



(12) **DEMANDE DE BREVET EUROPEEN**

(43) Date de publication:
19.03.2008 Bulletin 2008/12

(51) Int Cl.:
H01F 21/08 (2006.01) **H01L 41/09** (2006.01)
H01F 41/12 (2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **07354048.6**

(22) Date de dépôt: **06.09.2007**

(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 YU

(30) Priorité: **12.09.2006 FR 0607966**

(71) Demandeurs:
• **Commissariat à l'Energie Atomique**
75015 Paris (FR)
• **STMicroelectronics S.A.**
92120 Montrouge (FR)
• **Centre National de la Recherche Scientifique**
75794 Paris Cedex 16 (FR)

(72) Inventeurs:
• **Orlando, Bastien**
13170, Les Pennes Mirabeau (FR)
• **Viala, Bernard**
38360 Sassenage (FR)
• **Hentz, Sebastien**
38000 Grenoble (FR)

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

(54) **Dispositif magnétique intégré contrôlé piézoélectriquement**

(57) Le dispositif magnétique (1) selon l'invention est intégré sur un substrat et comporte au moins un élément en matériau piézoélectrique, associé à des électrodes (11a, 11b) d'actionnement, et au moins un élément magnétique (8), apte à se déformer sous la sollicitation de l'élément en matériau piézoélectrique. Le dispositif (1) a la forme d'une poutre (7), mobile par rapport au substrat et comporte, selon un axe longitudinal (A1) de référence,

deux parties transversales (9), de largeur (W1) prédéterminée. L'élément en matériau piézoélectrique est constitué par au moins une partie d'une partie transversale (9) et chaque partie transversale (9) comporte une zone d'ancrage mécanique sur le substrat. Les parties transversales (9) sont reliées par au moins une branche centrale (10), de largeur (W2) prédéterminée, sur laquelle est disposé l'élément magnétique (8).

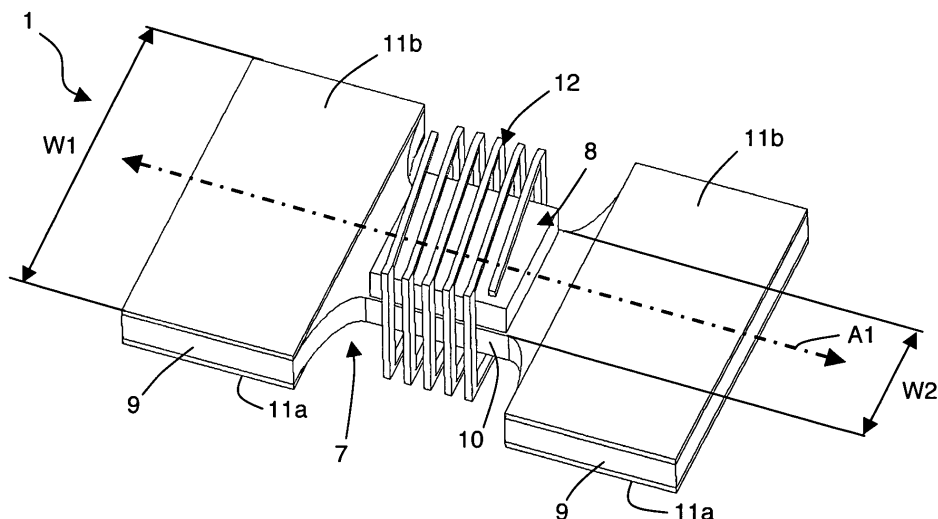


FIG. 3

Description

Domaine technique de l'invention

[0001] L'invention concerne un dispositif magnétique à réponse variable intégré sur un substrat et comportant au moins un élément en matériau piézoélectrique, associé à des électrodes d'actionnement, et au moins un élément magnétique, apte à se déformer sous la sollicitation de l'élément en matériau piézoélectrique.

[0002] L'invention s'applique notamment à des inductances variables, des éléments de ligne de transmission, tels que des résonateurs, des déphaseurs ou des coupleurs, ou encore des oscillateurs de spin.

État de la technique

[0003] Il existe plusieurs types d'inductances variables intégrées, ou semi-intégrées, réalisées intégralement ou en partie par des techniques de fabrication intégrées, issues de la microélectronique et permettant des variations continues et réversibles d'inductance. Cependant, les différents types de composants réalisés jusque-là présentent de nombreux inconvénients, notamment une trop faible variation d'inductance, une instabilité en fonction de la fréquence, un mode d'actionnement onéreux en termes énergétiques, etc.

[0004] Un composant passif intégré classique, avec variation d'inductance, est généralement composé d'un bobinage en une ou plusieurs parties, possédant dans la plupart des cas une très forte conductivité, et éventuellement d'une ou plusieurs pièces magnétiques, appelées « noyaux magnétiques », possédant dans la plupart des cas une forte perméabilité relative (typiquement $\mu_R > 100$). Il existe trois grands principes connus, utilisables pour la variation d'inductance.

[0005] Le premier principe consiste à jouer sur les inductances mutuelles à l'intérieur du bobinage en modifiant sa géométrie, comme décrit notamment dans le brevet US 6 184 755 et dans l'article « Self-Assembling MEMS Variable and Fixed RF Inductors » de Lubecke et al. (IEEE Trans. Mic. Th. and Tech. vol. 49 n°11, 2001). Il est possible également de jouer sur le couplage avec un bobinage secondaire ou avec une tout autre pièce conductrice. Ce principe est le plus simple à mettre en oeuvre dans les dispositifs intégrés, mais il ne permet que de faibles variations d'inductance.

[0006] Le deuxième principe consiste à jouer sur le couplage entre le bobinage et l'élément magnétique en modifiant leur distance relative, comme décrit notamment dans l'article « Microassembled Tunable MEMS Inductor » de Sarkar et al. (IEEE MEMS 2005). Ce principe permet de fortes variations d'inductance, mais pose le problème de l'actionnement, car il nécessite des mouvements de grande amplitude dans le plan du substrat sur lequel est réalisé le composant (typiquement de l'ordre de $10\mu\text{m}$).

[0007] Le troisième principe consiste à jouer sur la per-

méabilité du matériau magnétique lui-même. Plusieurs dispositifs connus (essentiellement des composants discrets) utilisent l'application d'un champ magnétique, afin de faire varier la perméabilité, comme décrit notamment dans l'article « Integrated Tunable Magnetic RF Inductor » de Vroubel et al. (IEEE Elec. Dev. Letter vol. 25 n°12, 2004). Cependant, l'application d'un champ magnétique nécessite l'utilisation en continu de courants, ce qui induit une forte consommation énergétique.

[0008] Il existe un autre moyen qui consiste à utiliser la variation de la perméabilité magnétique du matériau en fonction des contraintes mécaniques qui lui sont appliquées, comme décrit notamment dans l'article « Processing and application of magnetoelastic thin films in high-frequency devices » de Frommberger et al. (Microelectronics Engineering 67-68 2003) et dans l'article « High-Frequency Magnetoelastic Multilayer Thin Films and Applications » de Ludwig et al. (IEEE Trans. Mag. Vol. 39 n°5, 2003). Cette propriété est due au couplage magnétomécanique présent dans tous les matériaux magnétiques à diverses échelles et connu sous le nom de magnétoélasticité.

[0009] De manière connue en magnétoélasticité, il est essentiel de maîtriser l'amplitude et la direction des contraintes appliquées dans une couche en matériau magnétique uniaxial. En effet, les contraintes ont une grande influence sur le comportement dynamique du matériau magnétique. Si les contraintes sont trop inhomogènes ou ne sont pas appliquées selon des directions dans le plan du substrat à 0° ou à 90° de l'axe d'anisotropie du matériau magnétique, il devient très difficile de prévoir les propriétés magnétiques en fonction des contraintes appliquées. La variation de perméabilité et le comportement dynamique de la couche magnétique ne sont alors plus maîtrisables.

[0010] Par ailleurs, il est nécessaire de déterminer le mode d'actionnement de l'inductance. Les matériaux piézoélectriques sont généralement utilisés, grâce à leur possibilité d'intégration et leur faible consommation énergétique. Des dispositifs combinant des couches piézoélectriques et des couches magnétoélastiques, sous la forme d'empilements ou d'hétérostructures, ont déjà été étudiés et envisagés pour la réalisation de résonateurs ou de capteurs ou d'inductances variables, comme décrit par exemple dans l'article « A New Hybrid Device using Magnetostrictive Amorphous Films and Piezoelectric Substrates » de Arai et al. (IEEE Trans. Mag. Vol. 30 n°2, 1994).

[0011] Comme représenté schématiquement sur la figure 1, l'article ci-dessus décrit un dispositif 1 comportant un substrat 2 en matériau piézoélectrique, recouvert partiellement sur le dessus et sur le dessous par deux électrodes 3, 4, respectivement supérieure et inférieure, l'électrode supérieure 3 étant réalisée en un matériau magnétique. Une tension appliquée entre les électrodes 3, 4 entraîne alors l'application de contraintes piézoélectriques σ dans le substrat 2, qui sont alors transmises au matériau magnétique, entraînant ainsi une variation de

ses propriétés magnétiques.

[0012] L'article « Magnetolectric Properties of a Heterostructure of Magnetostrictive and Piezoelectric Composites » de Wan et al. (IEEE Trans. Mag. Vol. 40 n°4, 2004) décrit également un autre exemple de dispositif combinant l'utilisation de matériaux piézoélectriques et de matériaux magnétoélastiques. Comme représenté schématiquement sur la figure 2, le dispositif 1 peut être composé par une hétérostructure comportant une portion 5 en matériau magnétostrictif, avec un champ magnétique M parallèle, et une portion 6 en matériau piézoélectrique, avec un champ électrique E, perpendiculaire au champ magnétique M.

[0013] Les dispositifs décrits ci-dessus ne sont pas intégrés, mais sont réalisés dans des substrats piézoélectriques massifs. Par ailleurs, les contraintes mécaniques ne sont pas maîtrisées, car le matériau piézoélectrique applique des contraintes dans toutes les directions du plan. Par conséquent, la variation d'inductance est difficilement maîtrisable et les propriétés électromagnétiques aux hautes fréquences sont médiocres.

[0014] Par ailleurs, le document WO 2005/064590 décrit un dispositif magnétique comportant sur un substrat un empilement d'une couche piézoélectrique entièrement solidaire du substrat et de moyens de génération d'une onde acoustique de surface, situés sur la couche piézoélectrique de part et d'autre d'un élément ferromagnétique. La couche piézoélectrique est destinée à participer à la génération de l'onde de surface et assurer sa propagation jusqu'à l'élément ferromagnétique.

[0015] Le document WO 2005/064783 décrit différentes structures possibles pour un oscillateur de spin. La première structure comporte sur un substrat une couche piézoélectrique solidaire dudit substrat et en contact avec la couche ferromagnétique libre de l'oscillateur. La structure ci-dessus comporte des moyens d'actionnement situés de part et d'autre de la couche ferromagnétique. L'application d'un champ électrique provoque une déformation au niveau de la couche piézoélectrique, transmis dans la couche ferromagnétique. Il en résulte une variation des propriétés magnétoélastiques de la couche ferromagnétique et donc une modification de la fréquence de l'oscillateur et de son facteur de qualité.

[0016] Une deuxième structure comporte une couche piézoélectrique localement suspendue par rapport au substrat et en contact avec la couche libre de l'oscillateur. À la différence de la première structure, l'effet piézoélectrique n'est pas utilisé, à savoir la déformation de la membrane suspendue est assurée par effet électrostatique (ou capacitif), par l'intermédiaire du caractère diélectrique de la couche piézoélectrique.

[0017] Une troisième structure comporte une couche piézoélectrique également suspendue, mais à distance de la couche libre de l'oscillateur. La structure suspendue comporte un autre élément magnétique et sert uniquement à modifier le couplage magnétostatique entre les deux éléments magnétiques.

[0018] Pour toutes les structures décrites ci-dessus,

aucun contrôle de la direction des contraintes induites au niveau du matériau ferromagnétique n'est réalisé et les structures suspendues décrites ne servent pas du tout à contrôler ces contraintes.

Objet de l'invention

[0019] L'invention a pour but de remédier à l'ensemble des inconvénients précités et a pour objet la réalisation d'un dispositif magnétique intégré à réponse variable, autorisant de fortes variations de réponse, et qui permet un bon contrôle de ces variations, même pour des hautes fréquences, en maîtrisant les contraintes mécaniques imposées sur le matériau magnétique, afin notamment d'appliquer dans le matériau magnétique uniaxial une contrainte uniaxiale, homogène et de grande amplitude.

[0020] L'objet de l'invention est caractérisé en ce que le dispositif a la forme d'une poutre, mobile par rapport au substrat et comportant, selon un axe longitudinal de référence, deux parties transversales, de largeur prédéterminée, et en ce que :

- l'élément en matériau piézoélectrique est constitué par au moins une partie d'une partie transversale,
- chaque partie transversale comporte une zone d'ancrage mécanique sur le substrat,
- et les parties transversales sont reliées par au moins une branche centrale, de largeur prédéterminée, sur laquelle est disposé l'élément magnétique.

Description sommaire des dessins

[0021] 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 schématiquement un mode particulier de réalisation d'un dispositif magnétique selon l'art antérieur, avec une structure multicouche.

La figure 2 représente schématiquement un autre mode particulier de réalisation d'un dispositif magnétique selon l'art antérieur, composé par une hétérostructure.

La figure 3 représente un mode particulier de réalisation d'un dispositif magnétique intégré à réponse variable selon l'invention.

Les figures 4 à 6 représentent schématiquement des variantes de réalisation d'un dispositif magnétique selon la figure 3.

La figure 7 est une vue de dessus de la poutre du dispositif magnétique selon la figure 3.

Les figures 8 à 10 sont des vues de dessus de la poutre de variantes de réalisation du dispositif magnétique selon la figure 7.

Les figures 11 à 13 sont des vues de dessus de variantes de réalisation d'un dispositif magnétique selon la figure 3, représentant uniquement la poutre et l'élément magnétique.

La figure 14 représente schématiquement une vue en perspective d'une autre variante de réalisation d'un dispositif magnétique selon l'invention.

Les figures 15 à 20 représentent des vues de face en coupe (figures 15, 16, 18, 19) et des vues de dessus (figures 17, 20) de différentes étapes d'un mode particulier de réalisation d'un procédé de fabrication d'un dispositif magnétique selon l'invention.

La figure 21 représente schématiquement une vue en perspective d'une autre variante de réalisation d'un dispositif magnétique selon l'invention.

La figure 22 représente très schématiquement une vue de dessus d'une poutre d'une autre variante de réalisation d'un dispositif magnétique selon l'invention.

La figure 23 représente très schématiquement une vue de face d'une poutre d'une autre variante de réalisation d'un dispositif magnétique selon l'invention.

Description de modes particuliers de réalisation

[0022] En référence aux figures, le dispositif magnétique intégré à réponse variable selon l'invention va être décrit à titre non limitatif comme une inductance variable. Toutefois, le dispositif selon l'invention concerne également d'autres types de dispositifs magnétiques, à savoir des éléments d'antennes, de filtres ou de déphaseurs, des oscillateurs de spin, etc.

[0023] En référence aux figures, le dispositif magnétique intégré à réponse variable est une inductance variable 1 intégrée sur un substrat pouvant s'appliquer à tous les domaines requérant une variation continue (ou discrète) et réversible d'inductance ou d'impédance avec une faible puissance d'actionnement.

[0024] Dans le mode particulier de réalisation représenté sur la figure 3, l'inductance variable 1 a la forme d'une poutre 7 en matériau piézoélectrique, destinée à générer des contraintes mécaniques dans un élément magnétique 8, en matériau magnétique, ayant une perméabilité variant en fonction des contraintes qui lui sont appliquées. La poutre 7 a sensiblement la forme d'une éprouvette de traction et comporte, selon un axe longitudinal de référence A1 (figure 3), deux parties transversales 9, de largeur W1 prédéterminée, et une branche centrale 10, de largeur W2 prédéterminée, avantageusement inférieure à la largeur W1 des parties transversales 9, sur laquelle est disposé l'élément magnétique 8.

[0025] La poutre 7 est ancrée dans un substrat (non représenté sur les figures 1 à 14 et 21 à 23 pour des raisons de clarté), sur lequel est formée l'inductance variable 1, de préférence au niveau de zones d'ancrage mécanique 16 (figure 7), avantageusement situées aux

extrémités des parties transversales 9. La poutre 7 est ainsi libre de mouvement vis-à-vis du substrat, hors de ses zones d'ancrage 16, pour permettre une amplitude maximale de déformation.

[0026] Le profil de la poutre 7 en matériau piézoélectrique a été choisi et optimisé pour générer des contraintes uniaxiales et homogènes dans l'élément magnétique 8 associé.

[0027] Sur la figure 3, l'inductance variable 1 comporte des électrodes d'actionnement 11 a, 11 b, placées de part et d'autre de la poutre 7, coopérant avec la poutre 7 en matériau piézoélectrique et générant la tension d'actionnement nécessaire à l'application des contraintes mécaniques dans l'élément magnétique 8. Suivant la tension appliquée entre les électrodes 11 a et 11 b, à savoir positive ou négative, des contraintes de compression ou de traction sont générées dans l'élément magnétique 8.

[0028] L'élément magnétique 8 est, de préférence, en un matériau magnétique uniaxial composé d'un alliage à base de fer et/ou de cobalt et/ou de nickel, par exemple déposé sous champ magnétique pour favoriser l'anisotropie du matériau. Avantagusement, la direction d'anisotropie est sensiblement parallèle ou perpendiculaire à l'axe longitudinal de référence A1 de la poutre 7.

[0029] Sur la figure 3, l'inductance 1 comporte des électrodes inférieures 11a et des électrodes supérieures 11 b s'étendant, de préférence, sur la majeure partie de la surface des parties transversales 9, respectivement au-dessous et au-dessus. Dans une variante de réalisation non représentée, une seule partie transversale 9 peut comporter des électrodes d'actionnement, la partie transversale 9 n'en comportant pas sert alors essentiellement pour l'ancrage de la poutre 7 dans le substrat (figure 21).

[0030] L'inductance variable 1 comporte, de préférence, un bobinage 12 de type solénoïde, entourant la branche centrale 10 et l'élément magnétique 8 associé. Le bobinage 12 joue le rôle d'un élément électriquement conducteur, destiné à créer un champ magnétique autour de l'élément magnétique 8, avec une valeur d'inductance variant en fonction de la tension appliquée par les électrodes 11 sur la poutre 7.

[0031] Dans les variantes de réalisation de l'inductance variable 1, représentées sur les figures 4, 5 et 6, le bobinage 12 peut être remplacé par d'autres éléments électriquement conducteurs. Sur la figure 4, l'élément électriquement conducteur est un fil en forme de méandres 13, comportant une pluralité de branches parallèles successives, disposées à proximité de l'élément magnétique 8. Les méandres 13 sont disposés, de préférence, sous la branche centrale 10 de la poutre 7.

[0032] Sur la figure 5, l'élément électriquement conducteur est un fil en forme de lignes 14, disposé à proximité de l'élément magnétique 8, de préférence sous la branche centrale 10 de la poutre 7 supportant l'élément magnétique 8. Le fil en forme de lignes 14 comporte, par exemple, deux premières lignes parallèles, perpendiculaires à la branche centrale 10 de la poutre 7 et reliées

par une troisième ligne s'étendant le long de l'élément magnétique 8, sous la branche centrale 10.

[0033] Sur la figure 6, l'élément électriquement conducteur est un fil en forme de spirale 15, s'étendant à proximité de l'élément magnétique 8, de préférence sous la branche centrale 10 de la poutre 7 supportant l'élément magnétique 8.

[0034] Sur la figure 7, uniquement la poutre 7 en matériau piézoélectrique est représentée. Les parties transversales 9 de la poutre 7 comportent chacune une zone d'ancrage 16, de longueur L1 et de largeur W1, définissant l'extrémité des zones transversales 9 opposée à la branche centrale 10, assurant un ancrage et une liaison mécanique forte avec le substrat (non représenté sur la figure 7 pour des raisons de clarté), sur lequel est réalisée l'inductance variable 1. La zone restante 17 des parties transversales 9, de longueur L2 et de largeur W1, assure alors l'essentiel de la génération des contraintes de la poutre 7.

[0035] Chaque partie transversale 9 de la poutre 7 est prolongée par une zone de transition 18 facultative, de longueur L3 et de section variable, s'étendant des zones 17 des parties transversales 9 jusqu'à la branche centrale 10 de la poutre 7 et présentant, de préférence, un profil elliptique avantageusement tangent à la zone 17 des parties transversales 9 et à la branche centrale 10 de la poutre 7. La branche centrale 10, de longueur L4 et de largeur W2, définit une zone utile 19 de la poutre 7, correspondant à la zone de la poutre 7 en contact avec l'élément magnétique 8. Dans le cas de la présence des zones de transition 18, les électrodes supérieures 11 b et inférieures 11 a ne s'étendent pas, de préférence, au niveau des zones de transition 18 (figure 7).

[0036] Chaque zone de transition 18, avec un profil elliptique, permet notamment de répartir les contraintes de manière homogène, tout en assurant une compacité maximale de l'inductance variable 1. Par ailleurs, une telle poutre 7 encastrée uniquement à ses extrémités (zones d'ancrage 16) permet également d'appliquer de plus fortes contraintes, de mieux maîtriser ces contraintes et permet également de réduire les capacités parasites.

[0037] Dans les variantes de réalisation représentées sur les figures 8 et 9, les zones de transition 18 de la poutre 7 peuvent avoir un profil plus simple, par exemple rectangulaire (figure 8) ou trapézoïdal (figure 9). Dans une autre variante de réalisation non représentée, le profil des zones de transition 18 peut être elliptique et non tangent à la branche centrale 10 et aux parties transversales 9.

[0038] Dans la variante de réalisation représentée sur la figure 10, la poutre 7 de l'inductance variable 1 comporte une pluralité d'orifices 20, de préférence circulaires ou elliptiques, réalisés dans la zone 17 de génération de contraintes, adjacente à la zone d'ancrage 16, des parties transversales 9 de la poutre 7. De tels orifices 20 permettent notamment de faciliter le processus de libération de la poutre 7, lors de la fabrication de l'inductance

variable 1, comme décrit ci-dessous.

[0039] Dans une autre variante de réalisation non représentée, des orifices peuvent également être réalisés dans les zones de transition 18 de la poutre 7, en complément des orifices 20 réalisés dans les zones 17 de génération de contraintes ou en remplacement de ceux-ci.

[0040] Dans d'autres variantes de réalisation non représentées, les parties transversales 9 peuvent être sous la forme de bandes de matériau parallèles et espacées de façon régulière, reliées à la branche centrale 10 et aux zones d'ancrage 16. De même, la branche centrale 10 peut également être formée de bandes de matériau parallèles, reliées aux parties transversales 9.

[0041] Dans les modes particuliers de réalisation représentés sur les figures 11 à 13, uniquement la poutre 7 en matériau piézoélectrique et l'élément magnétique 8 associé, disposé sur la branche centrale 10 de la poutre 7, sont représentés. Sur la figure 11, l'élément magnétique 8 a une section de forme rectangulaire ou carrée. Sur la figure 12, l'élément magnétique 8 a une section de forme ellipsoïdale. Sur la figure 13, l'élément magnétique 8 se compose d'une pluralité d'éléments élémentaires disjoints, de préférence de forme rectangulaire ou ellipsoïdale, disposés de préférence côte à côte sur la branche centrale 10 de la poutre 7 et, de préférence, régulièrement.

[0042] D'une façon générale, dans le cas de l'utilisation d'un matériau magnétique uniaxial pour l'élément magnétique 8, l'axe d'anisotropie du matériau doit être parallèle ou perpendiculaire à l'axe longitudinal de référence A1 de la poutre 7 en matériau piézoélectrique (figure 11).

[0043] À titre d'exemple, pour une inductance variable 1 avec une poutre 7 comme décrit précédemment, un élément magnétique 8 de forme parallélépipédique et un bobinage 12 de type solénoïde, le nombre de spires est, par exemple, compris entre 3 et 20. La largeur de l'élément magnétique 8 est de l'ordre de 50 à 300 μm , l'épaisseur de l'élément magnétique 8 est de l'ordre de 100 nm à 2 μm et la longueur de l'élément magnétique 8 est de l'ordre de 50 à 300 μm .

[0044] En considérant les exemples de valeurs ci-dessus, les propriétés électromagnétiques de la bobine 12 (inductance, résistance, capacités, facteur de qualité, etc.) peuvent être calculées de manière fine par l'intermédiaire, par exemple, d'un logiciel de simulation par éléments finis, tel que le logiciel « HFSS » d'Ansoft. Par ailleurs, les électrodes inférieures 11 a et supérieures 11 b doivent être aussi fines que le permet le procédé de réalisation utilisé, par exemple de l'ordre de 50 nm à 1 μm .

[0045] L'épaisseur de la poutre 7 est, par exemple, de l'ordre de 100 nm à 2 μm . De façon générale, l'épaisseur de la poutre 7 en matériau piézoélectrique est un compromis entre la tension d'actionnement, qui baisse avec l'épaisseur, et la transmission de la contrainte à l'élément magnétique 8, qui se dégrade si la poutre 7 est trop fine.

[0046] À titre d'exemple, sur la figure 7, la branche

centrale 10 de la poutre 7, constituant la zone utile 19 de la poutre 7, est, de préférence, à peine plus grande que l'élément magnétique 8, avec une marge de réalisation de l'ordre de $10\mu\text{m}$, pour obtenir une amplitude de déformation maximale. Les dimensions de l'élément magnétique 8 fixent donc les dimensions correspondantes W2 et L4 de la branche centrale 10. La longueur L1 de la zone d'ancrage 16 peut alors être aussi petite que le permet la tenue mécanique de l'ancrage (dépendant notamment du procédé de fabrication utilisé).

[0047] Pour dimensionner les longueurs L2 et L3, respectivement de la zone 17 et de la zone de transition 18 des parties transversales 9, ainsi que la largeur W1 des parties transversales 9, un logiciel de simulation par éléments finis peut être utilisé, tel que le logiciel « ANSYS ». De façon générale, une augmentation de la longueur L2 et de la largeur W1 tend à augmenter l'intensité des contraintes appliquées sur la zone utile 19 au détriment de l'encombrement, tandis qu'une augmentation de la longueur L3, qui est typiquement de l'ordre de $50\mu\text{m}$ à $300\mu\text{m}$, améliore le caractère uniaxial et homogène des contraintes.

[0048] D'une manière générale, la tension maximale appliquée doit générer des contraintes inférieures au seuil de plasticité des matériaux utilisés pour la poutre 7 en matériau piézoélectrique, l'élément magnétique 8 ou les électrodes d'actionnement 11. De même, dans le cas de l'application d'une contrainte en compression, la tension appliquée ne doit pas entraîner le flambement de la poutre 7 en matériau piézoélectrique.

[0049] Sur la figure 14, la variante de réalisation de l'inductance variable 1 se distingue des modes de réalisation précédents par le nombre de branches centrales 10 de la poutre 7 en matériau piézoélectrique. L'inductance 1 comporte toujours deux parties transversales 9, reliées par deux branches centrales 10, coopérant chacune avec un élément magnétique 8 et, par exemple, avec un bobinage 12 de type solénoïde. Les électrodes inférieures 11 a et supérieures 11 b recouvrent, de préférence, la totalité de la surface des parties transversales 9 et les branches centrales 10 sont reliées aux parties transversales 9 par des zones de transition 18, de préférence, avec des profils elliptiques. Les bobinages 12 peuvent être connectés en série ou en parallèle.

[0050] L'utilisation d'une telle inductance 1 incluant plusieurs bobines 12 et plusieurs éléments magnétiques 8, gouvernés par le même dispositif d'actionnement, à savoir la même poutre 7 en matériau piézoélectrique, permet notamment de réduire l'encombrement total de l'inductance variable 1 et d'accroître la densité d'inductance totale.

[0051] Dans d'autres variantes de réalisation non représentées, les deux branches centrales 10 de la poutre 7 peuvent être associées à d'autres types d'éléments électriquement conducteurs, comme représentés sur les figures 4 à 6, et/ou à d'autres formes d'éléments magnétiques 8, comme représentés sur les figures 11 à 13, et/ou à d'autres profils de zones de transition 18, comme

représentés sur les figures 7 à 10.

[0052] Un procédé de fabrication d'une inductance variable intégrée 1 va être décrit plus en détail au regard des figures 15 à 20. Dans la description qui va suivre, le procédé de fabrication est destiné à la réalisation d'une inductance 1 avec une poutre profilée, comme décrit ci-dessus, comportant un bobinage 12 de type solénoïde (figure 3). Dans ce cas, la poutre 7 en matériau piézoélectrique est alors solidaire du substrat sur lequel est réalisée l'inductance, par l'intermédiaire d'extrémités latérales 23 réalisées avantageusement avec les mêmes couches de matériau que le bobinage 12, comme décrit ci-dessous et illustrées sur les figures 15 à 20.

[0053] Sur la figure 15, le procédé de fabrication comporte d'abord la formation sur un substrat 21, par exemple par électrolyse ou dépôt physique, d'une partie inférieure du bobinage 12, constituée d'un matériau à forte conductivité, par exemple en cuivre, en aluminium ou en or, puis l'encapsulation de ladite partie inférieure par une première couche sacrificielle 22, laissant affleurant les extrémités latérales 23. La couche sacrificielle 22 est, par exemple, en oxyde de silicium déposé par dépôt chimique (PECVD) ou en résine polymère. Une étape de planarisation mécanique ou mécano-chimique de la couche sacrificielle 22 peut également être réalisée.

[0054] En variante, les extrémités latérales 23 peuvent être déposées, par exemple, par électrolyse et peuvent être constituées d'un matériau différent de celui de la partie inférieure du bobinage 12. La partie de la couche sacrificielle 22 entourant les extrémités latérales 23 peut être de nature différente de la partie entourant le bobinage 12 adjacent au substrat 21.

[0055] Puis, le procédé comporte le dépôt d'un empilement d'une première couche 24 métallique et conductrice, destinée à former les électrodes inférieures 11a de l'inductance 1, d'une couche 25 en matériau piézoélectrique, destinée à former la poutre 7 de l'inductance 1, et d'une seconde couche 26 métallique et conductrice, destinée à former les électrodes supérieures 11 b de l'inductance 1 (figure 15).

[0056] À titre d'exemple, la couche 25 en matériau piézoélectrique est déposée par un procédé physique de déposition en phase vapeur (PVD) et les électrodes inférieures peuvent être en platine, pour une poutre en titanate de plomb (PZT) piézoélectrique, ou en molybdène, pour une poutre en nitrure d'aluminium (AlN) piézoélectrique. Les électrodes supérieures peuvent être de nature différente des électrodes inférieures, par exemple en or, en cuivre ou en tungstène, etc. Des couches complémentaires de protection (non représentées), par exemple en or ou en tungstène, peuvent être prévues, notamment pour faciliter la libération ultérieure de l'inductance.

[0057] Sur les figures 16 et 17, avant l'élimination de la couche sacrificielle 22, une étape de gravure de l'empilement des couches 24, 25, 26 est ensuite réalisée, pour délimiter la forme caractéristique de la poutre 7 de l'inductance 1. La structuration des couches 24, 25, 26

peut être réalisée par une méthode chimique, de type attaque humide, ou physico-chimique, de type gravure sèche (RIE), ou bien par usinage ionique. Comme représenté sur la figure 16, le bord de l'empilement des trois couches 24, 25, 26 formant la poutre 7 est alors associé aux extrémités latérales 23.

[0058] Puis, une couche 27 en matériau magnétique uniaxial (figure 16) est ensuite déposée et gravée, afin de former l'élément magnétique 8 placé sur la branche centrale 10 de la poutre 7 formée au préalable (figure 17). À titre d'exemple, l'élément magnétique 8 peut être réalisé par dépôt physique en phase vapeur (PVD) d'un matériau en alliage à base de fer et/ou nickel et/ou cobalt. La couche 27 peut également être formée par un empilement de différentes couches diélectriques et conductrices.

[0059] Sur la figure 17, la structuration des couches 24, 25, 26 par gravure permet ainsi d'obtenir la forme caractéristique de la poutre 7 avec deux parties transversales 9, perpendiculaires à l'axe de référence A1 de la poutre 7, et une branche centrale 10 sur laquelle est réalisé l'élément magnétique 8. Il ne reste alors plus qu'à fermer le bobinage 12, pour obtenir l'inductance 1 comme représentée sur la figure 20.

[0060] Sur les figures 18 à 20, une seconde couche sacrificielle 28, identique ou de nature différente par rapport à la première couche sacrificielle 22, est ensuite déposée sur la poutre 7 formée au préalable, afin de pouvoir former la partie supérieure du bobinage 12 (figure 18). Enfin, l'élimination des couches sacrificielles 22 et 28 permet de libérer la structure ainsi formée. L'inductance 1 est alors suspendue et ancrée sur le substrat 21, par l'intermédiaire des extrémités latérales 23, comme représenté sur la figure 19.

[0061] La formation de la partie supérieure du bobinage 12 peut être réalisé par gravure et reprise de contact à travers la couche sacrificielle 28, par une méthode chimique ou physico-chimique ou bien par usinage ionique. Le dépôt de la partie supérieure du bobinage 12 peut être réalisé par électrolyse et peut être réalisé à partir d'un matériau différent de celui de la partie inférieure du bobinage 12. La libération de la structure peut être réalisée par gravure sélective chimique, du type attaque humide, ou physico-chimique (du type RIE) des couches sacrificielles 22 et 28.

[0062] Sur la figure 20, illustrant en vue de dessus l'inductance 1 terminée, le procédé selon l'invention permet d'obtenir une inductance 1 encastrée à ses deux extrémités, avec un profil caractéristique permettant de placer l'élément magnétique et le bobinage sensiblement dans sa partie centrale, afin de concentrer les contraintes et les rendre le plus uniaxial et homogène possibles. Un tel procédé de fabrication utilise ainsi des techniques de fabrication issues de la microélectronique et adaptées pour les microsystèmes.

[0063] Une telle inductance variable 1 intégrée, selon les différents modes de réalisation décrits ci-dessus, permet donc d'appliquer une contrainte homogène et

uniaxiale - en tension ou en compression - sur l'élément magnétique et de maximiser la valeur de ces contraintes, pour une tension d'actionnement donnée, grâce notamment à la forme et au profil caractéristiques de sa poutre.

[0064] Par ailleurs, l'utilisation d'une poutre en matériau piézoélectrique libérée et encastrée à ses deux extrémités permet d'améliorer les propriétés mécaniques et électromagnétiques de l'inductance variable selon l'invention, de manière à obtenir de fortes variations réversibles d'inductance, continues ou discontinues, avec de faibles tensions d'actionnement, tout en préservant de bonnes propriétés fréquentielles, notamment en hautes fréquences.

[0065] L'invention n'est pas limitée aux différents modes de réalisation décrits ci-dessus. Les valeurs de largeurs et de longueurs des différentes zones de la poutre 7 sont non limitatives et dépendent notamment de la taille souhaitée de l'inductance variable 1 et de la valeur d'inductance recherchée. Les électrodes 11 peuvent s'étendre au-dessus des zones de transition 18 de la poutre 7 (figure 7). Dans la variante de réalisation représentée sur la figure 14, l'inductance 1 peut comporter plus de deux branches centrales 10, toutes associées à un élément magnétique 8 correspondant et à un élément électriquement conducteur correspondant, de préférence de type bobinage solénoïde.

[0066] Dans la variante de réalisation représentée sur la figure 21, la poutre 7 en matériau piézoélectrique comporte une première partie transversale 9 en matériau piézoélectrique, comme représentée sur la figure 7, coopérant avec les électrodes inférieures 11 a et supérieures 11 b, et une deuxième partie transversale 9, de longueur très inférieure, comportant uniquement la zone d'ancrage 16 de la poutre 7 au substrat. Le principe de fonctionnement de l'inductance 1 est le même, avec un bobinage 12 de type solénoïde et un élément magnétique 8, placé sur la branche centrale 10 de la poutre 7.

[0067] Dans une autre variante de réalisation représentée sur la figure 22, la largeur W1 des parties transversales 9 peut être inférieure à la largeur W3 des zones d'ancrage 16 correspondantes. Par ailleurs, la largeur W2 de la branche centrale 10, sur laquelle est placé l'élément magnétique 8, peut être supérieure à la largeur W1 des parties transversales 9. D'une manière générale, les largeurs W1, W2 et W3 des différentes zones de la poutre 7 ne sont pas liées entre elles et la poutre 7 peut prendre une tout autre forme complexe.

[0068] Dans une autre variante de réalisation non représentée, la poutre 7 en matériau piézoélectrique et l'élément magnétique 8 associé peuvent être encapsulés dans des couches 22 et 28 en matériau isolant et suffisamment mou, par exemple une résine polymère à faible constante diélectrique, pour permettre une déformation suffisante de la poutre 7 par rapport au substrat, sans avoir besoin de retirer les couches 22 et 28. La libération de la poutre 7 n'est alors plus nécessaire.

[0069] D'une manière générale, l'invention s'applique à tout dispositif magnétique à réponse variable en forme

de poutre 7 comportant un élément en matériau piézoélectrique. L'élément en matériau piézoélectrique peut être constitué par la poutre 7 complète ou uniquement par des parties de la poutre, à savoir une partie d'une partie transversale 9, une partie transversale 9 complète ou les deux parties transversales 9, la branche centrale 10 et les zones de transition 18 pouvant être alors réalisées en un autre matériau.

[0070] L'invention s'applique notamment à tout type de circuit électronique reconfigurable, pour lequel une limitation du nombre de composants est recherchée en utilisant des composants ajustables. Le principe utilisé pour faire varier la perméabilité dynamique, ainsi que son application pratique, ne sont pas limités en termes de valeurs d'inductance ou de fréquence de fonctionnement. L'invention s'applique donc à tous les domaines où une variation de perméabilité dynamique continue (ou discontinue) et réversible est nécessaire, avec un actionnement de très faible puissance, notamment les circuits multibandes reconfigurables, l'adaptation fine d'impédance et les oscillateurs accordables.

[0071] L'invention s'applique également à d'autres types de dispositifs magnétiques à réponse variable, en fonction de la manière dont l'élément magnétique 8 est associé à l'élément électriquement conducteur (le bobinage 12 par exemple). De manière générale, l'élément magnétique doit être mécaniquement solidaire de la poutre en matériau piézoélectrique, afin que les déformations de ladite poutre engendrent une variation des propriétés magnétiques de l'élément magnétique.

[0072] Ainsi, dans le cas où l'élément électriquement conducteur est placé à distance de l'élément magnétique, uniquement d'un côté de l'élément magnétique, par exemple dans le cas de l'élément en forme de méandres 13 (figure 4), en forme de lignes 14 (figure 5) ou en forme de spirale 15 (figure 6), ou de part et d'autre de l'élément magnétique 8, par exemple dans le cas de l'élément en forme de solénoïde 12 (figure 3), le dispositif magnétique est alors une inductance variable.

[0073] Dans le cas où l'élément électriquement conducteur n'est placé que d'un côté de l'élément magnétique, il est également possible de réaliser des éléments de ligne de transmission, tels que des résonateurs, des déphaseurs, des coupleurs, des antennes, des filtres, etc.

[0074] Sur la figure 23, dans le cas où un élément électriquement conducteur 29 est placé à la fois entre la branche centrale 10 de la poutre 7 et l'élément magnétique 8 et au-dessus de l'élément magnétique 8, de préférence au contact de part et d'autre de l'élément magnétique 8, il est alors possible de réaliser un oscillateur de spin 1.

Revendications

1. Dispositif magnétique à réponse variable (1) intégré sur un substrat (21) et comportant au moins un élément en matériau piézoélectrique, associé à des

électrodes (11) d'actionnement, et au moins un élément magnétique (8), apte à se déformer sous la sollicitation de l'élément en matériau piézoélectrique,

dispositif **caractérisé en ce qu'il** a la forme d'une poutre (7), mobile par rapport au substrat (21) et comportant, selon un axe longitudinal (A1) de référence, deux parties transversales (9), de largeur (W1) prédéterminée, et **en ce que** :

- l'élément en matériau piézoélectrique est constitué par au moins une partie d'une partie transversale (9),
- chaque partie transversale (9) comporte une zone d'ancrage (16) mécanique sur le substrat (21),
- et les parties transversales (9) sont reliées par au moins une branche centrale (10), de largeur (W2) prédéterminée, sur laquelle est disposé l'élément magnétique (8).

2. Dispositif selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** la largeur (W2) de la branche centrale (10) est inférieure à largeur (W1) des parties transversales (9).
3. Dispositif selon l'une des revendications 1 et 2, **caractérisé en ce que** les deux parties transversales (9) sont en matériau piézoélectrique.
4. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, **caractérisé en ce que** la branche centrale (10) est en matériau piézoélectrique.
5. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, **caractérisé en ce que** les électrodes (11 a, 11 b) d'actionnement s'étendent partiellement sur la surface des parties transversales (9) de la poutre (7).
6. Dispositif selon la revendication 5, **caractérisé en ce que** les électrodes d'actionnement (11 a, 11 b) sont situées de part et d'autre de l'élément en matériau piézoélectrique.
7. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, **caractérisé en ce que** chaque partie transversale (9) est prolongée par une zone de transition (18) s'étendant jusqu'à la branche centrale (10) correspondante.
8. Dispositif selon la revendication 7, **caractérisé en ce que** la zone de transition (18) est de section variable.
9. Dispositif selon la revendication 7, **caractérisé en ce que** la zone de transition (18) a un profil elliptique tangent à la partie transversale (9) et à la branche centrale (10) associées.

10. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 7 à 9, **caractérisé en ce que** la zone de transition (18) comporte une pluralité d'orifices.
11. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, **caractérisé en ce que** chaque partie transversale (9) comporte une pluralité d'orifices (20). 5
12. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 11, **caractérisé en ce que** l'élément magnétique (8) comporte un matériau magnétique uniaxial, ayant un axe d'anisotropie parallèle à l'axe de référence (A1) de la poutre (7). 10
13. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 12, **caractérisé en ce que** l'élément magnétique (8) comporte un matériau magnétique uniaxial, ayant un axe d'anisotropie perpendiculaire à l'axe de référence (A1) de la poutre (7). 15
14. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 13, **caractérisé en ce que** l'élément magnétique (8) a une section de forme sensiblement rectangulaire. 20
15. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 13, **caractérisé en ce que** l'élément magnétique (8) a une section de forme sensiblement ellipsoïdale. 25
16. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 15, **caractérisé en ce que** l'élément magnétique (8) se compose d'une pluralité d'éléments magnétiques élémentaires disjoints, disposés côte à côte sur la branche centrale (10) de la poutre (7). 30
17. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 16, **caractérisé en ce qu'il** comporte au moins un élément électriquement conducteur associé à l'élément magnétique (8). 35
18. Dispositif selon la revendication 17, **caractérisé en ce que** l'élément électriquement conducteur est un bobinage (12) du type solénoïde. 40
19. Dispositif selon la revendication 18, **caractérisé en ce que** le bobinage (12) entoure l'élément magnétique (8). 45
20. Dispositif selon la revendication 17, **caractérisé en ce que** l'élément électriquement conducteur est un fil en forme de méandres (13). 50
21. Dispositif selon la revendication 17, **caractérisé en ce que** l'élément électriquement conducteur est un fil en forme de lignes (14). 55
22. Dispositif selon la revendication 17, **caractérisé en ce que** l'élément électriquement conducteur est un fil en forme de spirale (15).
23. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 20 à 22, **caractérisé en ce que** l'élément électriquement conducteur est disposé à distance de l'élément magnétique (8).
24. Dispositif selon la revendication 23, **caractérisé en ce que** l'élément électriquement conducteur est disposé d'un seul côté de l'élément magnétique (8).
25. Dispositif selon la revendication 17, **caractérisé en ce que** l'élément électriquement conducteur (29) est placé de part et d'autre et au contact de l'élément magnétique (8).
26. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 25, **caractérisé en ce que** la poutre (7) est encapsulée dans un matériau isolant mou.

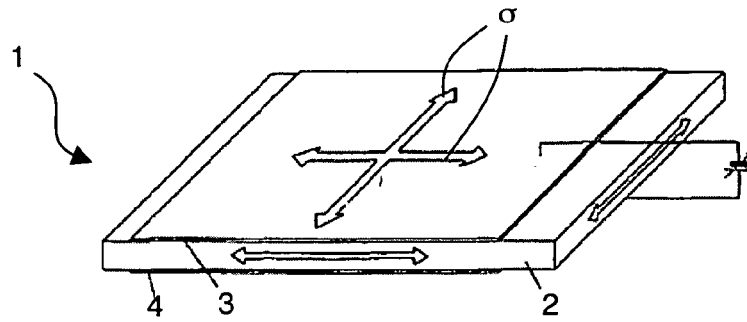


FIG. 1 (art antérieur)

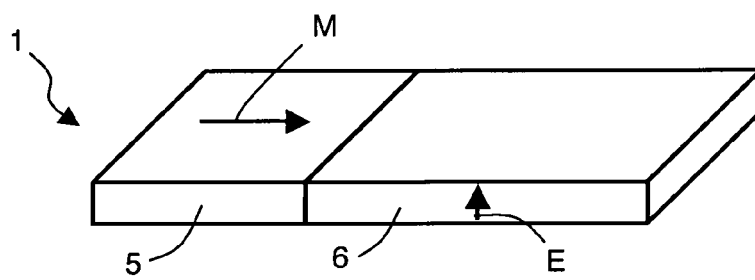


FIG. 2 (art antérieur)

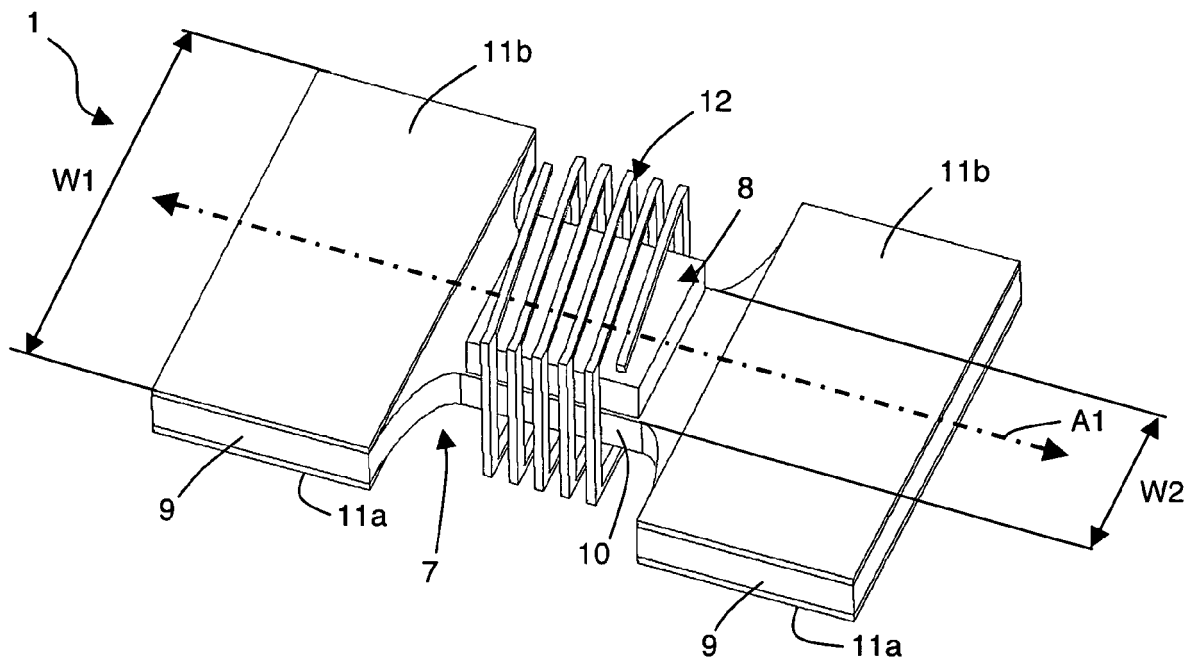


FIG. 3

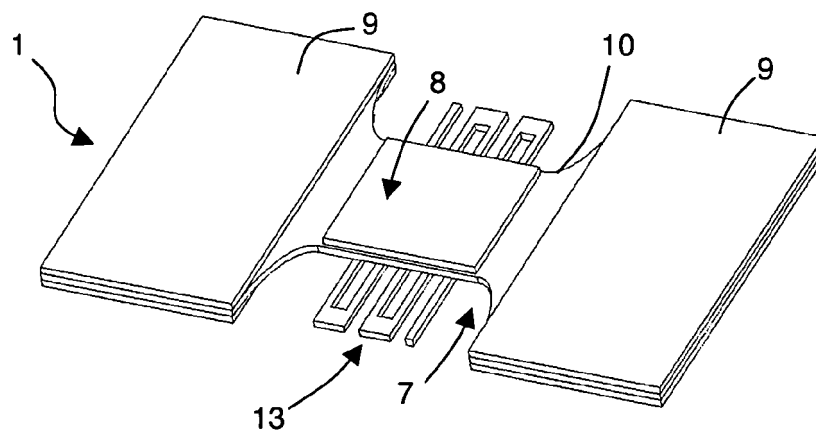


FIG. 4

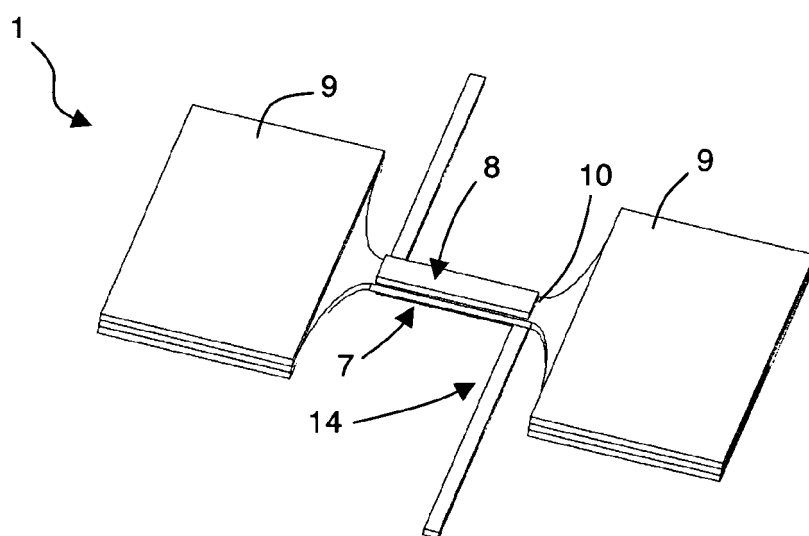


FIG. 5

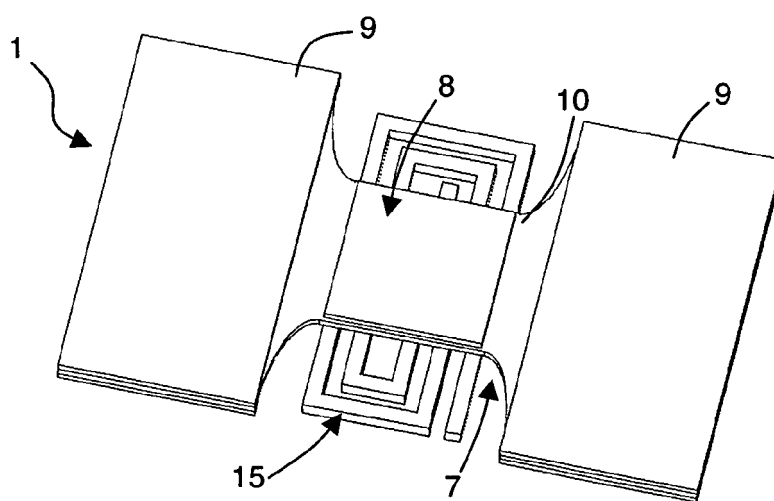


FIG. 6

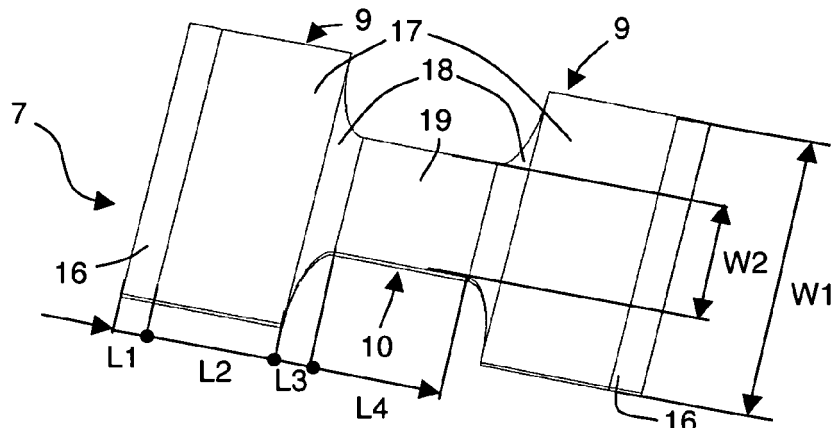


FIG. 7

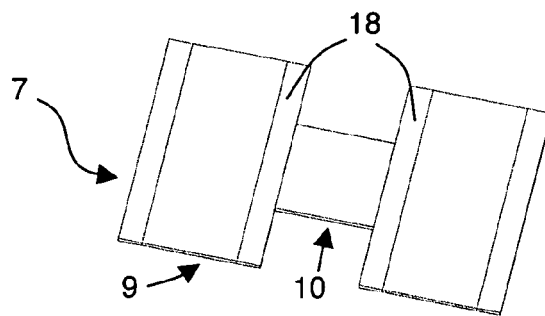


FIG. 8

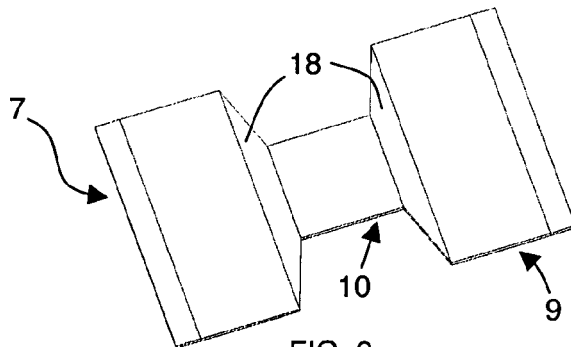


FIG. 9

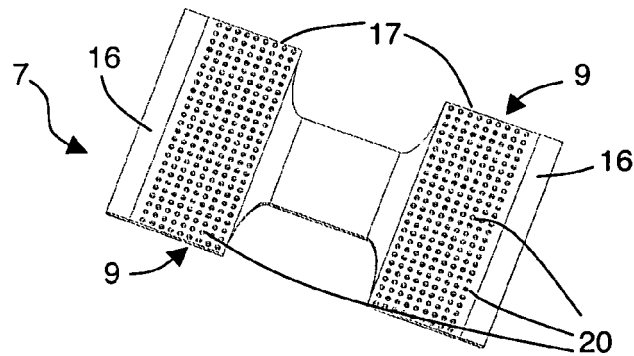


FIG. 10

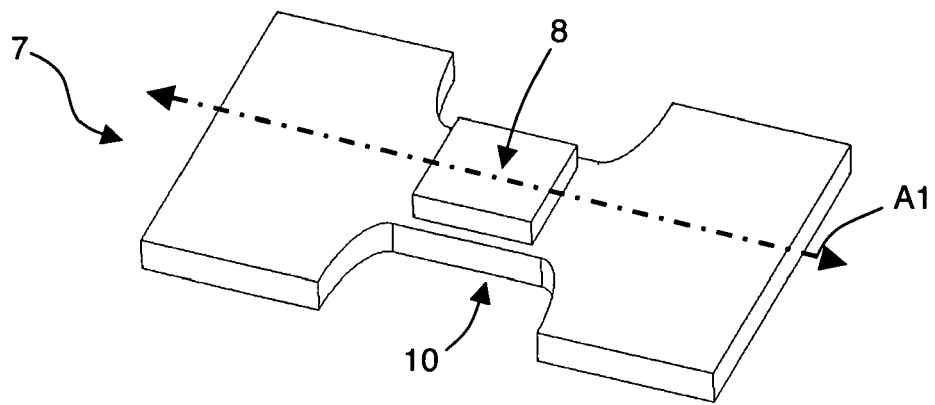


FIG. 11

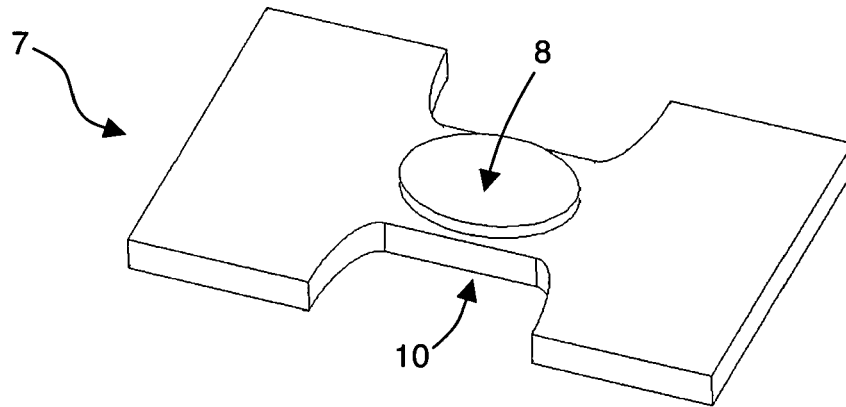


FIG. 12

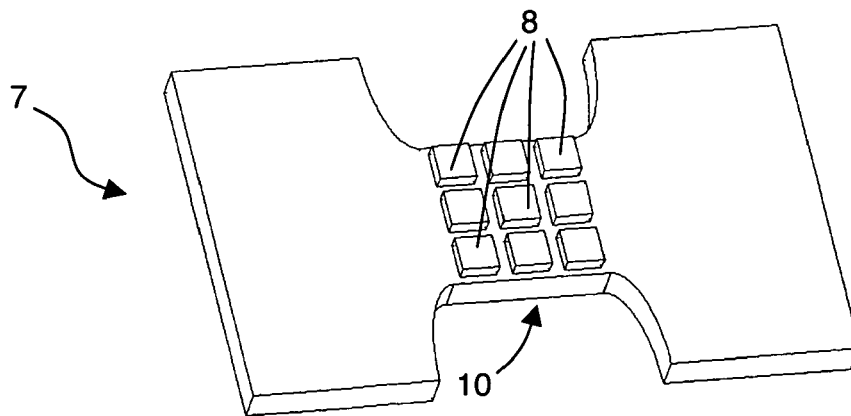


FIG. 13

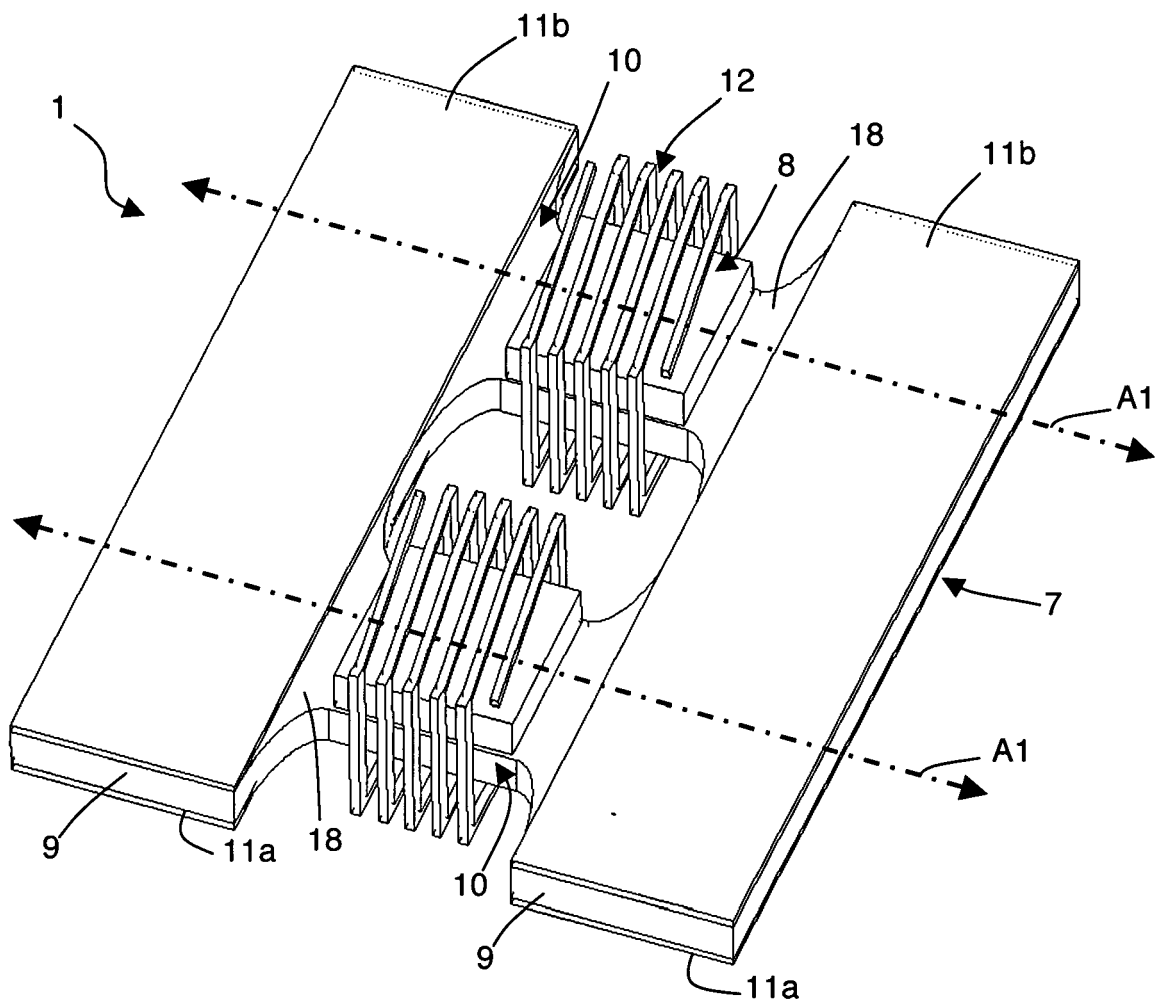


FIG. 14

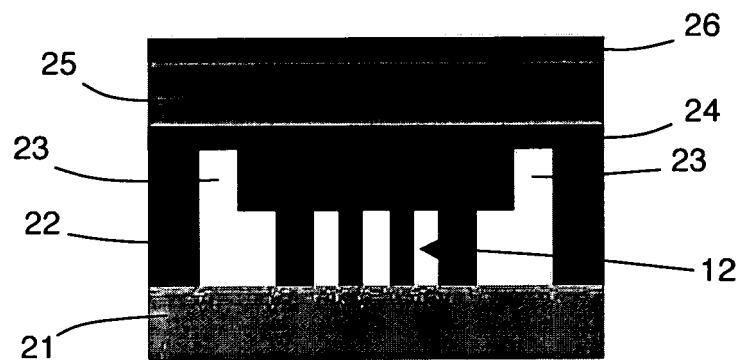


FIG. 15

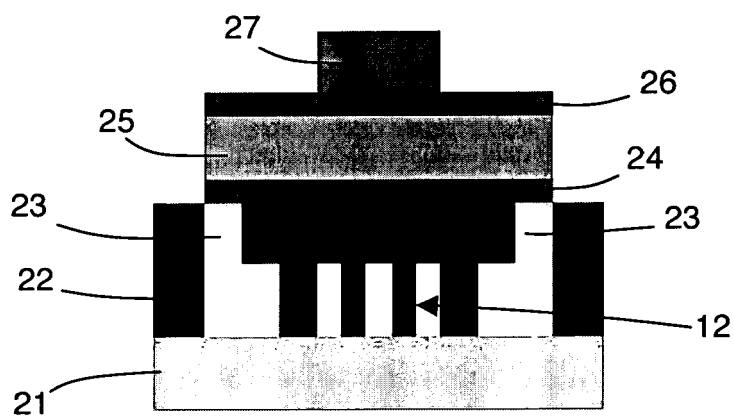


FIG. 16

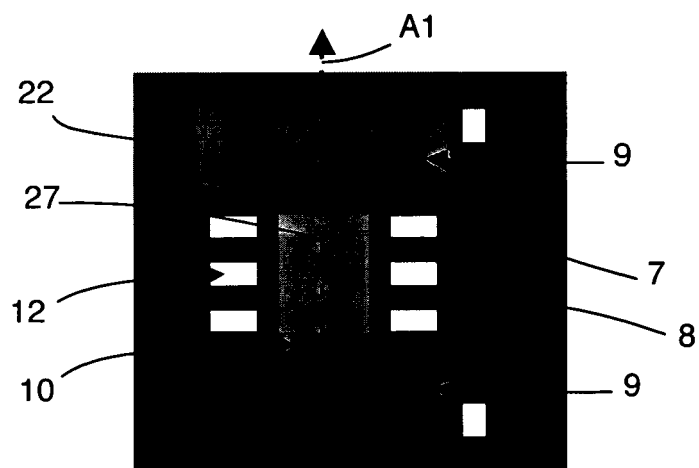


FIG. 17

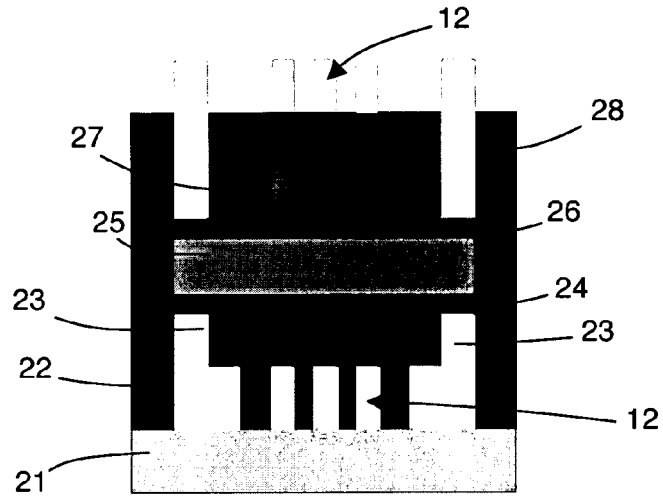


FIG. 18

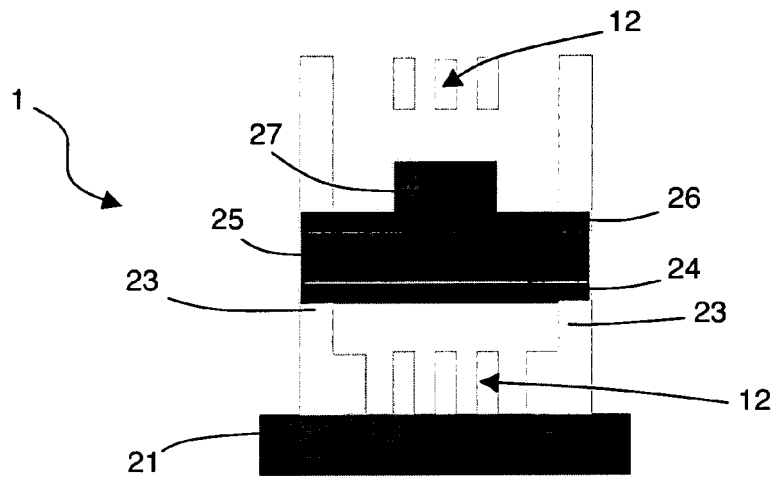


FIG. 19

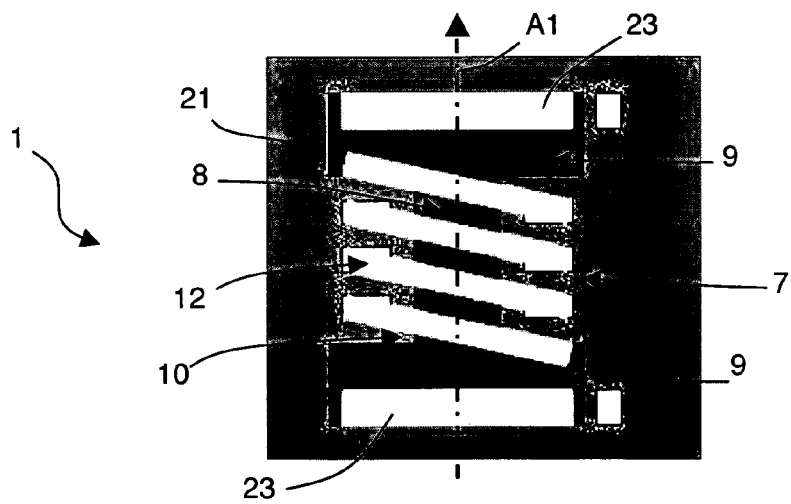


FIG. 20

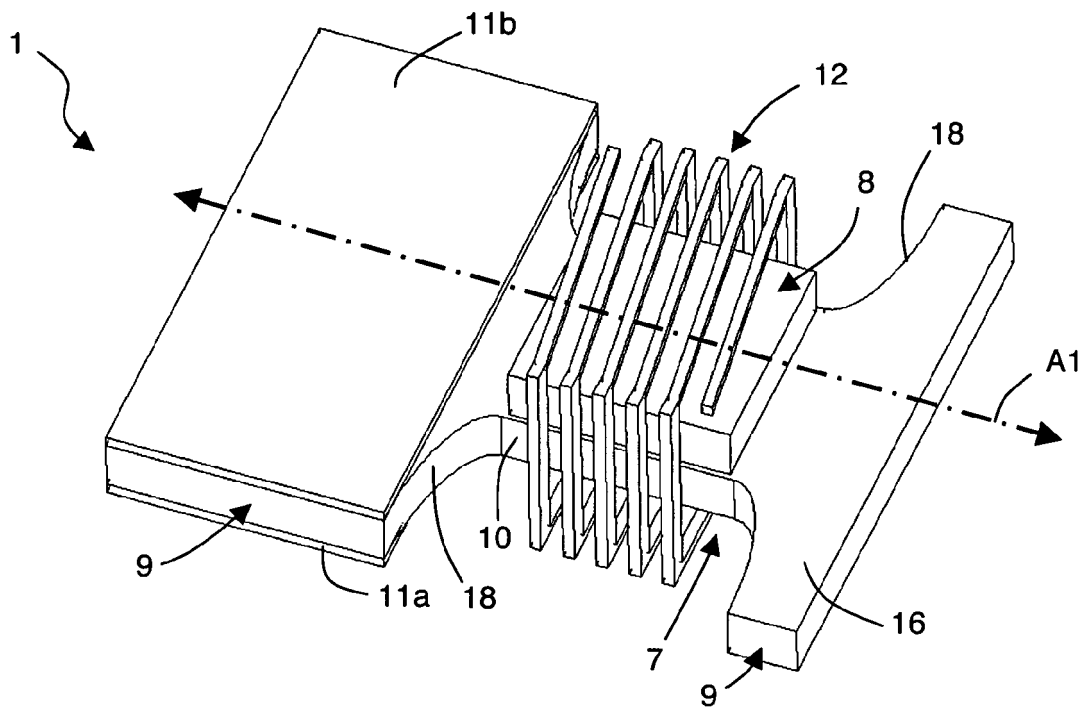


FIG. 21

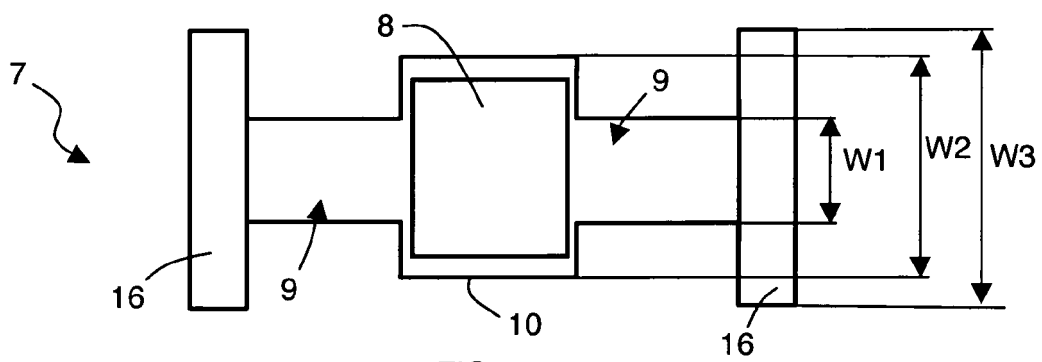


FIG. 22

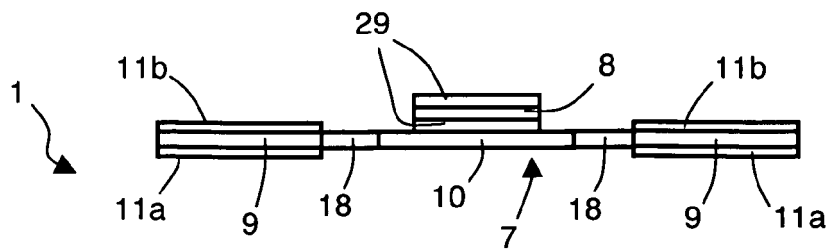


FIG. 23



Office européen
des brevets

RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande
EP 07 35 4048

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	JP 2000 296612 A (SEIKO EPSON CORP) 24 octobre 2000 (2000-10-24) * abrégé; figures 1,6,7 * -----	1,17-23	INV. H01F21/08 H01L41/09 H01F41/12
A	JP 11 040427 A (TOKIN CORP; ARAI KENICHI) 12 février 1999 (1999-02-12) * abrégé; figures 1,6,7 * * alinéa [0050] * -----	1,17	
A	JP 08 288143 A (MATSUSHITA ELECTRIC IND CO LTD) 1 novembre 1996 (1996-11-01) * abrégé; figures 1,2 * -& DATABASE WPI Week 199703 Derwent Publications Ltd., London, GB; AN 1997-026931 XP002429381 & JP 08 288143 A (MATSUSHITA DENKI SANGYO KK) 1 novembre 1996 (1996-11-01) * abrégé * -----	1,17,22	
A,D	ARAI K I ET AL: "A NEW HYBRID DEVICE USING MAGNETOSTRICTIVE AMORPHOUS FILMS AND PIEZOELECTRIC SUBSTRATES" IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, IEEE SERVICE CENTER, NEW YORK, NY, US, vol. 30, no. 2, PART 2, 1 mars 1994 (1994-03-01), pages 916-918, XP000461510 ISSN: 0018-9464 -----	1	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC) H01F H01L
A,D	WO 2005/064783 A2 (IMEC INTER UNI MICRO ELECTR [BE]; EYCKMANS WOUTER [BE]; LAGAE LIESBET) 14 juillet 2005 (2005-07-14) -----	25	
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche Munich		Date d'achèvement de la recherche 5 novembre 2007	Examineur Reder, Michael
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES 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		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	

5
EPO FORM 1503 (03.02) (P04C02)

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

EP 07 35 4048

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.

05-11-2007

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
JP 2000296612	A	24-10-2000	AUCUN	
JP 11040427	A	12-02-1999	JP 3825141 B2	20-09-2006
JP 8288143	A	01-11-1996	JP 3485280 B2	13-01-2004
WO 2005064783	A2	14-07-2005	WO 2005064590 A1	14-07-2005
			JP 2007517389 T	28-06-2007

EPO FORM P0480

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.

Documents brevets cités dans la description

- US 6184755 B [0005]
- WO 2005064590 A [0014]
- WO 2005064783 A [0015]

Littérature non-brevet citée dans la description

- **LUBECKE et al.** Self-Assembling MEMS Variable and Fixed RF Inductors. *IEEE Trans. Mic. Th. and Tech.*, 2001, vol. 49 (11 [0005])
- **SARKAR et al.** Microassembled Tunable MEMS Inductor. *IEEE MEMS*, 2005 [0006]
- **VROUBEL et al.** Integrated Tunable Magnetic RF Inductor. *IEEE Elec. Dev. Letter*, 2004, vol. 25 (12 [0007])
- **FROMMBERGER et al.** Processing and application of magnetoelastic thin films in high-frequency devices. *Microelectronics Engineering*, 2003, 67-68 [0008]
- **LUDWIG et al.** High-Frequency Magnetoelastic Multilayer Thin Films and Applications. *IEEE Trans. Mag.*, 2003, vol. 39 (5 [0008])
- **ARAI et al.** A New Hybrid Device using Magnetostrictive Amorphous Films and Piezoelectric Substrates. *IEEE Trans. Mag.*, 1994, vol. 30 (2 [0010])
- **WAN et al.** Magnetoelectric Properties of a Heterostructure of Magnetostrictive and Piezoelectric Composites. *IEEE Trans. Mag.*, 2004, vol. 40 (4 [0012])