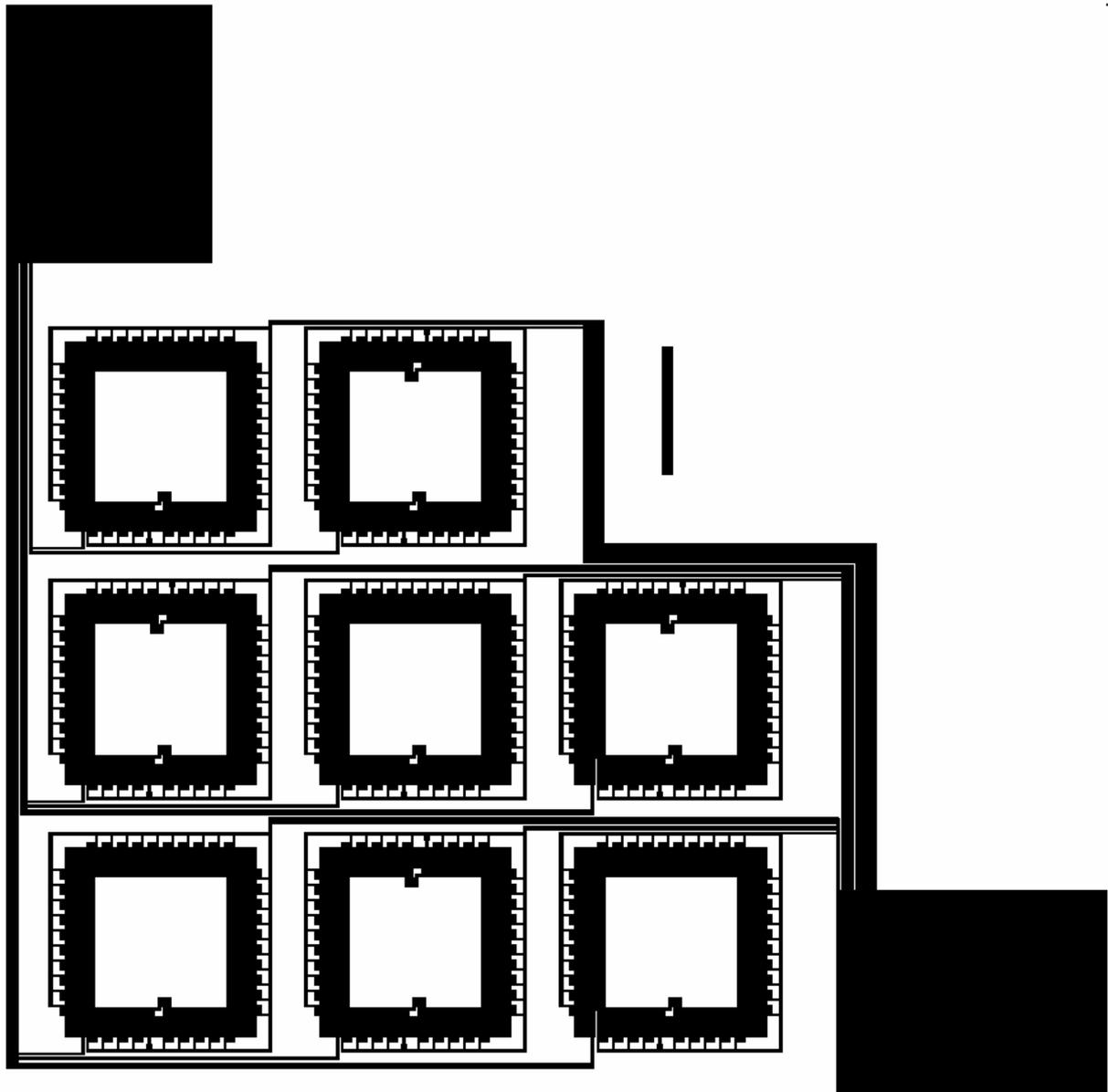


Figure A-3-2 : Quart de wafer du jeu de masque N°2 - couche d'accrochage

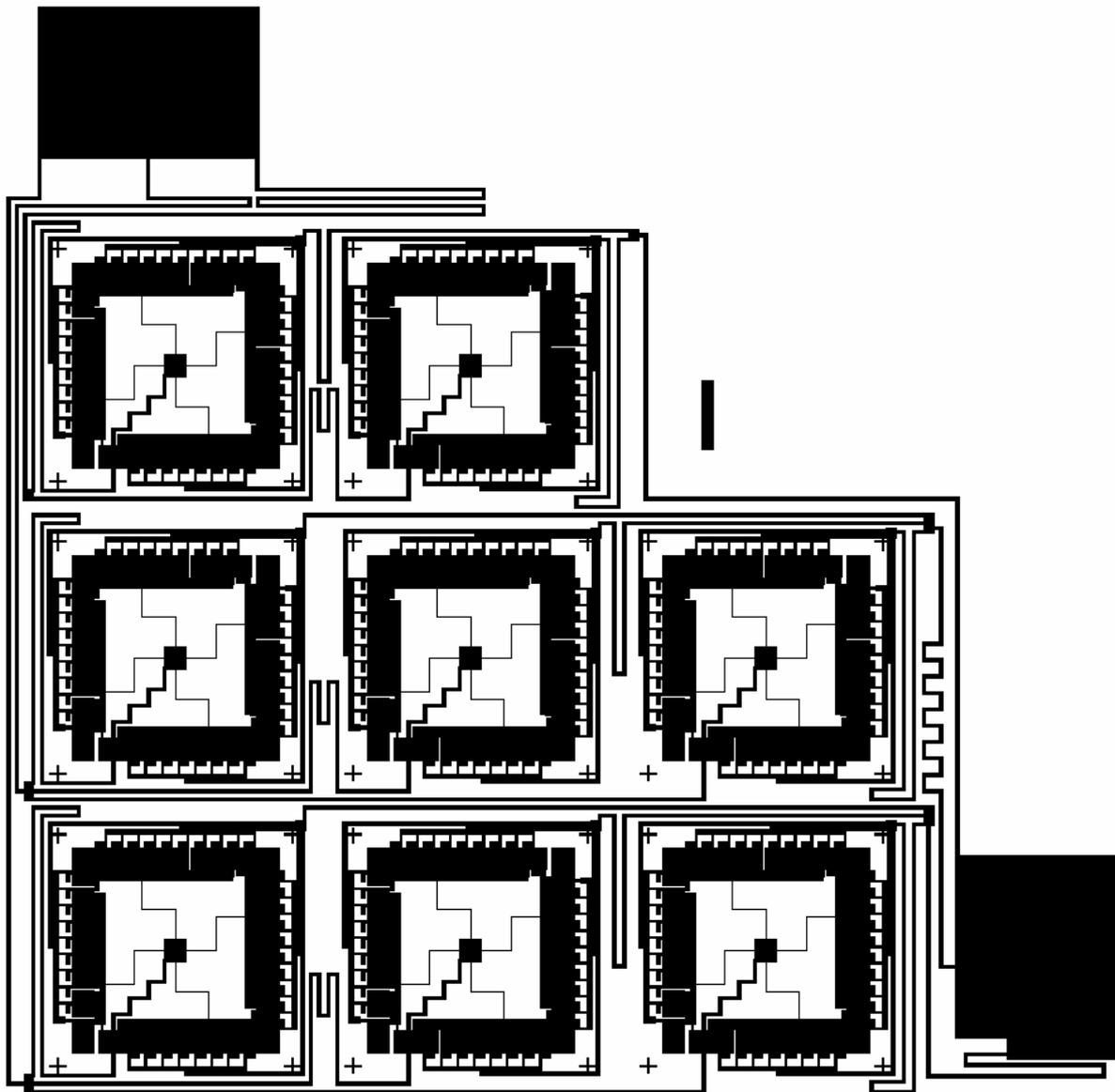


Figure A-3-3 : Quart de wafer du jeu de masque N°3 - couche d'accrochage

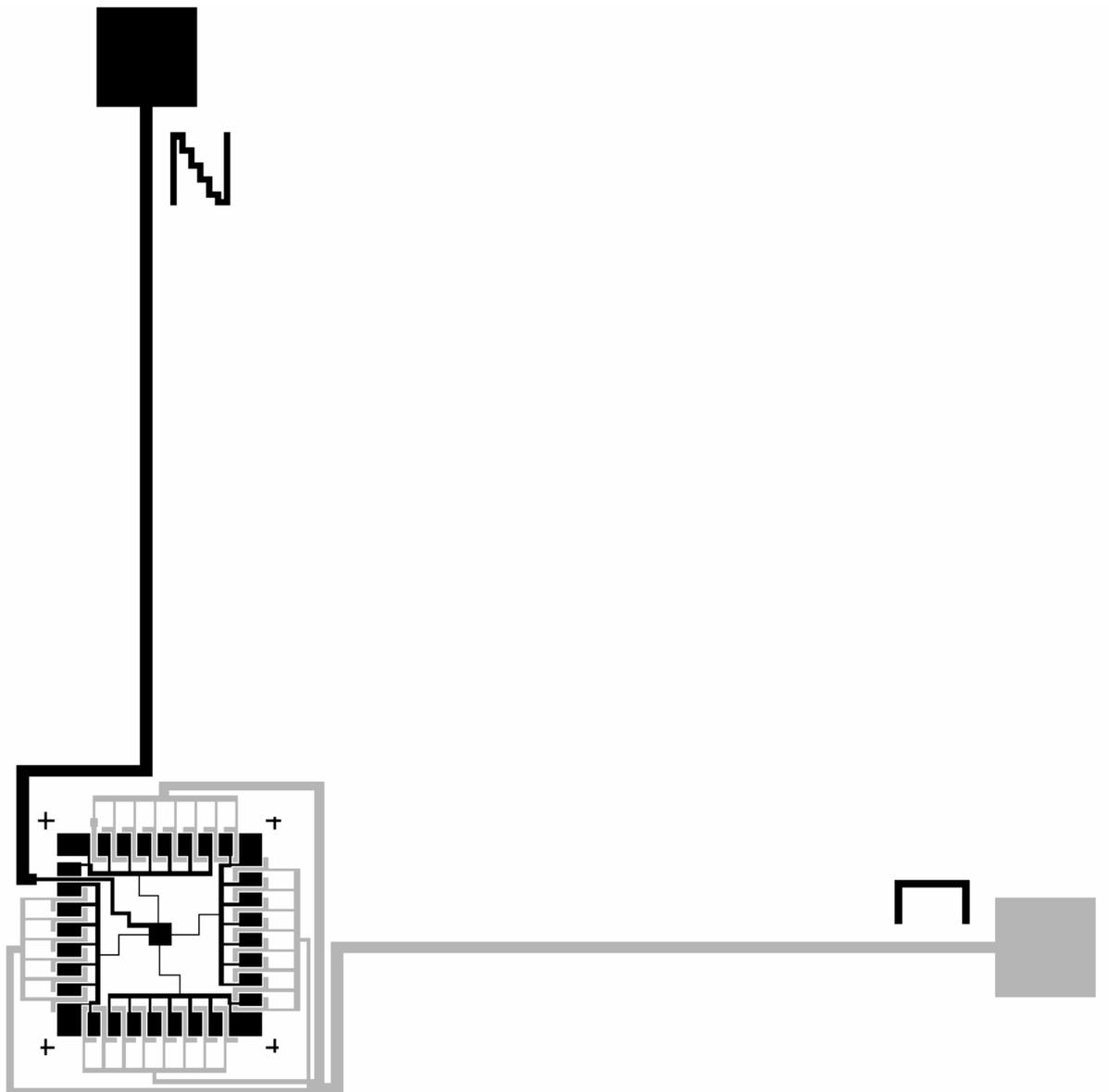


Figure A-3-4 : Quart de wafer du jeu de masque N°4 - couche d'accrochage. En gris le réseau du conducteur et en noir le réseau du noyau magnétique.

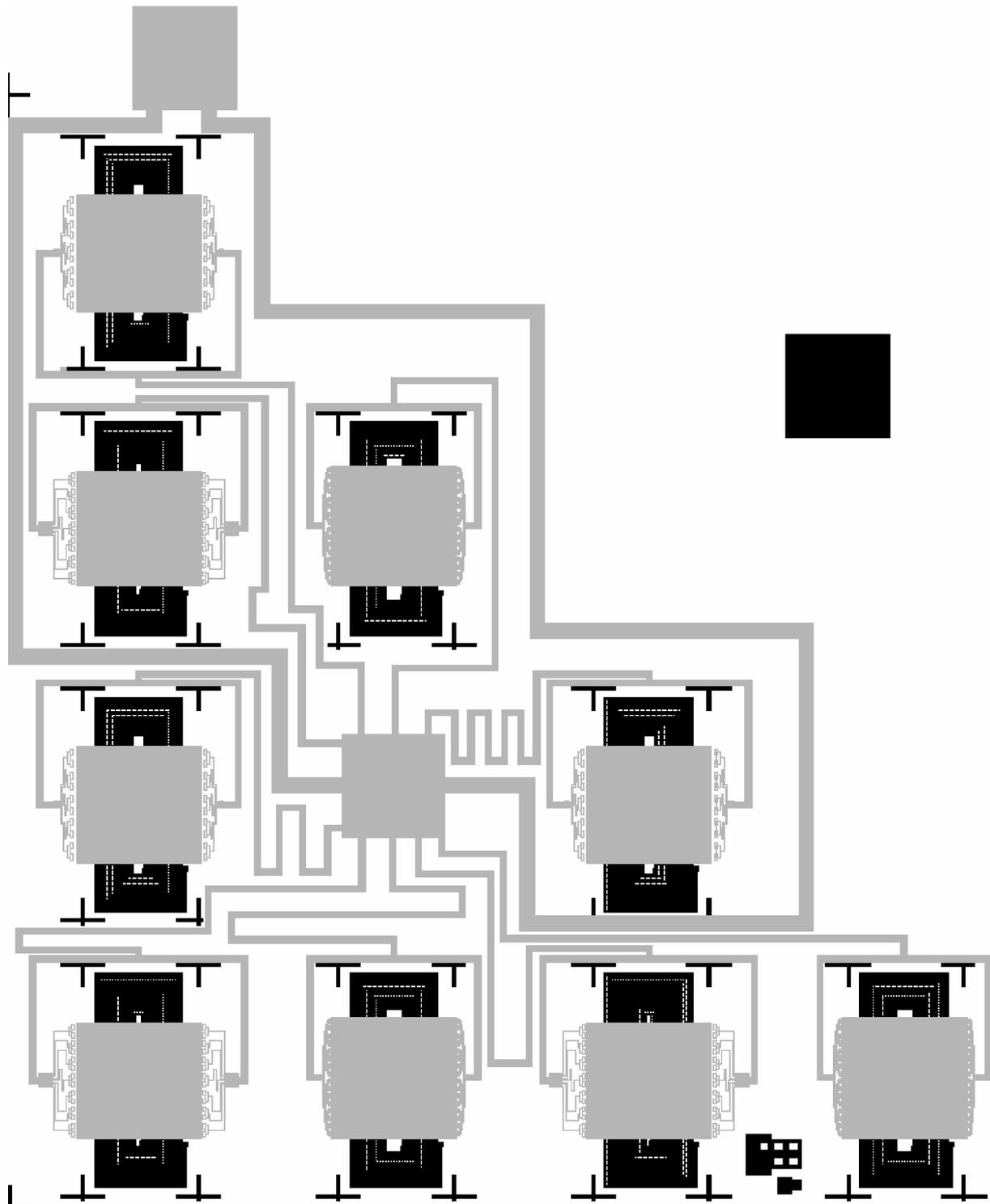


Figure A-3-5 : Quart de wafer du jeu de masque de la structure "spirale". En gris, la couche d'accrochage aménagée servant à la croissance du noyau magnétique.

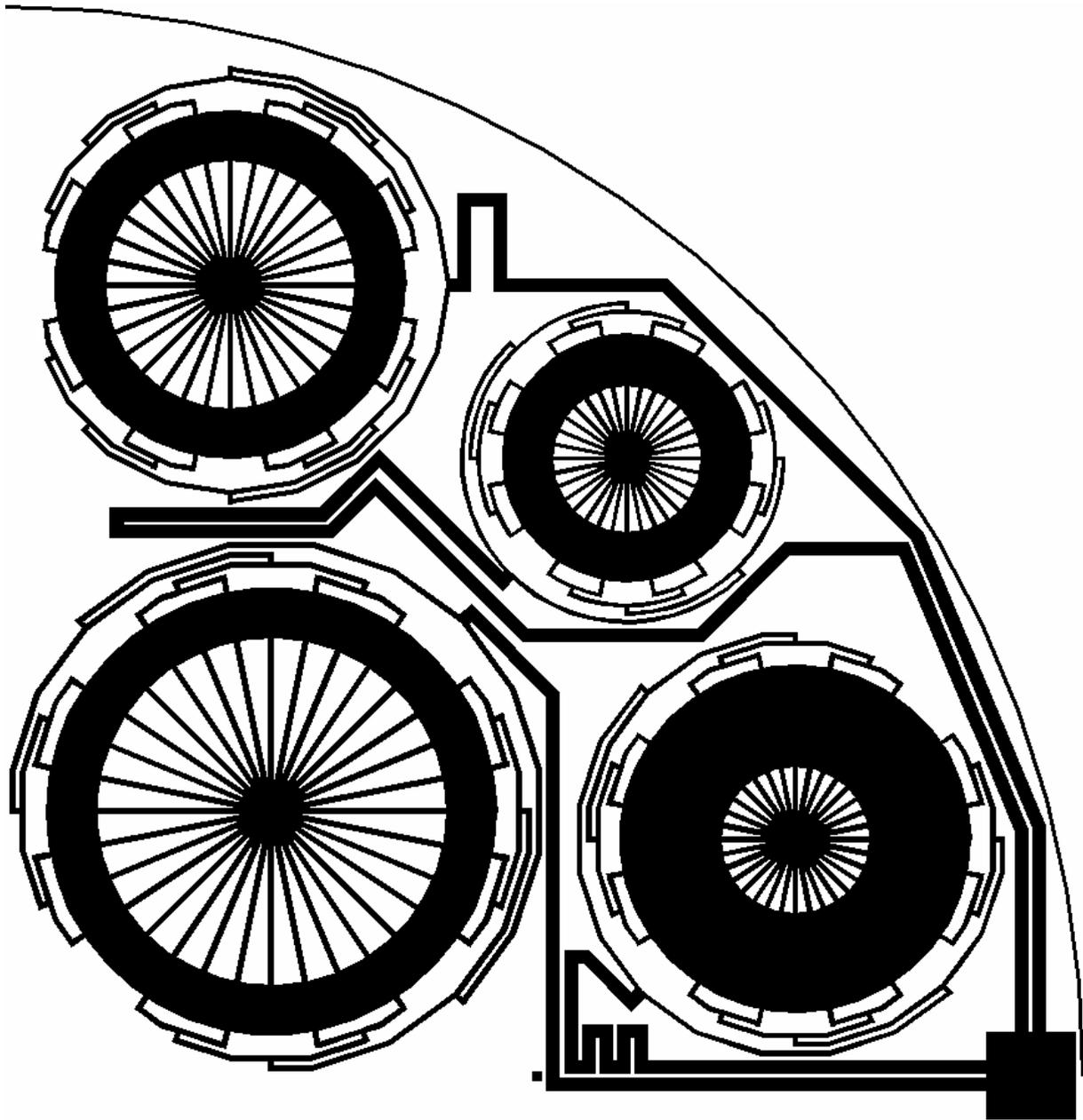


Figure A-4-1: Vue générale sur un quart de plaquette de la couche d'accrochage utilisée pour la fabrication des tores avec répartition du courant d'électrochimie

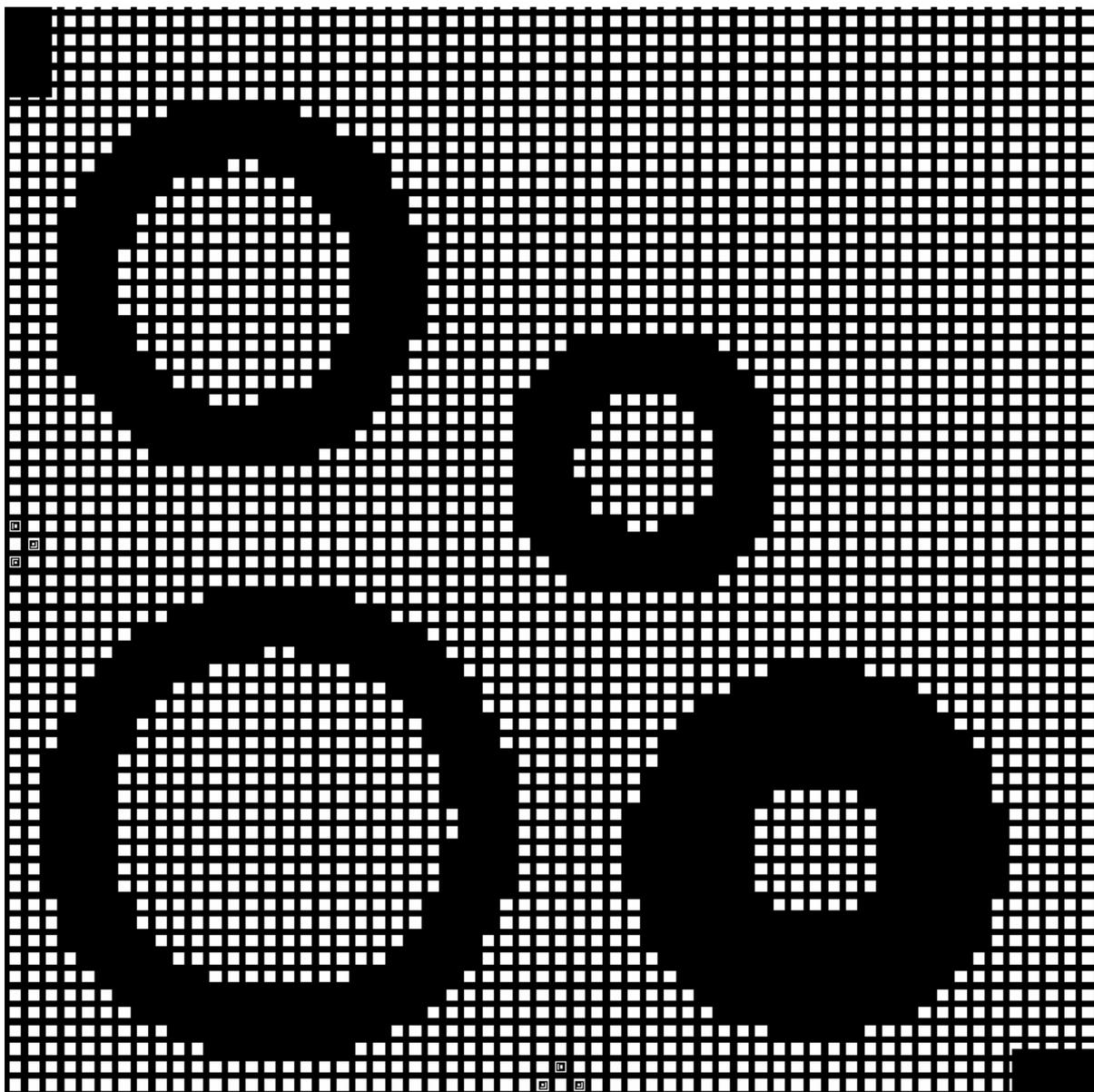


Figure A-4-2: Vue générale sur un quart de plaquette de la couche d'accrochage utilisée pour la fabrication des tores afin d'améliorer l'adhérence de la résine sur le substrat sans répartition du courant d'électrochimie

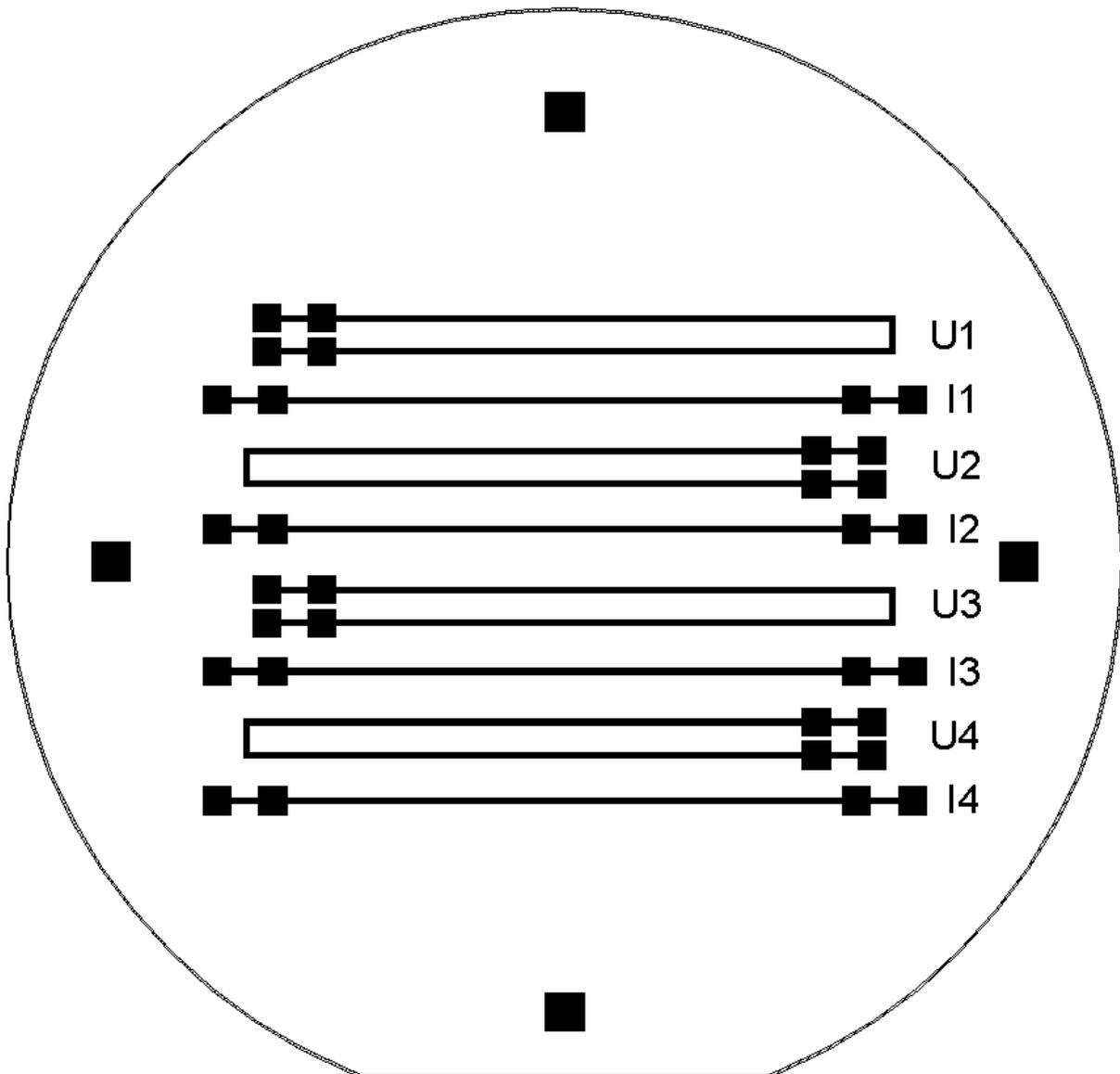


Figure A-4-3: Vue générale du masque des moules des motifs de mesure de résistivité.