

(19)



(11)

EP 1 921 640 A1

(12)

DEMANDE DE BREVET EUROPEEN

(43) Date de publication:
14.05.2008 Bulletin 2008/20

(51) Int Cl.:
H01F 17/00 (2006.01) H01F 17/04 (2006.01)
H01F 27/25 (2006.01) H01F 41/04 (2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **07354060.1**

(22) Date de dépôt: **06.11.2007**

(84) Etats contractants désignés:
AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MT NL PL PT RO SE SI SK TR
Etats d'extension désignés:
AL BA HR MK RS

• **Centre National de la Recherche Scientifique**
75794 Paris Cedex 16 (FR)

(72) Inventeurs:
• **Bastien, Orlando**
13170 Les Pennes Mirabeau (FR)
• **Bernard, Viala**
38360 Sassenage (FR)

(30) Priorité: **07.11.2006 FR 0609714**

(71) Demandeurs:
• **COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE**
75015 Paris (FR)
• **STMICROELECTRONICS SA**
92120 Montrouge (FR)

(74) Mandataire: **Jouvray, Marie-Andrée et al**
Cabinet Hecké
World Trade Center - Europole
5, place Robert Schuman
B.P. 1537
F-38025 Grenoble Cedex 1 (FR)

(54) **Noyau magnétique fermé en forme de spirale et micro-inductance intégrée comportant un tel noyau magnétique fermé**

(57) Le noyau magnétique (1) fermé est destiné à l'utilisation pour une micro-inductance intégrée. Le noyau magnétique a une forme de spirale, de préférence sensiblement rectangulaire. La spirale comporte deux extrémités (2) reliées l'une à l'autre par un segment de

fermeture (3). Le noyau magnétique (1) peut être constitué par une pluralité (4, 5) de branches et au moins deux branches peuvent être disposées dans des plans différents parallèles. De plus, deux branches peuvent avoir des épaisseurs différentes. Le noyau magnétique peut comporter un entrefer.

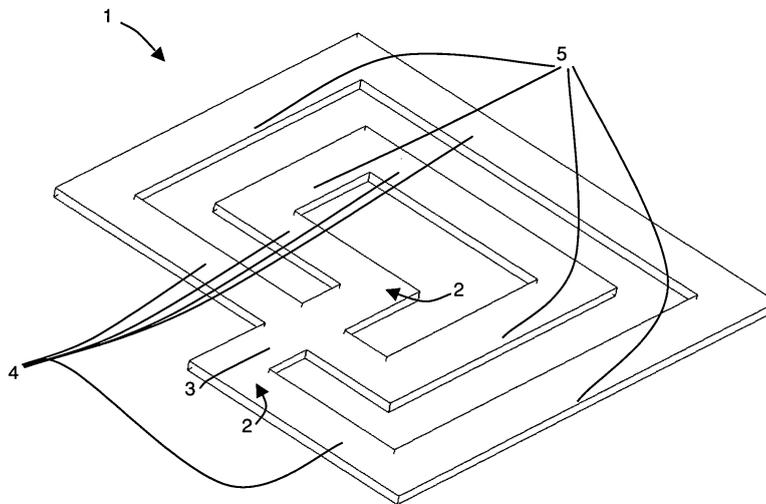


Figure 1

EP 1 921 640 A1

Description

Domaine technique de l'invention

[0001] L'invention est relative à un noyau magnétique fermé pour une micro-inductance intégrée.

État de la technique

[0002] L'invention s'inscrit dans la thématique des micro-inductances intégrées pour des applications en électronique de puissance. Elle peut, d'une manière plus générale, s'appliquer à tous les systèmes inductifs (inductances, transformateurs, têtes d'enregistrement magnétique, actionneurs, capteurs, etc...) nécessitant une haute densité de puissance électrique.

[0003] Il existe depuis de nombreuses années des micro-inductances de divers types, utilisant des bobinages de type spirale ou solénoïde. Cependant, les composants discrets restent très majoritairement utilisés dans des applications utilisant de fortes densités de puissance car ils offrent un meilleur compromis entre inductance et courant de saturation.

[0004] Un bobinage de type spirale avec plan magnétique est facile à intégrer et permet de travailler à de forts courants. Cependant, ce type de dispositif devient très encombrant dès lors que l'on vise de fortes valeurs d'inductance (L de l'ordre du μH), parce qu'il faut un nombre de tours de spirale élevé. De plus, la résistance de tels dispositifs est importante.

[0005] Les micro-inductances intégrées toroïdales avec bobinage solénoïde, ainsi que leurs améliorations en méandres (voir l'article « Integrated Electroplated Micromachined Magnetic Devices Using Low Temperature Fabrication Processes » by J.Y.Park et al., IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, Vol. 23, n° 1, 2000), sont directement inspirées des composants discrets et présentent le meilleur compromis possible entre résistance et niveau d'inductance, car on s'approche du cas idéal du solénoïde infini. Cependant, des simulations montrent que le flux magnétique à l'intérieur du noyau est réparti de façon très inhomogène. Le champ magnétique est plus intense le long des lignes de champ les plus courtes. Les zones du noyau magnétique soumises aux champs les plus intenses sont très rapidement saturées, provoquant une diminution de l'inductance dès des faibles courants, alors que d'autres zones sont soumises à des champs beaucoup plus faibles et ne participent que peu ou pas au phénomène inductif, c'est-à-dire elles n'ont pas de contribution à la valeur de l'inductance. Les zones utiles du noyau magnétique sont donc très vite saturées alors que d'autres zones restent non sollicitées.

[0006] De plus, la puissance maximale passant dans une inductance est déterminée par le volume de matériau magnétique utilisé dans le cas d'un composant intégré. Ce volume est déterminé par l'épaisseur de matériau magnétique (épaisseurs inférieures à 100 microns pour des

composants intégrés) et la surface occupée par ce noyau magnétique.

[0007] Les transformateurs et inductances avec noyau magnétique en forme de E ou de E-1 sont très utilisés en électrotechnique, essentiellement dans des transformateurs discrets (et dans les dispositifs de type DC/DC discrets) afin de faciliter l'assemblage et le bobinage des inductances, ou bien pour pouvoir jouer sur les facteurs de conversion entre les trois bobinages de chaque branche, ou sur les effets d'inductances mutuelles entre les bobinages distincts de chaque branche (voir l'article « New Magnetic Structures for Switching Converters » de S.Cuk, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-19, n° 2, 1983). Dans ces dispositifs, le bobinage n'est pas continu d'une branche à l'autre, mais réalisé par des fils distincts.

[0008] La plupart des micro-inductances utilisées sur le marché sont des composants discrets fabriqués par des procédés micromécaniques de micro usinage, collage, micro-enroulement, etc... Ces procédés sont lourds à mettre en oeuvre, à traitement individuel, peu flexibles en termes de conception et limitent grandement la miniaturisation des circuits de puissance. En particulier, l'épaisseur des micro-inductances discrètes (typiquement supérieure à 0.5 mm) ne permet pas une mise en boîtier appropriée aux circuits d'alimentation utilisés actuellement pour la téléphonie mobile, par exemple.

[0009] Les techniques de fabrications utilisées en microélectronique permettent une flexibilité bien plus grande au niveau de la mise en oeuvre de conceptions différentes, assurent un traitement collectif et sont compatibles avec l'idée de miniaturisation car l'épaisseur (substrat compris) peut facilement être inférieure à 300 μm . Cependant, elles sont mal adaptées au dépôt de fortes épaisseurs (supérieures à 10 μm) de matériaux conducteurs, magnétiques ou diélectriques et à leur gravure après photolithographie.

[0010] Pour les composants intégrés, on se heurte à des contraintes de réalisation technologique. En effet, des dépôts de couches conductrices ayant une épaisseur supérieure à 100 micromètres ne sont pour l'instant pas envisageable dans un procédé industriel standard.

[0011] L'article « Numerical Inductor Optimization » de A. von der Weth et al. (Trans. Magn. Soc. Japan, Vol. 2, No.5, pp.361-366, 2002) décrit une micro-inductance avec un circuit magnétique ouvert de type multi-branche. Une pluralité de spires disjointes les unes des autres constitue un bobinage autour des branches du noyau magnétique. Pour ces dispositifs, on cherche à augmenter le niveau d'inductance et à minimiser les pertes.

[0012] Les micro-inductances intégrées présentent en général une inductance qui diminue fortement lorsque le courant appliqué aux spires de la micro-inductance est augmenté, même pour des courants faibles, ce qui oblige d'utiliser des inductances discrètes non-intégrées, dans certain cas.

[0013] Les puces microélectroniques de petites dimensions (quelques millimètres au carré) sont généra-

lement de forme carrée. L'intégration d'inductances impose donc des contraintes que l'on ne connaît pas pour les composants discrets. Les solutions proposées sont donc souvent complexes. Pour les inductances, en particulier, on cherche à minimiser la surface occupée, d'autant plus que le recours aux techniques de dépôt en couches minces limite grandement les épaisseurs utiles. En effet, la puissance d'une inductance $L I_{\text{sat}}^2$ (L étant l'inductance et I_{sat} le courant de saturation) dépend directement du volume de matériau magnétique disponible.

Objet de l'invention

[0014] L'objet de l'invention est d'augmenter la compacité d'un noyau d'une micro-inductance intégrée et, pour un encombrement donné, d'augmenter la valeur de l'inductance.

[0015] Selon l'invention, ce but est atteint par un noyau magnétique selon les revendications annexées et plus particulièrement par le fait que le noyau magnétique a une forme de spirale comportant deux extrémités reliées l'une à l'autre par un segment de fermeture.

[0016] L'invention a également pour but une micro-inductance intégrée comportant un noyau magnétique selon l'invention.

Description sommaire des dessins

[0017] D'autres avantages et caractéristiques ressortiront plus clairement de la description qui va suivre de modes particuliers de réalisation de l'invention donnés à titre d'exemples non limitatifs et représentés aux dessins annexés, dans lesquels :

- la figure 1 représente, en vue de perspective, un mode de réalisation particulier d'un noyau magnétique fermé selon l'invention,
- les figures 2 à 4 illustrent respectivement, en vue de dessus, deux noyaux magnétiques fermés selon l'art antérieur et un mode de réalisation particulier du noyau magnétique fermé selon l'invention,
- la figure 5 représente, en coupe selon l'axe A-A de la figure 4, un mode de réalisation particulier de l'invention,
- la figure 6 représente, en vue de dessus, un mode de réalisation particulier d'un noyau magnétique fermé selon l'invention,
- la figure 7 illustre un mode de réalisation particulier d'une micro-inductance intégrée selon l'invention.

Description d'un mode préférentiel de l'invention

[0018] Le noyau magnétique 1, représenté sur la figure 1, a une forme de spirale. La spirale comporte deux extrémités 2 reliées l'une à l'autre par un segment de fermeture 3. Ainsi, le noyau magnétique 1 est fermé.

[0019] Sur la figure 1, le noyau magnétique 1 est cons-

titué par un premier jeu 4 de cinq branches parallèles et un second jeu 5 de quatre branches parallèles, sensiblement perpendiculaires aux branches du premier jeu 4. La spirale constituée par l'ensemble des branches des deux jeux 4 et 5 est ainsi rectangulaire. Le raccordement constitué par le segment de fermeture 3 s'ajoute à la spirale pour former le noyau magnétique 1.

[0020] Comme illustré par l'intermédiaire des figures 2 à 4, le noyau magnétique 1 permet de maximiser l'occupation de l'espace au centre du noyau 1 et de la micro-inductance correspondante.

[0021] On définit une longueur l du noyau magnétique, correspondant à la longueur développée du circuit magnétique, et le nombre N de spires du bobinage entourant le noyau magnétique 1. On peut démontrer, par l'intermédiaire du modèle des réductances, les expressions suivantes (L étant l'inductance et I_{sat} le courant de saturation) :

$$L \sim N^2/l,$$

$$I_{\text{sat}} \sim l/N \text{ et}$$

$$L I_{\text{sat}}^2 \sim l.$$

[0022] Ainsi, pour augmenter la puissance de saturation $P_{\text{sat}} = L I_{\text{sat}}^2$ de l'inductance, on cherche à augmenter la longueur l du noyau magnétique. L'inductance L et le courant de saturation I_{sat} résultent ainsi d'un compromis sur le nombre de spires N , qui est d'autant plus grand que la longueur l du noyau est grand.

[0023] Une inductance annulaire selon l'art antérieur, représentée à la figure 2, s'adapte particulièrement bien à une puce de forme carrée. La longueur de l'anneau développé dépend du périmètre extérieur de la puce. Cette géométrie ne permet pas d'exploiter la partie centrale de la puce.

[0024] La figure 3 représente une amélioration de l'inductance annulaire, l'inductance en méandres décrite dans l'article de Park précité. L'inductance en méandres permet d'utiliser la zone centrale en étirant l'une des quatre branches de l'anneau de manière à constituer un ou plusieurs méandres couvrant la partie centrale. Cette solution permet d'augmenter la longueur l du noyau à surface constante. En utilisant des règles de conception habituelles, l'occupation de la zone centrale par le noyau en méandres (figure 3) permet d'obtenir un gain sur la longueur l du noyau de l'ordre de 33%, par rapport au noyau annulaire (figure 2). En augmentant le nombre N de spires en fonction de la longueur l du noyau, on obtient un compromis avec un gain sur l'inductance L d'environ 20 % et un gain sur le courant de saturation I_{sat} d'environ

10 %.

[0025] Toutefois, l'inductance sous forme de méandres n'est optimale que dans des cas particuliers où la largeur de l'anneau et la largeur des branches vérifient certaines conditions de géométrie. En effet, la zone centrale doit être suffisamment grande pour permettre l'insertion d'un nombre entier de méandres.

[0026] Comme représenté à la figure 3, le noyau a une largeur globale T, les branches ont une largeur W et l'espacement entre deux branches adjacentes doit être supérieur à un espacement minimum S. Ainsi, pour un nombre Nm de méandres donné, la largeur globale T du noyau doit remplir la condition :

$$T \geq 2W + Nm * 2W + (2Nm + 1) * S.$$

[0027] Le rapport du nombre Nm de méandres sur la surface de la zone centrale est maximisé lorsque la partie gauche et la partie droite de l'équation sont égales :

$$T = 2W + Nm * 2W + (2Nm + 1) * S.$$

[0028] En admettant que la largeur W des branches et l'espacement minimum S sont égaux (S=W) la condition se simplifie :

$$T/W \geq 3 + 4Nm,$$

où T/W est le rapport de la largeur globale T sur la largeur W des branches. Pour T/W=7, 11, 15..., le noyau en méandres permet donc de remplir la zone centrale de façon optimale. Pour T/W=9, 13, 17... cependant, une partie importante de la zone centrale reste inutilisée. La mise en oeuvre de noyaux en méandres est donc restrictive dans la pratique puisque la taille de la puce et la largeur des branches sont en général imposées de façon indépendante. Une partie de la zone centrale peut ainsi rester inutilisée.

[0029] Le noyau magnétique 1 fermé en forme de spirale présente une plus grande indépendance vis-à-vis des contraintes dimensionnelles, et permet ainsi d'optimiser la longueur l du noyau, l'inductance L et le courant de saturation I_{sat} pour une surface donnée quelconque. Comme précédemment, le gain sur la longueur de noyau l et le gain en puissance du noyau en spirale (figure 4) peuvent être évalués vis-à-vis de la structure annulaire de référence (figure 2). Il convient alors de distinguer deux cas :

- Lorsque le rapport T/W équivaut essentiellement à la partie de droite de l'équation ci-dessus, c'est-à-dire lorsque

$$T/W \approx 3 + 4Nm (=7, 11, 15...),$$

le noyau en spirale fermé et le noyau en méandres sont comparables, car le gain sur la longueur et le gain sur la puissance sont comparables.

- Lorsque l'équation ci-dessus n'est pas vérifiée, le noyau en spirale fermée permet d'obtenir un gain en longueur l et un gain en puissance plus importants que le noyau en méandres, par exemple pour T/W compris entre 8 et 10 (8 < T/W < 10) ou pour T/W compris entre 12 et 14 (12 < T/W < 14).

[0030] En particulier, dans le cas d'un rapport T/W = 9, le noyau en spirale (figure 4) permet d'obtenir 53% de gain sur la longueur l et sur la puissance, par rapport à l'anneau (figure 2).

[0031] Les branches et le segment de fermeture 3 ont une direction préférentielle de propagation du flux magnétique en dynamique. Les axes magnétiques des branches et du segment de fermeture 3 sont orientés les uns par rapport aux autres, de manière à obtenir un flux sous forme d'une boucle fermée comme représenté à la figure 4 par les flèches 6.

[0032] Les branches peuvent être disposées dans des plans différents parallèles. Ainsi, comme représenté à la figure 5, le premier jeu 4 de branches parallèles est disposé dans un premier plan et le second jeu 5 de branches parallèles est disposé dans un second plan, parallèle au premier plan et supérieur au premier plan sur la figure 5. Par ailleurs, les branches peuvent avoir des épaisseurs différentes. Ainsi, sur la figure 5 les branches du premier jeu 4 sont moins épaisses que les branches du second jeu 5. Ceci permet notamment d'adapter le noyau aux contraintes locales de la puce utilisée et des composants électroniques adjacents.

[0033] Un ou plusieurs entrefers peuvent éventuellement couper le noyau magnétique 1 afin d'augmenter la réluctance du circuit magnétique. Le noyau magnétique 1 représenté à la figure 6 comporte plusieurs entrefers 11 de dimension faible (au moins un facteur 1/10 entre la dimension de l'entrefer et la longueur totale du circuit magnétique). Les entrefers peuvent être disposés dans une ou plusieurs des branches.

[0034] Comme représenté aux figures 1, 4 et 6, les branches constituent une spirale de type rectangulaire, ou au moins sensiblement rectangulaire, ayant deux spirales s'inscrivant dans deux rectangles concentriques. Cependant, selon les besoins, des spirales plus complexes peuvent être envisagées. Les formes mises en jeu peuvent être quelconques, par exemple la géométrie de la spirale est rectangulaire, ronde, carrée ou octogonale. L'homme du métier détermine la forme particulière en utilisant des logiciels de simulation tels que le logiciel Flux de la société Cedrat ou le logiciel Maxwell de la société Ansoft.

[0035] La figure 7 illustre une micro-inductance com-

portant le noyau magnétique 1 selon l'invention. Une pluralité de spires 9 disjointes constitue un bobinage autour du noyau magnétique 1. Toutes les branches du noyau peuvent comporter des spires de bobinage. De préférence, les spires enveloppent la quasi-totalité de la surface du noyau magnétique 1, un écart d'isolement minimum séparant les spires adjacentes. Chaque spire peut comporter une section plane inférieure dans un plan inférieur, une section plane supérieure dans un plan supérieur et deux sections montantes. Le bobinage comporte, de préférence, une entrée électrique unique et une sortie électrique unique. Le segment de fermeture 3 ne comporte, de préférence, pas de spires 9.

[0036] Pour les composants intégrés utilisant des techniques de micro-fabrication classiques, la micro-inductance ne présente aucune difficulté de fabrication additionnelle par rapport aux systèmes conventionnels préexistants.

[0037] Pour le noyau magnétique 1, on utilise des matériaux magnétiques à forte perméabilité (supérieure à 10), typiquement des alliages à base de fer (Fe) et/ou de nickel (Ni) et/ou de cobalt (Co) et pouvant contenir l'un ou plusieurs des éléments suivants : aluminium (Al), silicium (Si), tantale (Ta), hafnium (Hf), azote (N), oxygène (O) et bore (B). Le noyau peut être hétérogène et constitué de plusieurs couches ferromagnétiques et conductrices ou diélectriques (non magnétiques) ou antiferromagnétiques. En particulier, le noyau peut être constitué d'une alternance de couches magnétiques et de couches intermédiaires, par exemple un empilement comportant deux couches magnétiques séparées par une couche intermédiaire. Les couches intermédiaires peuvent, par exemple, être en métal (cuivre Cu, titane Ti ou ruthénium Ru, par exemple) ou en un matériau isolant comme l'oxyde de silicium SiO_2 ou l'oxyde d'aluminium Al_2O_3 , par exemple. Les couches intermédiaires peuvent également être constituées par des matériaux antiferromagnétiques comme l'oxyde de nickel NiO ou les alliages de manganèse (Mn) comportant du nickel (NiMn), de l'iridium (IrMn) ou du platine (PtMn).

[0038] La micro-inductance n'est pas limitée dans sa fréquence d'utilisation, et pourrait convenir à des utilisations à haute fréquence, qui réclament toujours plus de puissance. On peut alors très bien imaginer de tels composants travaillant dans la gamme des micro-ondes et remplaçant les inductances intégrées ou discrètes, avec ou sans matériau magnétique, qui sont habituellement utilisées. On retrouve alors des applications de type filtrage, adaptation d'impédance, etc.

Revendications

1. Noyau magnétique (1) fermé pour une micro-inductance intégrée, **caractérisé en ce qu'il** a une forme de spirale comportant deux extrémités (2) reliées l'une à l'autre par un segment de fermeture (3).

2. Noyau magnétique (1) selon la revendication 1, **caractérisé en ce qu'il** a une forme de spirale de type rectangulaire.

3. Noyau magnétique (1) selon l'une des revendications 1 et 2, **caractérisé en ce que** le noyau magnétique (1) est constitué par une pluralité de branches.

4. Noyau magnétique (1) selon la revendication 3, **caractérisé en ce qu'**au moins deux branches sont disposées dans des plans différents parallèles.

5. Noyau magnétique (1) selon la revendication 4, **caractérisé en ce qu'**un premier jeu (4) de branches parallèles est disposé dans un premier plan et un second jeu (5) de branches parallèles est disposé dans un second plan.

6. Noyau magnétique (1) selon la revendication 5, **caractérisé en ce que** les branches du premier jeu (4) de branches parallèles sont sensiblement perpendiculaires aux branches du second jeu (5) de branches parallèles.

7. Noyau magnétique (1) selon l'une quelconque des revendications 3 à 6, **caractérisé en ce qu'**au moins deux branches ont des épaisseurs différentes.

8. Noyau magnétique (1) selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, **caractérisé en ce qu'il** comporte au moins un entrefer (11).

9. Micro-inductance intégrée, **caractérisée en ce qu'elle** comporte un noyau magnétique (1) selon l'une quelconque des revendications 1 à 8.

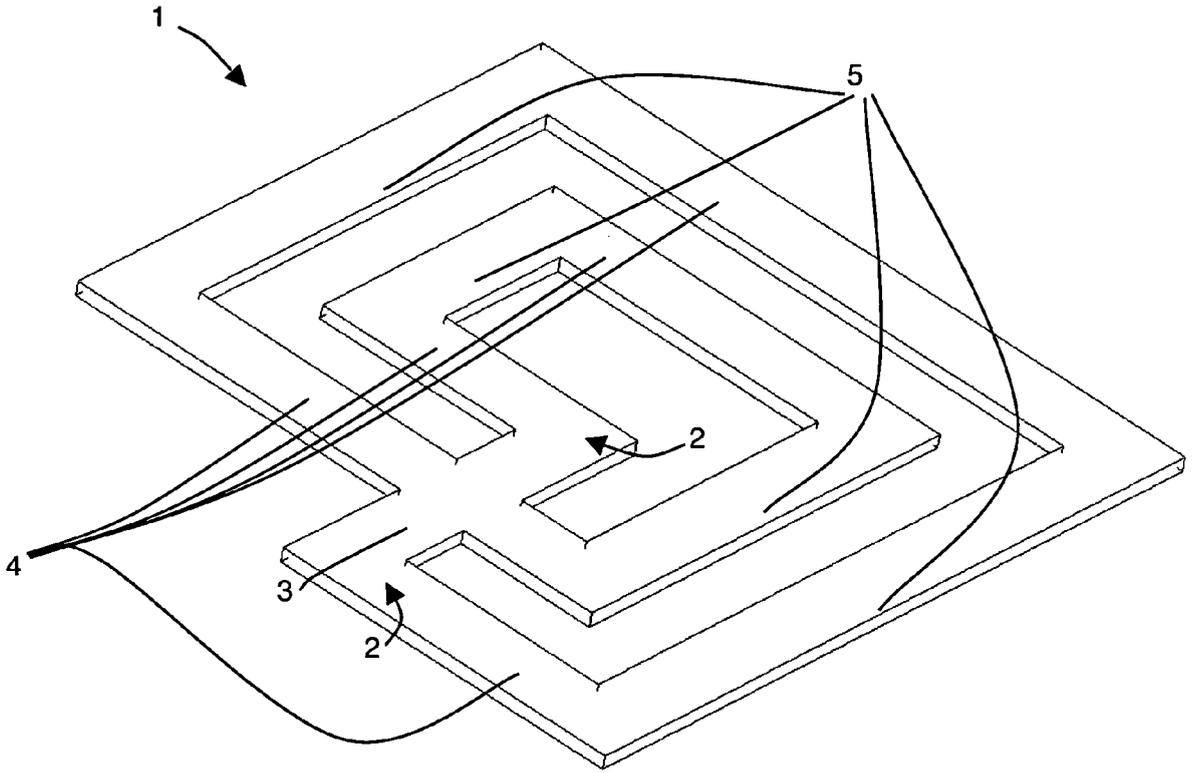


Figure 1

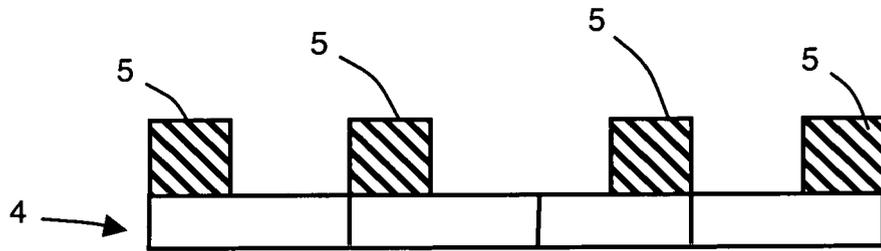


Figure 5

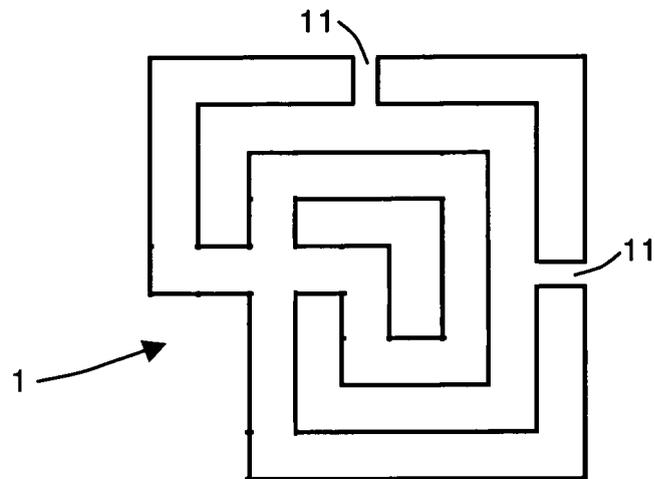


Figure 6

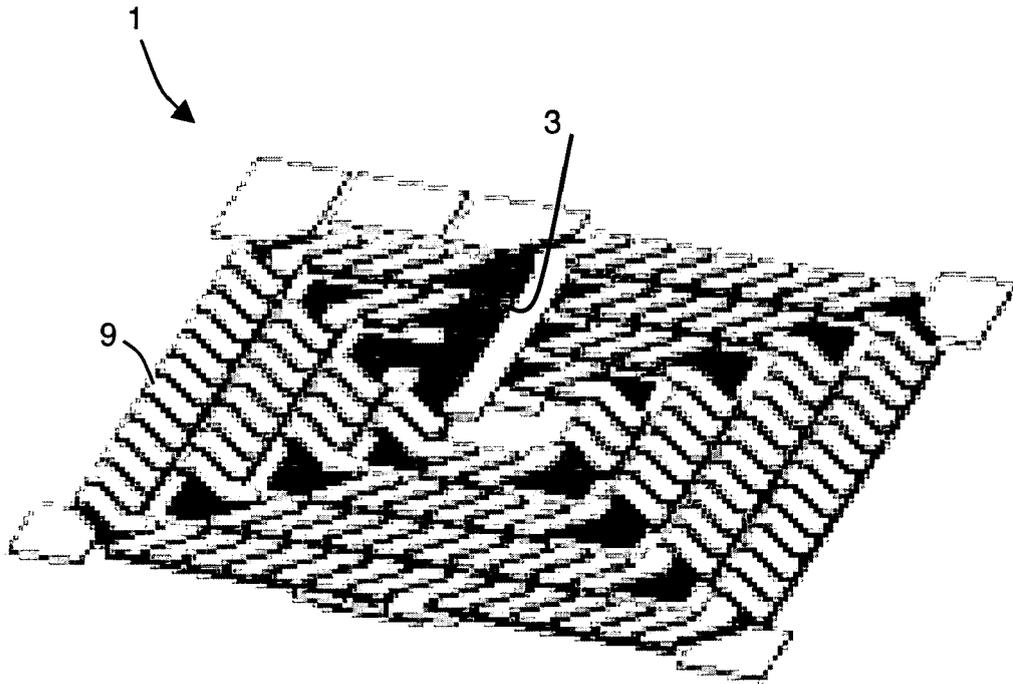


Figure 7



DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS			
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (IPC)
A	DE 30 16 067 A1 (SIEMENS AG [DE]) 29 octobre 1981 (1981-10-29) * page 16, ligne 1 - ligne 31; figures 5,6 *	1	INV. H01F17/00 H01F17/04
A	----- US 6 114 937 A (BURGHARTZ JOACHIM NORBERT [US] ET AL) 5 septembre 2000 (2000-09-05) * colonne 8, ligne 20 - colonne 9, ligne 38; figures 9-14 *	1	ADD. H01F27/25 H01F41/04
D,A	----- JAE YEONG PARK ET AL: "Integrated Electroplated Micromachined Magnetic Devices Using Low Temperature Fabrication Processes" IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRONICS PACKAGING MANUFACTURING, IEEE, PISCATAWAY, NY, US, vol. 23, no. 1, janvier 2000 (2000-01), XP011020016 ISSN: 1521-334X * abrégé; figures 6,7 *	1	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC)
			H01F
7 Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche		Date d'achèvement de la recherche	Examineur
La Haye		22 janvier 2008	Marti Almeda, Rafael
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	
X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire			

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET EUROPEEN NO.**

EP 07 35 4060

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche européenne visé ci-dessus.
Lesdits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets.

22-01-2008

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
DE 3016067	A1	29-10-1981	AUCUN

US 6114937	A	05-09-2000	US 5793272 A 11-08-1998
			US 5884990 A 23-03-1999
			US 6054329 A 25-04-2000

EPO FORM P0460

Pour tout renseignement concernant cette annexe : voir Journal Officiel de l'Office européen des brevets, No.12/82

RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION

Cette liste de références citées par le demandeur vise uniquement à aider le lecteur et ne fait pas partie du document de brevet européen. Même si le plus grand soin a été accordé à sa conception, des erreurs ou des omissions ne peuvent être exclues et l'OEB décline toute responsabilité à cet égard.

Littérature non-brevet citée dans la description

- **J.Y.PARK.** Integrated Electroplated Micromachined Magnetic Devices Using Low Temperature Fabrication Processes. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 2000, vol. 23 (1) [0005]
- **S.CUK.** New Magnetic Structures for Switching Converters. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1983, vol. MAG-19 (2) [0007]
- **A. VON DER WETH et al.** Numerical Inductor Optimization. *Trans. Magn. Soc. Japan*, 2002, vol. 2 (5), 361-366 [0011]