

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
7 janvier 2010 (07.01.2010)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2010/001018 A1

(51) Classification internationale des brevets :
H01L 43/06 (2006.01) *G11C 11/02* (2006.01)
H01L 43/14 (2006.01) *G01R 33/07* (2006.01)
H01F 10/12 (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2009/051062

(22) Date de dépôt international :
5 juin 2009 (05.06.2009)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
0853811 9 juin 2008 (09.06.2008) FR

(71) Déposants (*pour tous les États désignés sauf US*) :
COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE [FR/FR]; 25, rue Leblanc, Bâtiment "Le Ponant D", F-75015 Paris (FR). **CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE** [FR/FR]; 3 rue Michel Ange, F-75016 Paris (FR).

(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants (*pour US seulement*) :
RODMACQ, Bernard [FR/FR]; 2 Montée Badoud, F-38113 Veurey Voroize (FR). **AUFFRET, Stephane** [FR/FR]; 354 Chemin des Chartreux, F-38410 Vaulnaveys Le Haut (FR). **DIENY, Bernard** [FR/FR]; 180 allée des Erables, F-38250 Lans En Vercors (FR). **NISTOR, Lavinia Elena** [RO/RO]; 1 rue Viorele, Bat. 6, app. 3, Hunedoara (RO).

(74) Mandataire : **VUILLERMOZ, Bruno**; Cabinet Laurent & Charras, Le Contemporain, 50 Chemin de la Bruyère, F-69574 Dardilly Cédex (FR).

(81) États désignés (*sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible*) : AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : THREE-LAYER MAGNETIC ELEMENT, METHOD FOR THE PRODUCTION THEREOF, MAGNETIC FIELD SENSOR, MAGNETIC MEMORY, AND MAGNETIC LOGIC GATE USING SUCH AN ELEMENT

(54) Titre : ELEMENT MAGNETIQUE TRICOUCHES, PROCEDE POUR SA REALISATION, CAPTEUR DE CHAMP MAGNETIQUE, MEMOIRE MAGNETIQUE ET PORTE LOGIQUE MAGNETIQUE METTANT EN OEUVRE UN TEL ELEMENT

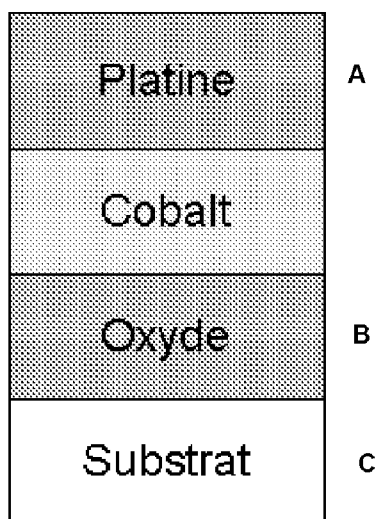


Figure 6

A Platinum
B Oxide
C Substrate

(57) Abstract : The three-layer magnetic element of the present invention comprises, on a substrate, a first hydride-oxide or nitride-oxide layer O having a metal magnetic layer M mounted thereon, the latter having either a second hydride-oxide or nitride-oxide layer O', or a non-ferromagnetic metal layer M', mounted thereon. The layer M is continuous, has a thickness of 1 to 5 nm, and has the magnetization thereof parallel to the layer plane in the absence of layers O and O'. There is, for a range of temperature equal to or greater than room temperature, an interfacial magnetic isotropy perpendicular to the layer plane on the interfaces O/M and M/O' that is capable of decreasing the actual demagnetizing field of the layer M or orienting the magnetization of the layer M in a manner substantially perpendicular to the layer plane.

(57) Abrégé : Cet élément magnétique tricouches, comporte, sur un substrat, une première couche d'oxyde, d'hydrure ou de nitrure O, surmontée d'une couche métallique magnétique M, elle-même surmontée soit d'une seconde couche d'oxyde, d'hydrure ou de nitrure O', soit d'une couche métallique non ferromagnétique M'. La couche M est continue, présente une épaisseur comprise entre 1 et 5 nanomètres, et a son aimantation parallèle au plan des couches en l'absence des couches O et O'. Il existe,

[Suite sur la page suivante]

WO 2010/001018 A1



NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :

(84) États désignés (*sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible*) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR),

- avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))
- avant l'expiration du délai prévu pour la modification des revendications, sera republiée si des modifications sont reçues (règle 48.2.h))

**ELEMENT MAGNETIQUE TRICOUCHES, PROCEDE POUR SA REALISATION, CAPTEUR DE CHAMP
MAGNETIQUE, MEMOIRE MAGNETIQUE ET PORTE LOGIQUE MAGNETIQUE METTANT EN
OEUVRE UN TEL ELEMENT**

5 DOMAINE TECHNIQUE DE L'INVENTION

La présente invention se rattache au domaine des matériaux magnétiques, plus particulièrement destinés à être mis en œuvre en tant que capteurs de champ magnétique, ou au sein des mémoires magnétiques permettant le stockage et la lecture de données dans des systèmes
10 électroniques, voire dans la réalisation d'éléments utilisables dans le domaine de la logique magnétique reprogrammable.

ETAT ANTERIEUR DE LA TECHNIQUE

15 Une des applications visées par la présente invention concerne des éléments magnétiques permettant la détection de champs magnétiques basée sur la mesure de l'Effet Hall Extraordinaire.

Il existe deux types d'Effets Hall: l'Effet Hall Ordinaire et l'Effet Hall Extraordinaire. L'Effet
20 Hall Ordinaire existe dans les matériaux métalliques ou semi-conducteurs dopés, et est dû à la force de Lorentz agissant sur les électrons sous l'effet d'un champ magnétique. L'Effet Hall Extraordinaire existe limitativement dans les matériaux ferromagnétiques et résulte de la diffusion des électrons par interaction spin-orbite avec les moments magnétiques du matériau ferromagnétique.

25 Un paramètre caractéristique de l'Effet Hall est la résistivité de Hall, qui s'exprime selon l'expression :

$$\rho_{xy} = (V_{xy} / I)t = R_0 H + 4\pi R_s M_z \quad (1)$$

30 où :

- V_{xy} est la tension de Hall mesurée dans le plan du film mince suivant une direction perpendiculaire à celle du courant électrique,
- I est l'intensité du courant circulant dans le plan du film mince,
- t est l'épaisseur du film mince,
- 35 ▪ R_0 est le coefficient de Hall Ordinaire,
- H est l'amplitude du champ magnétique appliqué,
- R_s est le coefficient de Hall Extraordinaire et M_z est la composante perpendiculaire de l'aimantation du film mince.

Le premier terme de l'équation (1), R_0H , correspond à la résistivité de Hall Ordinaire, et le second terme, $4\pi R_s M_z$, correspond à la résistivité de Hall Extraordinaire. Pour des champs magnétiques relativement faibles, l'Effet Hall Ordinaire est généralement plusieurs ordres de grandeur plus faible que l'Effet Hall Extraordinaire, et peut donc être négligé.

5

Si l'aimantation du film ferromagnétique est parallèle au plan, ce qui est généralement le cas pour des couches minces, sa composante perpendiculaire M_z augmente linéairement avec le champ magnétique appliqué hors du plan, jusqu'à atteindre l'aimantation à saturation M_s . Donc, tant que M_z est inférieur à M_s , la tension de Hall Extraordinaire est proportionnelle au champ magnétique appliqué.

10

La figure 1 représente schématiquement la variation de la résistivité de Hall avec le champ magnétique appliqué, pour un matériau magnétique en couche mince dont l'aimantation est parallèle au plan. Pour $H < 4\pi M_s$, la résistivité varie linéairement avec le champ appliqué, jusqu'à atteindre $\rho_{xy} = 4\pi R_s M_s$. Au-delà, la résistivité varie linéairement avec le champ appliqué avec une pente R_0 (premier terme de l'équation (1)) beaucoup plus faible comme indiqué précédemment. La région utile de fonctionnement d'un capteur de champ magnétique basé sur ce principe est donc limitée à des valeurs de champ magnétique inférieures à $4\pi M_s$, où M_s est l'aimantation à saturation du matériau magnétique considéré.

20

C'est la pente de la courbe $\rho_{xy}(H)$ qui détermine la sensibilité en champ magnétique d'un tel capteur, exprimée en micro-ohm centimètre par Tesla ($\mu\Omega\text{cm/T}$). Cette pente peut également, compte tenu de l'épaisseur t du film mince, et suivant la relation $\rho_{xy} = t \times R_{xy}$, être exprimée en ohm par Tesla (Ω/T). Afin de maximiser cette pente, on peut, soit augmenter le terme R_s d'Effet Hall Extraordinaire, soit diminuer l'anisotropie magnétique planaire du matériau afin de réduire le champ de saturation perpendiculaire.

25

Le choix d'un matériau à forte résistivité longitudinale et à forte diffusion spin-orbite est favorable pour maximiser R_s . Cette forte résistivité longitudinale est également un avantage car elle permet, pour des dispositifs de petite taille, de conserver une réponse en tension suffisante tout en limitant le courant circulant dans ledit dispositif à des valeurs supportables, au dessous d'une valeur entraînant des modifications structurales irréversibles (phénomènes d'électromigration).

30

La forte résistivité longitudinale est obtenue, soit en augmentant le désordre atomique du matériau (alliage désordonné par exemple), soit en diminuant l'épaisseur du film (il est connu que, pour une couche très mince, la résistivité électrique varie approximativement comme l'inverse de l'épaisseur du film). La contribution de diffusion spin-orbite est augmentée par un
5 choix de matériau contenant des éléments de numéro atomique élevé, par exemple le platine, le palladium, l'or, ou les métaux de la série des Terres Rares.

Il faut néanmoins remarquer que l'incorporation de tels matériaux est forcément limitée en concentration afin de conserver de bonnes propriétés magnétiques à l'alliage ferromagnétique.
10

Le deuxième moyen d'augmenter la pente de la courbe $\rho_{xy}(H)$ est de diminuer l'anisotropie magnétique planaire du matériau, c'est-à-dire d'introduire un terme supplémentaire de signe opposé au terme classique $4\pi M_s$. Ce terme noté H_s peut avoir pour origine soit une anisotropie volumique d'origine magnétocristalline ou induite par des contraintes élastiques de croissance,
15 soit une anisotropie d'interface due à des interactions électroniques interfaciales. Un cas typique est par exemple l'influence d'une couche de platine au contact d'une couche magnétique de cobalt, de nickel ou de fer.

En présence de ce terme supplémentaire, le champ d'anisotropie perpendiculaire H_K peut
20 s'écrire de la façon suivante:

$$H_K = 4\pi M_s - H_s \quad (2)$$

D'une manière qualitative, le champ d'anisotropie perpendiculaire H_K va donc diminuer de
25 façon régulière lorsque H_s va augmenter, l'aimantation de la couche magnétique étant toujours parallèle au plan, jusqu'à tendre vers zéro, limite en deçà de laquelle, lorsque H_s est supérieur à $4\pi M_s$, l'aimantation de la couche magnétique est spontanément (c'est à dire sans champ magnétique appliqué) perpendiculaire au plan de la couche. Dans ce dernier cas le matériau magnétique possède deux états stables en champ nul, et peut donc être intégré dans des
30 dispositifs tels que mémoires magnétiques ou portes logiques magnétiques.

La figure 2 est une représentation schématique de la courbe d'aimantation obtenue dans cette situation, pour un échantillon typique de composition $Pt_{1,8nm}/Co_{0,6nm}/Pt_{1,8nm}$. Cette courbe peut
35 être obtenue soit par mesure classique de magnétométrie, soit par mesure de l'Effet Hall, soit encore par mesure de l'Effet Kerr ou de l'Effet Faraday magnéto-optique.

Les flèches indiquent le sens de parcours du cycle magnétique lorsque l'on applique l'excitation magnétique H indiquée en abscisse. Les flèches monodirectionnelles représentent les évolutions irréversibles des cycles, tandis que les flèches bidirectionnelles représentent leurs évolutions réversibles. En ordonnée, les niveaux d'aimantation sont donnés en unités arbitraires.

En réduisant progressivement le champ magnétique appliqué d'une valeur positive, par exemple, à une valeur nulle, l'aimantation de la couche magnétique reste perpendiculaire à son plan et orientée dans le sens de ce champ magnétique précédemment appliqué. Il est alors nécessaire d'appliquer un champ magnétique de sens opposé, d'amplitude plus ou moins grande, afin de réorienter l'aimantation de la couche, toujours dans une direction perpendiculaire au plan, mais dans un sens opposé, à savoir dans le sens de ce nouveau champ magnétique appliqué.

Le champ magnétique nécessaire à ce basculement, plus précisément le champ magnétique qu'il faut appliquer pour que l'aimantation, moyennée sur l'ensemble des domaines magnétiques, soit nulle, est appelé champ coercitif, et dénommé H_c sur la figure 2. La valeur de ce champ coercitif va déterminer la stabilité de l'aimantation, dans un sens ou dans l'autre, vis à vis des perturbations magnétiques extérieures.

Plus ce champ coercitif est fort, plus le matériau est stable vis à vis de ces perturbations. Mais aussi, dans ce cas, plus il est difficile de modifier intentionnellement la direction de l'aimantation par l'application d'un champ magnétique perpendiculaire, comme par exemple dans le cadre de l'utilisation de ce matériau en tant que mémoire magnétique, pour laquelle l'information est justement codée par le sens de l'aimantation.

On peut donc préférer un champ coercitif faible nécessitant moins d'énergie pour réussir à faire basculer l'aimantation, avec peut-être dans ce cas nécessité « d'isoler » magnétiquement le dispositif vis à vis des perturbations magnétiques extérieures, ou alors préférer un champ coercitif fort, ce qui rend le dispositif plus stable mais plus consommateur d'énergie dans la phase d'écriture de l'information.

Il faut également mentionner que l'on peut utiliser d'autres façons de déterminer l'orientation et l'amplitude de l'aimantation d'une couche magnétique, par exemple grâce aux effets magnéto-optiques, dans lesquels l'interaction entre la lumière incidente et les moments magnétiques de la couche magnétique provoque une rotation du plan de polarisation de la lumière incidente ainsi qu'une modification de son ellipticité.

Pour déterminer l'orientation de l'aimantation de cette couche magnétique, on peut également rajouter une deuxième couche magnétique, séparée de la première par une couche d'un métal non magnétique ou par une couche d'oxyde, la direction de l'aimantation de cette deuxième couche étant connue. En mesurant la résistance électrique d'une telle tricouche, on peut

5 déterminer la direction de l'aimantation de la première couche magnétique, la résistance électrique de cet empilement étant plus faible dans le cas où les deux aimantations sont parallèles, comparé au cas où les aimantations sont anti-parallèles (phénomène bien connu de magnétorésistance géante ou tunnel). La circulation du courant électrique peut se faire, soit

10 l'échantillon a été taillé sous la forme d'un pilier ayant des dimensions latérales de l'ordre du micron ou moins.

Pour déterminer l'orientation de l'aimantation de cette couche magnétique, on peut également placer à sa proximité une tête de lecture magnétorésistive qui sera influencée par le champ

15 rayonné par les domaines magnétiques de cette couche.

Il existe dans la littérature quelques matériaux qui peuvent présenter certaines des caractéristiques exposées ci-dessus.

20 On peut citer par exemple les systèmes multicouches bien connus cobalt/platine, qui présentent une forte anisotropie magnétique perpendiculaire. En fonction des épaisseurs des couches élémentaires de platine et de cobalt, du nombre de répétitions du motif (Co/Pt) et de la présence d'une couche tampon de platine, on peut obtenir, soit un système présentant une aimantation spontanément (en champ magnétique nul) perpendiculaire au plan des couches,

25 soit une aimantation dans le plan des couches mais présentant une très forte susceptibilité magnétique perpendiculaire (pente de la courbe $M_z = f(H)$). Malheureusement ces matériaux présentent une résistivité longitudinale faible, due à la faible résistivité de ses composants métalliques.

30 Des structures s'apparentant à celles de la présente invention ont également été étudiées (voir B. Rodmacq, S. Auffret, B. Dieny, S. Monso, P. Boyer, *"Crossovers from in-plane to perpendicular anisotropy in magnetic tunnel junctions as a function of the barrier degree of oxidation"*, Journal of Applied Physics, 2003, Vol. 93, p 7513). Elles consistent en l'empilement, sur un substrat, de couches successives de platine, de cobalt, et d'oxyde

35 d'aluminium, soit l'empilement inverse de l'un des empilements proposés dans la présente invention.

Dans ces structures, l'amplitude de l'Effet Hall est relativement faible, principalement du fait de la présence d'une couche de platine relativement épaisse dans laquelle est dérivée une partie non négligeable du courant électrique circulant dans la structure.

- 5 Des empilements de couches s'apparentant à ceux de la présente invention ont également été proposés dans la littérature, mais pas dans un but d'application dans des dispositifs de type capteurs de champ magnétique, mémoires magnétiques ou composants logiques magnétiques.

10 On peut en premier lieu citer des travaux concernant des multicouches composées de couches de cobalt alternant avec des couches d'alumine (Al_2O_3) (voir Ch. Morawe, H. Zabel, "*Structure and thermal stability of sputtered metal/oxide multilayers: the case of Co/ Al_2O_3* ", Journal of Applied Physics, 1995, Vol. 77, p. 1969). Dans cette publication, les auteurs ne mentionnent aucune éventuelle propriété d'anisotropie magnétique perpendiculaire de ces matériaux, objet de la présente invention.

15 De plus, ces auteurs ne destinent absolument pas, contrairement à la présente invention, ces matériaux à une utilisation dans le domaine des capteurs de champ magnétique ou des mémoires ou composants logiques magnétiques basés notamment sur la mesure de l'Effet Hall Extraordinaire. En effet, les auteurs proposent d'utiliser ces matériaux uniquement pour leurs
20 propriétés structurales dans le cadre de miroirs pour les rayons X. Ces travaux ne relèvent donc pas du champ d'application visé par la présente invention.

On peut également citer des travaux concernant des multicouches "discontinues" composées de couches de cobalt ou d'alliages cobalt-fer alternant avec des couches de silice SiO_2 ou
25 d'alumine Al_2O_3 (voir B. Dieny, S. Sankar, M. R. McCartney, D. J. Smith, P. Bayle-Guillemaud, A. E. Berkowitz, "*Spin-dependent tunnelling in discontinuous metal/insulator multilayers*", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1998, Vol.185, p.283). Par le terme « discontinues », les auteurs font référence au fait que les couches de cobalt ou d'alliage cobalt-fer ne sont pas sous forme de couche mince d'épaisseur quasi-uniforme, mais plutôt
30 sous la forme d'agrégats de cobalt ou cobalt-fer enrobés dans la matrice d'oxyde.

Ces systèmes sont préparés par pulvérisation cathodique en déposant alternativement les couches de métal magnétique et les couches d'oxydes. Or, les atomes de cobalt ou de cobalt-fer tendent à coalescer sous la forme d'îlots disjoints, ce qui conduit à une structure en plan
35 d'agrégats plus ou moins indépendants, suivant l'épaisseur de métal déposée, noyés dans la matrice isolante.

Dans ces structures, on ne conserve donc que le « souvenir » de cette couche mince de cobalt ou cobalt-fer, ce qui est une situation complètement différente de celle considérée dans la présente invention. Dans ces études relatives aux multicouches discontinues métal/isolant, aucune mention n'est faite quant à d'éventuelles propriétés d'anisotropie magnétique perpendiculaire de ces matériaux. Enfin, ces auteurs ne destinent pas non plus ces matériaux à une utilisation dans le domaine des capteurs de champ magnétique ou des mémoires ou composants logiques magnétiques basés notamment sur la mesure de l'Effet Hall Extraordinaire. Ces travaux ne relèvent donc pas non plus du champ d'application visé par la présente invention.

10

On peut aussi citer des travaux concernant des multicouches fabriquées par dépôt d'un alliage cobalt-fer suivi d'une oxydation naturelle de la surface de cet alliage en présence d'oxygène (voir G. S. D. Beach, A. E. Berkowitz, "*Co-Fe metal/native-oxide multilayers: a new direction in soft magnetic thin film design I. Quasi-static properties and dynamic response*", IEEE Transactions on Magnetics, 2005, Vol. 41, p 2043, et G. S. D. Beach, A. E. Berkowitz, "*Co-Fe metal/native-oxide multilayers: a new direction in soft magnetic thin film design II. Microscopic characteristics and interactions*", IEEE Transactions on Magnetics, 2005, Vol. 41, p 2053).

15

Ces multicouches présentent une forte résistivité électrique, un fort moment magnétique et une grande « douceur » magnétique (facilité à saturer l'aimantation dans une direction parallèle au plan des couches). Les auteurs ne mentionnent pas de propriété spéciale quant à l'amplitude de l'Effet Hall Extraordinaire.

20

S'ils présentent des résultats semblant indiquer une tendance à l'apparition d'une certaine anisotropie perpendiculaire pour les faibles épaisseurs de métal magnétique, un examen plus précis des résultats montre que la réduction observée de l'amplitude du champ d'anisotropie perpendiculaire H_K est essentiellement due à une diminution du terme $4\pi M_s$ (voir relation (2)), et non à une quelconque contribution d'un terme d'anisotropie perpendiculaire H_s .

25

30

De la même manière, les auteurs prédisent que l'aimantation est spontanément perpendiculaire au plan des couches pour des épaisseurs de métal magnétique inférieures à 1,1 nanomètre, alors que dans le même temps ils présentent des résultats pour une épaisseur de 1,0 nanomètre, donc inférieure à cette limite, qui montrent sans ambiguïté que l'aimantation est dans ce cas parallèle au plan des couches et non pas perpendiculaire.

35

On peut enfin citer des travaux concernant des empilements constitués de deux multicouches (Pt/Co) et (Co/Pt) séparées par une couche d'oxyde NiO (voir C. Christides et Th. Speliotis, "Polarity of anomalous Hall effect hysteresis loops in $(Pt/Co)_{15}/AF/(Co/Pt)_{15}$ ($AF = FeMn, NiO$) multilayers with perpendicular anisotropy", Journal of Applied Physics, 2005, Vol. 97, p. 013901).

Dans ce document, il apparaît que les deux multicouches de part et d'autre de la couche de NiO auraient leur aimantation perpendiculaire au plan des couches en l'absence de la couche d'oxyde NiO. Ceci ressort clairement de la comparaison de la figure 2 (présence de la couche de NiO) et de la figure 3 (absence de la couche de NiO) page 013901-3, figures qui montrent que dans les deux cas l'aimantation des couches magnétiques est orientée perpendiculairement au plan des couches. Contrairement à la présente invention, ce n'est donc pas la présence de la couche séparatrice de NiO qui confère à cet empilement ses propriétés d'anisotropie magnétique perpendiculaire.

Il résulte de ces considérations qu'aucun des matériaux magnétiques connus actuellement ne rassemble toutes les propriétés nécessaires à son utilisation en tant que capteur de champ magnétique, à savoir une forte résistivité longitudinale (au moins quelques centaines de $\mu\Omega\text{cm}$), une forte résistivité de Hall (quelques pour cent de la résistivité longitudinale) et une forte susceptibilité magnétique perpendiculaire (au moins dix fois plus forte que pour un matériau magnétique classique à aimantation planaire, c'est-à-dire avec un champ de saturation hors du plan au plus de l'ordre de quelques dizaines de milliTeslas), voire même une aimantation perpendiculaire en champ nul pour les applications de type mémoires magnétiques ou portes logiques magnétiques.

Par ailleurs, pour les applications de type mémoires magnétiques ou portes logiques magnétiques, les matériaux connus du type (Pt/Co) ou alliages Terre Rare/métaux de transition ne présentent pas l'ensemble des propriétés requises pour ce type d'applications (forte polarisation en spin des électrons (si la magnétorésistance est utilisée pour détecter le signal), bonne stabilité thermique lors des recuits, faible corrosion).

EXPOSE DE L'INVENTION

La présente invention propose un moyen de réalisation d'un élément magnétique en tricouches non magnétique / magnétique / non magnétique, dont l'aimantation de la couche magnétique est parallèle au plan des couches en l'absence des deux couches non magnétiques, et qui présente un champ d'anisotropie hors du plan d'une valeur proche de ou supérieure à son champ démagnétisant, de sorte que l'élément magnétique possède, soit une grande sensibilité au champ magnétique, laquelle peut être détectée par la mesure de l'Effet Hall Extraordinaire, ou encore par la mesure de la magnétorésistance ou de l'Effet Kerr ou de l'Effet Faraday magnéto-optiques, soit une aimantation spontanément perpendiculaire au plan des couches en l'absence de champ magnétique appliqué.

Le matériau utilisé permet de réunir les avantages des différents matériaux cités ci-dessus, à savoir une forte anisotropie perpendiculaire pouvant compenser ou même surpasser l'anisotropie de forme propre aux couches minces, et dans le cas particulier de la mesure de l'Effet Hall, une forte résistivité longitudinale et un fort coefficient de Hall extraordinaire.

Ainsi, l'invention vise un élément magnétique tricouches, comportant, sur un substrat, une couche d'oxyde, d'hydruure ou de nitrure O, surmontée d'une couche métallique magnétique M, surmontée elle-même, soit d'une deuxième couche d'oxyde, d'hydruure ou de nitrure O', soit d'une couche métallique non ferromagnétique M', réalisant ainsi des structures génériques du type O/M/O ou O/M/M', et dans lequel les couches M sont continues.

La forte anisotropie magnétique perpendiculaire évoquée plus haut est obtenue, comme dans le cas des multicouches cobalt/platine, par des effets de contrainte et d'hybridation électronique aux interfaces entre la couche magnétique et la ou les couches d'oxyde, d'hydruure ou de nitrure. Comme dans le système (Co/Pt), la couche magnétique doit donc être mince (quelques nanomètres) afin que ces effets d'interfaces ne deviennent pas négligeables devant l'anisotropie magnétique volumique de forme, qui elle tend à maintenir l'aimantation de la couche magnétique dans le plan.

La forte résistivité longitudinale est obtenue par l'utilisation de couches magnétiques minces, donc de forte résistivité du fait du rôle important joué par les diffusions interfaciales, au contact avec une ou des couches d'oxyde, de nitrure ou d'hydruure. La résistance électrique de l'ensemble de l'empilement est donc élevée.

Selon l'invention, la couche métallique magnétique M présente une épaisseur comprise entre 1 et 5 nanomètres et est constituée d'un matériau magnétique, d'un alliage magnétique ou d'une multicouche formée de l'alternance de matériaux non magnétiques et magnétiques, ces derniers étant choisis dans le groupe constitué par Fe, Ni, Co ou leurs alliages.

5

Par ailleurs, la ou les couches O et O' d'oxyde, d'hydruure ou de nitrure présentent une épaisseur au moins égale à 0,3 nanomètre et sont réalisées à base d'éléments choisis dans le groupe comprenant Al, Mg, Ru, Ta, Cr, Zr, Hf, Ti, V, Si, Cu, W, Co, Ni, Fe, ou leurs alliages, et plus généralement de tout matériau ou alliage susceptible de former des oxydes, hydruures ou nitrures stables.

10

Avantageusement, le substrat recevant l'empilement précité est réalisé en silicium recouvert de silicium oxydé ou nitruré thermiquement ou naturellement sur une épaisseur comprise entre 2 et 500 nanomètres.

15

Cependant, ledit substrat peut être réalisé en un matériau transparent tel que par exemple du verre ou de l'oxyde de magnésium.

Selon une autre caractéristique avantageuse de l'invention, la couche métallique magnétique M contient des additions de métaux non magnétiques Pd ou Pt, servant à modifier les propriétés d'anisotropie magnétique perpendiculaire de cette couche, ou d'éléments choisis dans le groupe comprenant Si, C, B, P, N, servant à modifier la résistivité électrique de cette couche et/ou son aimantation par unité de volume.

20

Selon l'invention, la ou les couches O et O' sont réalisées en un même matériau non magnétique. Cependant, la composition chimique de l'une des couches O peut être différente de l'autre. En outre, les deux couches O et O' peuvent présenter ou non la même épaisseur.

25

Selon l'invention, au moins l'une des couches O ou O' peut elle-même être constituée d'une pluralité de couches réalisées en oxyde, en hydruure ou en nitrure.

30

Avantageusement :

- la couche métallique magnétique M présente une épaisseur comprise entre 1 et 5 nanomètres,
- la ou les couches O ou O' présentent une épaisseur comprise entre 0,3 et 5 nanomètres.
- la couche non ferromagnétique M' présente une épaisseur comprise entre 0,3 et 20 nanomètres,

35

L'élément magnétique de l'invention présente avantageusement des dimensions latérales inférieures à 1 micromètre.

5 L'invention concerne également un procédé de réalisation de l'élément magnétique en question. Ce procédé consiste :

- à déposer, sur une surface électriquement isolante, une première couche du métal constitutif de la couche O par pulvérisation cathodique,
- à oxyder, hydrurer ou nitrurer cette première couche O,
- à déposer sur cette première couche O, ou directement sur le substrat, une couche
10 métallique magnétique M par pulvérisation cathodique,
- à déposer par pulvérisation cathodique sur cette couche métallique magnétique M, soit une deuxième couche d'un métal constitutif de la couche O', subséquentement oxydée, nitrurée ou hydrurée, soit une couche métallique M',
- à établir des contacts électriques avec la couche M lorsque l'on désire mesurer les
15 propriétés de l'élément magnétique par circulation d'un courant électrique et mesure d'une tension.

Alternativement, les première et deuxième étapes peuvent n'en constituer qu'une seule, à savoir le dépôt direct, par pulvérisation radio-fréquence par exemple, de la couche d'oxyde,
20 d'hydrure ou de nitrure à partir d'une cible composée de l'oxyde, de l'hydrure ou du nitrure correspondant.

Selon le procédé de l'invention, l'élément magnétique est taillé sous forme d'un pilier à base carrée, rectangulaire, circulaire ou elliptique, avec des dimensions latérales de quelques
25 centaines de nanomètres ou moins. Il peut également être taillé, toujours pour la même gamme de dimensions, sous une forme permettant la détection du signal magnétique par mesure de l'Effet Hall Extraordinaire.

Selon une variante de l'invention, la ou les couches O ou O' sont obtenues par oxydation,
30 hydruration ou nitruration naturelle d'une couche métallique.

Selon une autre variante, la ou les couches O ou O' sont obtenues par oxydation, hydruration ou nitruration par procédé plasma d'une couche métallique.

35 Selon encore une autre variante de l'invention, la ou les couches O ou O' sont obtenues par pulvérisation réactive d'une couche métallique en présence d'oxygène, d'hydrogène ou d'azote dans l'atmosphère de la chambre de dépôt.

Selon encore une autre variante de l'invention, la ou les couches O ou O' sont obtenues par dépôt direct de l'oxyde, de l'hydruire ou du nitrure par pulvérisation cathodique radio-fréquence à partir d'un matériau-cible composite d'oxyde, d'hydruire ou de nitrure métallique.

- 5 Selon encore une autre variante de l'invention, c'est le substrat lui-même, composé ou recouvert d'un oxyde, nitrure ou hydruire, qui joue le rôle de la couche O.

10 Selon l'invention, le dépôt de certaines couches est réalisé à une température différente de la température ambiante. Par exemple, la ou les couches d'oxyde, d'hydruire ou de nitrure peuvent avoir une meilleure qualité structurale si on les fait croître à température élevée (par exemple 200°C). Par ailleurs, le dépôt d'une couche peut en outre être suivi d'un traitement thermique à une température supérieure à ladite température de dépôt. Cela peut être le cas par exemple pour favoriser l'oxydation ou la nitruration d'une couche ou encore permettre la cristallisation d'une couche amorphe.

15 Par ailleurs, après réalisation des étapes de dépôt, on peut soumettre l'ensemble ainsi obtenu à un traitement thermique pendant un temps plus ou moins long, dans une atmosphère raréfiée, ou en présence d'un certain gaz ou mélange de différents gaz, tels que l'oxygène, l'hydrogène ou l'azote par exemple, afin de modifier la structure et/ou les propriétés de transport
20 électrique et/ou les propriétés magnétiques de l'élément magnétique.

Les étapes de dépôt des différentes couches, ou le traitement thermique d'une partie ou de l'ensemble des couches constituant l'empilement, peuvent être réalisés en présence d'un champ magnétique extérieur apte à modifier les caractéristiques magnétiques de l'ensemble de
25 l'empilement.

L'invention vise un capteur de champ magnétique constitué de l'élément magnétique tricouches de l'invention, ce dernier présentant un champ d'anisotropie perpendiculaire contrebalançant presque son champ démagnétisant.

30 L'invention vise également une mémoire magnétique constituée de l'élément magnétique tricouches en question, dans lequel l'aimantation de la couche magnétique est orientée perpendiculairement au plan des couches en l'absence de champ magnétique extérieur.

35 L'invention concerne également une porte logique magnétique constituée dudit élément magnétique tricouches, dans lequel la direction de l'aimantation de la couche magnétique est perpendiculaire au plan des couches en l'absence de champ magnétique extérieur.

L'invention peut être également utilisée de façon générale dans les dispositifs à déplacement de parois magnétiques tels que les registres à décalage proposés par exemple dans le document US 6 920 062. Dans ces dispositifs, l'information est stockée sous la forme d'une succession de domaines dont les aimantations sont orientées « vers le haut » ou « vers le bas ». Chaque domaine représente un bit d'information. Ils sont séparés par des parois magnétiques. Les parois magnétiques et donc les domaines, peuvent être avantageusement déplacées dans ces structures par circulation d'un courant électrique qui exerce une force sur les parois par l'effet de transfert de spin. Un capteur magnétorésistif ou à effet Hall placé à un endroit donné à proximité ou sur le dispositif permet de détecter le passage des parois et des domaines et remonter ainsi à l'information magnétique écrite dans le dispositif.

Afin de déterminer l'orientation de l'aimantation de la couche magnétique de l'élément magnétique :

- on mesure l'Effet Hall Extraordinaire par circulation d'un courant électrique dans une direction parallèle au plan des couches,
- ou on mesure la magnétorésistance par circulation d'un courant électrique dans une direction perpendiculaire ou parallèle au plan des couches,
- ou on mesure l'Effet Kerr ou l'Effet Faraday magnéto-optique,
- ou encore on utilise le champ rayonné par les domaines magnétiques pour influencer une tête de lecture magnétorésistive située à proximité de l'élément magnétique.

BREVE DESCRIPTION DES DESSINS

La figure 1 est une représentation schématique d'une courbe d'aimantation caractéristique d'un élément magnétique de l'art antérieur.

La figure 2 est une représentation schématique de la variation typique de l'aimantation en fonction du champ magnétique pour un matériau à anisotropie magnétique perpendiculaire.

Ces deux premières figures ont déjà été décrites en relation avec l'état antérieur de la technique.

La figure 3 est une représentation schématique d'une première forme de réalisation de l'élément magnétique conforme à l'invention.

La figure 4 représente la variation de la résistance de Hall en fonction du champ magnétique perpendiculaire pour une structure du type SiO_2 / Co 0.6nm / Pt 3.0nm.

La figure 5 représente la variation de la résistance de Hall en fonction du champ magnétique perpendiculaire pour une structure du type SiO_2 / Co 1.5nm / Pt 3.0nm.

La figure 6 est une représentation schématique d'une deuxième forme de réalisation de l'élément magnétique conforme à l'invention.

La figure 7 représente la variation de la résistance de Hall en fonction du champ magnétique perpendiculaire pour une structure du type SiO_2 / AlOx 2.0nm / Co 1.5nm / Pt 3.0nm. Un plasma d'oxygène a été utilisé pour oxyder la couche d'aluminium.

La figure 8 est une représentation schématique d'une troisième forme de réalisation de l'élément magnétique conforme à l'invention.

La figure 9 est une représentation schématique d'une quatrième forme de réalisation de l'élément magnétique conforme à l'invention.

- 5 La figure 10 est une représentation schématique d'une cinquième forme de réalisation de l'élément magnétique conforme à l'invention.

La figure 11 est une représentation schématique d'une sixième forme de réalisation de l'élément magnétique conforme à l'invention.

- 10 La figure 12 représente la variation de la résistance de Hall en fonction du champ magnétique perpendiculaire pour une structure du type SiO_2 / Co 1.5nm / Pt 3.0nm pour différentes températures de recuit.

- 15 La figure 13 représente la variation de la résistance de Hall en fonction du champ magnétique perpendiculaire pour une structure du type SiO_2 / AlOx 0.6nm / Co 1.5nm / Pt 3.0nm pour différentes températures de recuit. Une oxydation naturelle a été utilisée pour oxyder la couche d'aluminium.

- La figure 14 représente la variation de la résistance de Hall en fonction du champ magnétique perpendiculaire pour une structure du type SiO_2 / AlOx 2.0nm / Co 1.5nm / Pt 3.0 nm pour différentes températures de recuit. Un plasma d'oxygène a été utilisé pour oxyder la couche d'aluminium

- 20 La figure 15 représente la variation de la résistance de Hall en fonction du champ magnétique perpendiculaire pour une structure du type SiO_2 / MgOx 1.4nm / Co 1.5nm / Pt 3.0nm pour différentes températures de recuit. Une oxydation naturelle a été utilisée pour oxyder la couche de magnésium.

25 DESCRIPTION DES MODES PARTICULIERS DE REALISATION DE L'INVENTION

Sans être limitatif, et à titre d'exemple, les matériaux et les techniques utilisés dans les modes de réalisation décrits ci après sont les suivants.

- 30 La figure 3 est une représentation schématique d'une première forme de réalisation conforme à l'invention. Sur un substrat possédant les caractéristiques requises pour remplacer la couche O, et recouvert par exemple de silicium oxydé ou nitruré, ou composé par exemple de verre ou d'oxyde de magnésium, on dépose une couche magnétique M, en l'espèce du cobalt, dont l'épaisseur est généralement faible. Si cette épaisseur dépasse une certaine valeur dépendant
- 35 du matériau utilisé pour la couche M et de l'intensité des interactions interfaciales avec les matériaux au contact de cette couche magnétique M, l'aimantation n'est pas, de manière connue, perpendiculaire au plan de la couche du fait de l'anisotropie volumique de forme de cette couche M qui tend à maintenir l'aimantation de cette couche dans son plan.

Pour cette couche M, le choix de son épaisseur est surtout déterminé par la possibilité d'obtention d'une couche métallique continue. En effet, comme discuté précédemment, certains métaux magnétiques mouillent mal sur les oxydes tels que la silice ou l'alumine. Dans certains cas, le métal magnétique a tendance à coalescer sous la forme d'îlots plus ou moins disjoints suivant l'épaisseur du métal déposée.

Sur cette couche magnétique M, on peut ensuite avantageusement déposer une couche d'un métal non ferromagnétique M', par exemple du platine, afin soit de protéger l'ensemble de la structure ainsi réalisée contre une oxydation naturelle ultérieure, soit de faciliter le passage d'un courant électrique.

La figure 4 est une illustration de cette forme de réalisation. L'empilement comprend, sur un substrat de silicium oxydé, une couche magnétique de cobalt de 0,6 nanomètre d'épaisseur, surmontée d'une couche de platine de 3 nanomètres d'épaisseur. On mesure la variation de la résistance de Hall en fonction du champ magnétique extérieur appliqué perpendiculairement au plan des couches.

Cette figure 4 montre une augmentation régulière et non linéaire de la résistance de Hall avec le champ magnétique, contrairement par exemple au cas illustré sur la figure 1, où il était aisé de distinguer les deux contributions linéaires à cette résistance, la première proportionnelle à l'aimantation (contribution extraordinaire), et la deuxième, pour des champs appliqués plus forts, proportionnelle à ce champ appliqué (contribution ordinaire). Ceci signifie que, dans le cas exposé sur la figure 4, il n'est pas possible d'aligner parfaitement l'aimantation de la couche de cobalt dans une direction parallèle au champ magnétique, même pour des champs de forte intensité. Ceci est une caractéristique des matériaux dits « superparamagnétiques », pour lesquels les petits îlots de cobalt ne sont pas suffisamment stables magnétiquement vis à vis de l'agitation thermique.

Dans d'autres cas, les effets de tension superficielle sont trop faibles pour que le phénomène de coalescence en îlots ait lieu. La couche métallique peut alors être continue. La gamme d'épaisseurs permettant l'obtention de couche continue de métal dépend de l'énergie surfacique de l'oxyde, de l'énergie surfacique du métal et de l'énergie interfaciale de l'interface oxyde/métal, et de la mouillabilité de la surface de dépôt par la couche métallique d'apport. Cette gamme d'épaisseur possible pour l'obtention de couches métalliques continues dépend donc à la fois du métal M et de l'oxyde.

Dans d'autres cas encore, augmenter légèrement l'épaisseur de la couche magnétique permet d'augmenter le taux de recouvrement de la surface jusqu'à un point où les îlots mentionnés ci-dessus vont entrer en contact les uns avec les autres, permettant ainsi de recouvrer de bonnes propriétés magnétiques.

5

Pour un même matériau de base M, on peut modifier l'épaisseur de la couche magnétique pour laquelle on recouvre de bonnes propriétés magnétiques en ajoutant à ce matériau magnétique des éléments pouvant améliorer la mouillabilité sur le substrat en abaissant l'énergie de surface du métal à la faveur de l'énergie de l'interface oxyde/métal. Selon un mode habituel de réalisation, le matériau est un métal magnétique, comme le cobalt, d'épaisseur comprise entre 1 et 5 nanomètres, typiquement de 1,5 nanomètre.

10

C'est ce cas qui est illustré en relation avec la figure 5, qui montre la variation de la résistance de Hall en fonction du champ magnétique extérieur, appliqué perpendiculairement au plan des couches, pour un empilement du type (substrat / Co 1,5 nm / Pt 3 nm). Dans ce cas, on retrouve une variation de la résistance de Hall conforme à celle de la figure 1, l'aimantation de la couche de cobalt pouvant être alignée dans la direction d'un champ magnétique extérieur d'une intensité d'environ 8 kOe.

15

Compte tenu de la relation (2), on constate dans ce cas la présence d'une contribution non négligeable d'anisotropie perpendiculaire $H_s = 4\pi M_s - H_K = 18 - 8 = 10$ kOe, relation dans laquelle on a pris l'aimantation de la couche de cobalt égale à 1430 uem/cm³.

20

Afin d'adapter les propriétés magnétiques du dispositif en fonction de l'application visée (capteur de champ, dispositif mémoire ou porte logique) et obtenir les meilleures performances notamment en terme d'anisotropie magnétique perpendiculaire, la couche de cobalt peut être remplacée par un alliage $\text{Co}_x\text{Fe}_{1-x}$ de concentration variable, ou par un alliage ternaire $\text{Co}_x\text{Ni}_y\text{Fe}_{100-x-y}$, ou par un alliage, cristallisé ou amorphe, d'un ou plusieurs de ces matériaux magnétiques avec un autre élément non magnétique, tel le bore, le silicium, le phosphore, et/ou le carbone. On peut également utiliser un alliage ou une multicouche composée d'un matériau magnétique et d'un matériau non magnétique.

25

30

La figure 6 est une représentation schématique d'une deuxième forme de réalisation conforme à l'invention.

35

Sur le substrat précédemment mentionné, on dépose la couche O, préférentiellement en oxyde d'aluminium, dont l'épaisseur est de l'ordre de 0,3 à 5 nanomètres, ce dernier chiffre n'étant pas très critique. Cette couche est généralement constituée d'un dépôt de métal, comme par exemple l'aluminium, qui a été oxydé. Mais l'aluminium peut être remplacé par tout autre
5 élément susceptible de former avec l'oxygène des oxydes en couches minces de bonne qualité, à savoir par exemple le magnésium, le ruthénium, le silicium, le tantale, le chrome, le zirconium, le titane, l'hafnium, le vanadium, le cobalt, le nickel, le fer, le cuivre, le tungstène, et plus généralement de tout matériau ou alliage susceptible de former des oxydes stables. On peut également utiliser pour certaines réalisations particulières, un alliage ou une multicouche
10 de ces matériaux en tant que couche d'oxyde élémentaire.

Il est également possible de réaliser l'oxyde, non pas par une technique d'oxydation plasma, mais par une technique connue de pulvérisation réactive de l'élément considéré en présence d'une certaine quantité d'oxygène dans l'atmosphère de la chambre de dépôt, ou par une
15 technique d'oxydation naturelle, ou encore en déposant directement l'oxyde par pulvérisation radio-fréquence d'un matériau-cible composite MOx, où M désigne un des métaux cités plus haut et Ox l'oxygène.

Des résultats analogues peuvent être obtenus en effectuant une nitruration ou une hydruration et
20 non pas une oxydation.

Sur cette première couche d'oxyde, hydrure ou nitrure O, on dépose ensuite la couche magnétique M, par exemple du cobalt, puis éventuellement une dernière couche métallique non ferromagnétique M', par exemple du platine, ainsi qu'indiqué dans la première forme de
25 réalisation de l'invention en relation avec la figure 3.

C'est cette deuxième forme de réalisation qui est illustrée en relation avec la figure 7. L'empilement comprend, sur un substrat de silicium oxydé, une couche d'aluminium de 0,6 nanomètre d'épaisseur, exposée après dépôt à une atmosphère d'oxygène, puis une couche de
30 cobalt de 1,5 nanomètre d'épaisseur, surmontée d'une couche de platine de 3 nanomètres d'épaisseur. On mesure la variation de la résistance de Hall en fonction du champ magnétique extérieur appliqué perpendiculairement au plan des couches.

Comme dans le cas de la figure 5, on retrouve une variation de la résistance de Hall conforme
35 à celle de la figure 1, l'aimantation de la couche de cobalt pouvant être alignée dans la direction d'un champ magnétique extérieur d'une intensité d'environ 8 kOe. On constate donc également la présence d'une contribution non négligeable d'anisotropie perpendiculaire.

Les figures 8 et 9 sont des représentations schématiques d'une troisième et quatrième formes de réalisation conforme à l'invention.

5 Dans ce cas, on a remplacé la couche métallique non ferromagnétique supérieure M' utilisée dans les première et deuxième formes de réalisation par une couche d'oxyde O'. L'intérêt principal de ces formes de réalisation est que le courant électrique éventuellement injecté dans une direction parallèle au plan des couches circule uniquement dans la couche magnétique. Ceci entraîne donc une bien meilleure efficacité du dispositif si par exemple ce courant électrique est utilisé à des fins de mesure de la tension de Hall, ou si ce courant électrique est
10 utilisé à des fins de manipulation de l'état magnétique du dispositif, pour par exemple déplacer des parois de domaines magnétiques comme dans le document US 6 920 062.

Pour ces deux dernières formes de réalisation, la nature, la composition chimique, l'épaisseur ou le mode de fabrication de la deuxième couche d'oxyde ne doivent pas être forcément
15 identiques à ceux du substrat ou de la première couche d'oxyde.

Dans une cinquième forme de réalisation, comme illustré schématiquement sur la figure 10, il est possible de mettre au contact de la couche M considérée, en l'espèce en cobalt, une couche d'un matériau M' antiferromagnétique, tel les alliages IrMn, PtMn, FeMn ou NiMn, réputés
20 pour induire un couplage d'anisotropie d'échange avec ladite couche M.

Dans une sixième forme de réalisation, comme illustré schématiquement sur la figure 11, il est également possible d'insérer une couche métallique non magnétique, par exemple du platine, d'une épaisseur comprise entre 0,1 et 1 nanomètre entre ladite couche M et ledit
25 matériau réputé pour induire un couplage d'échange avec ladite couche M.

Pour l'une des quelconques formes de réalisation décrites ci-dessus, il est possible de déposer les couches successives, ou certaines d'entre elles, sur un substrat maintenu à une température différente de la température ambiante. Il peut aussi être intéressant d'effectuer ces dépôts en
30 présence d'un champ magnétique extérieur.

Par ailleurs, après réalisation des étapes de dépôt, on peut soumettre l'ensemble ainsi obtenu à un traitement thermique pendant un temps plus ou moins long, dans une atmosphère raréfiée, ou en présence d'un certain gaz ou mélange de différents gaz, tels que l'oxygène, l'hydrogène
35 ou l'azote par exemple, en présence ou en l'absence d'un champ magnétique extérieur, afin de modifier la structure et/ou les propriétés de transport électrique et/ou les propriétés magnétiques du dispositif.

C'est l'effet de ces traitements thermiques post-dépôt qui est illustré sur la figure 12, utilisant la première forme de réalisation, et sur les figures 13, 14 et 15, utilisant la deuxième forme de réalisation. Dans ces cas, les empilement représentés schématiquement aux figures 3 et 6 ont été, après dépôt, maintenus à une température comprise entre 20°C et 400°C pendant un
5 temps de 30 minutes dans une atmosphère raréfiée de 10^{-6} mbar, puis refroidis jusqu'à la température ambiante, où leurs propriétés magnétiques ont à nouveau été mesurées.

La figure 12 correspond à un empilement du type substrat / M / M' (première forme de réalisation), dans lequel le substrat consiste en silicium recouvert de 500 nanomètres d'oxyde de silicium, M représente une couche de cobalt d'une épaisseur de 1,5 nanomètre, recouverte
10 d'une couche M' de platine de 3 nanomètres d'épaisseur.

Tout d'abord, on constate sur cette figure une importante augmentation de l'amplitude de la résistance de Hall suite aux différents traitements thermiques. Cette amplitude en effet
15 augmente d'un facteur deux après traitement thermique à une température de 400°C par rapport à l'amplitude mesurée juste après dépôt de l'empilement.

De plus, le champ de saturation perpendiculaire H_K (voir relation (2)) diminue progressivement lorsque la température de recuit augmente, jusqu'à devenir négatif
20 (l'aimantation de la couche de cobalt est alors spontanément perpendiculaire au plan des couches) après traitement thermique à 400°C. Pour des températures de recuit intermédiaires, la pente de la courbe $R(H)$ peut atteindre des valeurs très importantes, permettant à cet empilement d'être utilisé en tant que capteur de champ magnétique.

Les figures 13, 14 et 15, correspondant au deuxième mode de réalisation illustré sur la figure 6, présentent la variation de la résistance de Hall avec le champ magnétique appliqué perpendiculairement au plan des couches, pour différentes natures de l'oxyde utilisé et après
25 différentes températures de recuit. La figure 13 correspond à une couche d'aluminium de 0,6 nanomètre subséquemment mise en présence d'une atmosphère d'oxygène. La figure 14 correspond à une couche d'aluminium de 1,6 nanomètre oxydée par un procédé plasma, la
30 figure 15 correspond à une couche de magnésium de 1,4 nanomètre subséquemment mise en présence d'une atmosphère d'oxygène.

Dans ces trois cas, il est possible, par un traitement thermique adéquat, de stabiliser
35 l'aimantation de la couche de cobalt dans une direction perpendiculaire au plan des couches en l'absence de champ magnétique appliqué.

Si alors, pour les deuxième, cinquième ou sixième formes de réalisation, on dépose, avant la couche O des empilements schématisés sur les figures 6, 10 ou 11, une première couche magnétique à aimantation également perpendiculaire au plan, on réalisera ainsi une structure du type jonction tunnel magnétique à aimantations perpendiculaires au plan des couches.

5

Il est donc tout à fait possible, par traitement thermique, de modifier à volonté les propriétés magnétiques de ce type de matériau, afin de maximiser la résistance de Hall et/ou d'ajuster en fonction de l'application visée la stabilité de l'aimantation par rapport au champ magnétique extérieur (en particulier son champ coercitif). Ces traitements thermiques ont de plus l'avantage de rendre l'élément magnétique beaucoup plus stable en terme structural par rapport à d'éventuelles variations ultérieures de température.

10

Il faut à nouveau rappeler que ce paramètre (le champ coercitif, ainsi que défini en relation avec la figure 2) peut lui aussi être ajusté, non seulement en modifiant la température des traitements thermiques post-dépôt comme illustré sur les figures 13, 14 et 15, mais aussi, soit en modifiant la composition de l'empilement (épaisseurs de couches, nature du matériau ferromagnétique, présence ou non d'une deuxième couche O'), soit en modifiant les conditions de dépôt (vitesse, température, champ magnétique), soit en utilisant une technique ou des conditions d'oxydation différentes (pression d'oxygène, temps d'oxydation, puissance plasma, etc.).

20

L'invention concerne également le procédé de fabrication d'éléments magnétiques conformes aux descriptions précédentes. Ce procédé est défini comme suit, sans que cette présentation ne soit en aucun cas exhaustive.

25

Les différentes couches des empilements présentés ici sont déposées par pulvérisation cathodique avec des vitesses de dépôt de l'ordre de 0,1 nm/s, sur des substrats de silicium recouverts de 500 nanomètres de silicium oxydé thermiquement.

30

Les couches d'oxyde, d'hydruure ou de nitrure sont réalisées en déposant tout d'abord la couche du matériau correspondant, puis en effectuant une oxydation, hydruration ou nitruration plasma de cette couche avec des puissances de l'ordre de 10 W sous une pression de 3×10^{-3} mbar d'oxygène, d'hydrogène ou d'azote pendant une durée de quelques secondes à quelques minutes.

35

Tout d'abord, on dépose une couche, d'aluminium par exemple, d'une épaisseur de l'ordre de 0,3 à 5 nanomètres. L'échantillon est ensuite soumis à un plasma, d'oxygène par exemple, dans des conditions de pression, puissance et temps bien définies. Ceci permet de transformer cet aluminium métallique en oxyde d'aluminium.

5

Il est évident que, cette couche d'alumine étant isolante électriquement, son épaisseur est beaucoup moins critique que celle des autres couches métalliques. Ceci est en revanche différent si l'oxyde (ou l'hydrure ou le nitrure) du métal considéré est conducteur électrique. Dans le cas d'une couche isolante, ce qui fixe son épaisseur dépend à la fois des propriétés de croissance de cette couche, dont la rugosité peut s'amplifier avec l'épaisseur et donc avoir un effet néfaste sur la qualité de croissance des couches suivantes, et des mécanismes d'oxydation qui peuvent éventuellement se modifier en fonction de l'épaisseur totale. Les exemples suivants concernent une épaisseur d'aluminium de 1,6 nanomètre, correspondant approximativement à 2 nanomètres d'alumine après oxydation de cette couche métallique.

10

Cette étape de dépôt de la première couche O peut éventuellement être omise, si c'est le substrat (à base d'oxyde ou de nitrure) lui-même qui constitue la première couche O.

On dépose ensuite une couche de cobalt, d'une épaisseur généralement faible. Dans les exemples décrits ci après, l'épaisseur de la couche de cobalt a été fixée à 1,5 nanomètre. Le choix d'une épaisseur relativement faible permet également de ne pas trop diminuer la résistivité de cette couche comparée à celle d'une couche plus épaisse.

Inversement, trop diminuer cette épaisseur pourrait, soit diminuer l'aimantation intrinsèque de cette couche, soit fortement diminuer sa température d'ordre magnétique. Dans les deux cas, ceci conduirait à une diminution de l'aimantation effective de cette couche à la température d'utilisation de l'élément magnétique, à savoir à proximité de la température ambiante. Selon la relation (1), ceci conduirait à une diminution de la résistivité de Hall, et donc à une diminution du signal de sortie du dispositif. Pour d'autres types d'applications décrites dans la présente invention, on pourra augmenter cette épaisseur de la couche magnétique jusqu'à 5 nanomètres.

Cette bicouche oxyde / métal magnétique, ou hydrure / métal magnétique, ou nitrure / métal magnétique, peut éventuellement être surmontée par une couche d'un métal non ferromagnétique ayant pour but, soit de protéger l'ensemble de la structure ainsi réalisée contre une oxydation naturelle ultérieure, soit de faciliter le passage d'un courant électrique, soit encore d'induire un couplage magnétique d'échange avec la couche magnétique.

35

- Cette bicouche oxyde / métal magnétique, ou hydrure / métal magnétique, ou nitrure / métal magnétique, peut éventuellement être surmontée par une couche d'un oxyde, hydrure ou nitrure fabriqué suivant une des techniques citées plus haut permettant de protéger l'ensemble de la structure ainsi réalisée contre une oxydation naturelle ultérieure, sans pour autant
- 5 abaisser la résistance électrique de l'empilement contrairement au cas ci-dessus évoqué.

Enfin, il est possible de réaliser des traitements thermiques ou des traitements magnétiques pendant ou après le dépôt de l'empilement.

- 10 Par traitements thermiques, on entend le fait de soumettre le matériau ainsi préparé à une température plus élevée que la température à laquelle il a été déposé, pendant un temps plus ou moins long, dans une atmosphère raréfiée ou en présence éventuelle d'un certain gaz ou mélange de différents gaz, tels que oxygène, hydrogène ou azote par exemple.
- 15 Par traitements magnétiques, on entend l'application d'un champ magnétique d'intensité et de direction judicieusement choisies, soit pendant une ou plusieurs des étapes de dépôt des différentes couches constitutives de l'empilement, soit pendant une des étapes de traitements thermiques décrites ci-dessus.
- 20 Ces traitements, thermiques et/ou magnétiques, ont pour but par exemple d'augmenter la résistivité longitudinale de l'empilement, par disruption éventuelle de la couche magnétique et/ou formation d'un alliage aux interfaces. Ils peuvent également avoir pour but de modifier la structure chimique ou cristallographique des couches, et en conséquence de modifier les propriétés magnétiques de l'empilement ainsi réalisé.

REVENDICATIONS

1. Elément magnétique tricouches, comportant, sur un substrat, une première couche d'oxyde, d'hydruure ou de nitrure O, surmontée d'une couche métallique magnétique M, elle-même surmontée soit d'une seconde couche d'oxyde, d'hydruure ou de nitrure O', soit d'une couche métallique non ferromagnétique M', et dans lequel :
- la couche M est continue, présente une épaisseur comprise entre 1 et 5 nanomètres, et a son aimantation parallèle au plan des couches en l'absence des couches O et O',
 - il existe, pour une gamme de température égale ou supérieure à la température ambiante, une anisotropie magnétique interfaciale perpendiculaire au plan des couches aux interfaces O/M et M/O', apte à diminuer le champ démagnétisant effectif de la couche M ou à orienter l'aimantation de la couche M sensiblement perpendiculairement au plan des couches.
2. Elément magnétique tricouches selon la revendication 1, *caractérisé* :
- en ce que la couche métallique magnétique M est constituée d'un matériau magnétique, d'un alliage magnétique ou d'une multicouche formée de l'alternance de matériaux non magnétiques et magnétiques, ces derniers étant choisis dans le groupe constitué par Fe, Ni, Co ou leurs alliages,
 - et en ce que la ou les couches d'oxydes, d'hydruures ou de nitrures O et O' présentent une épaisseur au moins égale à 0,3 nanomètre et sont réalisées à base d'éléments choisis dans le groupe comprenant Al, Mg, Ru, Ta, Cr, Zr, Hf, Ti, V, Si, Cu, W, Co, Ni, Fe ou leurs alliages, et plus généralement de tout matériau ou alliage susceptible de former des oxydes, hydruures ou nitrures stables.
3. Elément magnétique tricouches selon l'une des revendications 1 et 2, *caractérisé* en ce que le substrat est en silicium recouvert de silicium oxydé ou nitruré, thermiquement ou naturellement, sur une épaisseur comprise entre 1 et 500 nanomètres.
4. Elément magnétique tricouches selon l'une des revendications 1 et 2, *caractérisé* en ce que le substrat est un matériau transparent, et notamment du verre ou de l'oxyde de magnésium.
5. Elément magnétique tricouches selon l'une des revendications 1 et 2, *caractérisé* en ce que le substrat joue le rôle de la première couche O.

6. Élément magnétique tricouches selon l'une des revendications 1 à 5, *caractérisé* en ce que la couche M contient des additions de métaux non magnétiques Pd ou Pt, ou d'éléments choisis dans le groupe comprenant Si, C, B, P.
- 5 7. Élément magnétique tricouches selon l'une des revendications 1 et 2, *caractérisé* en ce que les couches O et O' sont réalisées à partir d'un même matériau non magnétique.
8. Élément magnétique tricouches selon l'une des revendications 1 et 2, *caractérisé* en ce que les couches O et O' présentent la même épaisseur.
- 10 9. Élément magnétique tricouches selon l'une des revendications 1 et 2, *caractérisé* en ce que les épaisseurs des couches O et O' sont différentes.
10. Élément magnétique tricouches selon l'une des revendications 5 à 9, *caractérisé* :
- 15 ▪ en ce que la couche métallique M présente une épaisseur comprise entre 1 et 5 nanomètres,
- en ce que les couches O et O' présentent une épaisseur comprise entre 0,3 et 5 nanomètres.
- 20 11. Élément magnétique tricouches selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, *caractérisé* en ce que les compositions chimiques des couches O et O' sont différentes.
12. Élément magnétique tricouches selon l'une quelconque des revendications 1 à 11, *caractérisé* en ce que l'une au moins des couches O ou O' est elle-même constituée
- 25 d'une pluralité de couches réalisée en oxyde, en hydrure ou en nitrure.
13. Élément magnétique tricouches selon l'une quelconque des revendications 1 à 12, *caractérisé* en ce que la couche non ferromagnétique M' est réalisée en un matériau antiferromagnétique réputé pour induire un couplage d'anisotropie d'échange avec la
- 30 couche magnétique M, par exemple FeMn, IrMn, PtMn, NiMn.
14. Élément magnétique tricouches selon la revendication 13, *caractérisé* en ce qu'une couche métallique non magnétique d'une épaisseur comprise entre 0,1 et 1 nanomètre est insérée entre la couche M et la couche M' réputée pour induire un couplage d'anisotropie
- 35 d'échange avec ladite couche M.

- 5
15. Elément magnétique tricouches selon l'une quelconque des revendications 1 à 14, *caractérisé* en ce que cet élément est lui-même déposé au-dessus d'une première couche magnétique présentant également soit un champ démagnétisant effectif réduit, soit une aimantation orientée sensiblement perpendiculairement au plan des couches.
16. Elément magnétique tricouches selon l'une quelconque des revendications 1 à 15, *caractérisé* en ce que ses dimensions latérales sont inférieures à 1 micromètre.
- 10 17. Procédé de réalisation d'un élément magnétique tricouches, *caractérisé* en ce qu'il comprend les étapes suivantes :
- dépôt sur une surface électriquement isolante d'une première O par pulvérisation cathodique,
 - oxydation, nitruration ou hydruration de cette première couche O,
 - dépôt de la couche magnétique M sur cette première couche O,
 - 15 - répétition éventuelle des première et deuxième étapes, ou dépôt d'une couche non ferromagnétique M' sur ladite couche M.
18. Procédé de réalisation d'un élément magnétique tricouches selon la revendication 17, *caractérisé* en ce que les étapes de dépôt puis d'oxydation, nitruration ou hydruration de la première couche O est omise.
- 20 19. Procédé de réalisation d'un élément magnétique tricouches selon la revendication 17 ou 18, *caractérisé* en ce que la ou les couches O ou O' sont réalisées par dépôt puis oxydation, hydruration ou nitruration naturelle de la couche métallique correspondante.
- 25 20. Procédé de réalisation d'un élément magnétique tricouches selon la revendication 17 ou 18, *caractérisé* en ce que la ou les couches O ou O' sont réalisées par dépôt puis oxydation, hydruration ou nitruration par procédé plasma de la couche métallique correspondante.
- 30 21. Procédé de réalisation d'un élément magnétique tricouches selon la revendication 17 ou 18, *caractérisé* en ce que la ou les couches O ou O' sont réalisées par pulvérisation réactive de la couche métallique correspondante en présence d'oxygène, d'hydrogène ou d'azote dans l'atmosphère de la chambre de dépôt.
- 35

- 5
22. Procédé de réalisation d'un élément magnétique tricouches selon la revendication 17 ou 18, *caractérisé* en ce que la ou les couches O ou O' sont obtenues par dépôt direct de l'oxyde, de l'hydruure ou du nitrure par pulvérisation cathodique radio-fréquence à partir d'un matériau-cible composite d'oxyde, d'hydruure ou de nitrure métallique.
23. Procédé de réalisation d'un élément magnétique tricouches selon la revendication 17 ou 18, *caractérisé* en ce que le dépôt de certaines couches est réalisé à une température différente de la température ambiante.
- 10 24. Procédé de réalisation d'un élément magnétique tricouches selon la revendication 17 ou 18, *caractérisé* en ce que le dépôt de certaines couches est suivi d'un traitement thermique à une température supérieure à ladite température de dépôt.
- 15 25. Procédé de réalisation d'un élément magnétique tricouches selon l'une quelconque des revendications 17 à 24, *caractérisé* en ce qu'après réalisation des étapes de dépôt, on soumet l'ensemble ainsi obtenu à un traitement thermique pendant un temps plus ou moins long, dans une atmosphère raréfiée, afin de modifier la structure et/ou les propriétés de transport électrique et/ou les propriétés magnétiques de l'élément magnétique.
- 20 26. Procédé de réalisation d'un élément magnétique tricouches selon l'une quelconque des revendications 17 à 24, *caractérisé* en ce qu'après réalisation des étapes de dépôt, on soumet l'ensemble ainsi obtenu à un traitement thermique pendant un temps plus ou moins long, en présence d'un certain gaz ou mélange de différents gaz, afin de modifier la structure et/ou les propriétés de transport électrique et/ou les propriétés magnétiques de l'élément magnétique.
- 25 27. Procédé de réalisation d'un élément magnétique tricouches selon l'une des revendications 25 et 26, *caractérisé* en ce que ces différents traitements thermiques pendant ou après dépôt sont effectués en présence d'un champ magnétique extérieur apte à modifier les propriétés magnétiques dudit élément magnétique.
- 30 28. Capteur de champ magnétique *caractérisé* en ce qu'il est constitué d'un élément magnétique tricouches selon l'une quelconque des revendications 1 à 16, présentant un champ d'anisotropie perpendiculaire contrebalançant presque son champ démagnétisant.
- 35

- 5
29. Mémoire magnétique *caractérisée* en ce qu'elle est constituée d'un élément magnétique tricouches selon l'une quelconque des revendications 1 à 16, dans lequel l'aimantation de la couche magnétique est orientée perpendiculairement au plan des couches en l'absence de champ magnétique extérieur.
- 10
30. Mémoire magnétique *caractérisée* en ce qu'elle est constituée d'un élément magnétique tricouches selon l'une quelconque des revendications 1 à 16, dans lequel l'aimantation de la couche magnétique est orientée perpendiculairement au plan des couches sous forme de domaines magnétiques pointant alternativement vers le bas et vers le haut.
- 15
31. Porte logique magnétique *caractérisée* en ce qu'elle est constituée d'un élément magnétique tricouches selon l'une quelconque des revendications 1 à 16, dans lequel l'aimantation de la couche magnétique est orientée perpendiculairement au plan des couches en l'absence de champ magnétique extérieur.
- 20
32. Procédé pour la mise en oeuvre d'un capteur de champ magnétique, d'une mémoire magnétique ou d'une porte logique magnétique selon l'une des revendications 28 à 31, *caractérisé* en ce que l'orientation de l'aimantation de la couche magnétique de l'élément magnétique est détectée par mesure de l'Effet Hall Extraordinaire par circulation d'un courant électrique dans une direction parallèle au plan des couches.
- 25
33. Procédé pour la mise en oeuvre d'un capteur de champ magnétique, d'une mémoire magnétique ou d'une porte logique magnétique selon l'une des revendications 28 à 31, *caractérisé* en ce que l'orientation de l'aimantation de la couche magnétique de l'élément magnétique est détectée par mesure de l'Effet Kerr ou de l'Effet Faraday magnéto-optiques.
- 30
34. Procédé pour la mise en oeuvre d'un capteur de champ magnétique, d'une mémoire magnétique ou d'une porte logique magnétique selon l'une des revendications 28 à 31, *caractérisé* en ce que l'orientation de l'aimantation de la couche magnétique de l'élément magnétique est détectée par mesure de la magnétorésistance par circulation d'un courant électrique dans une direction sensiblement perpendiculaire au plan des couches.
- 35
35. Procédé pour la mise en oeuvre d'une mémoire magnétique ou d'une porte logique magnétique selon l'une des revendications 28 à 31, *caractérisé* en ce que l'orientation de l'aimantation de la couche magnétique de l'élément magnétique est détectée par mesure de la magnétorésistance d'un capteur magnétorésistif situé à proximité de l'élément magnétique.

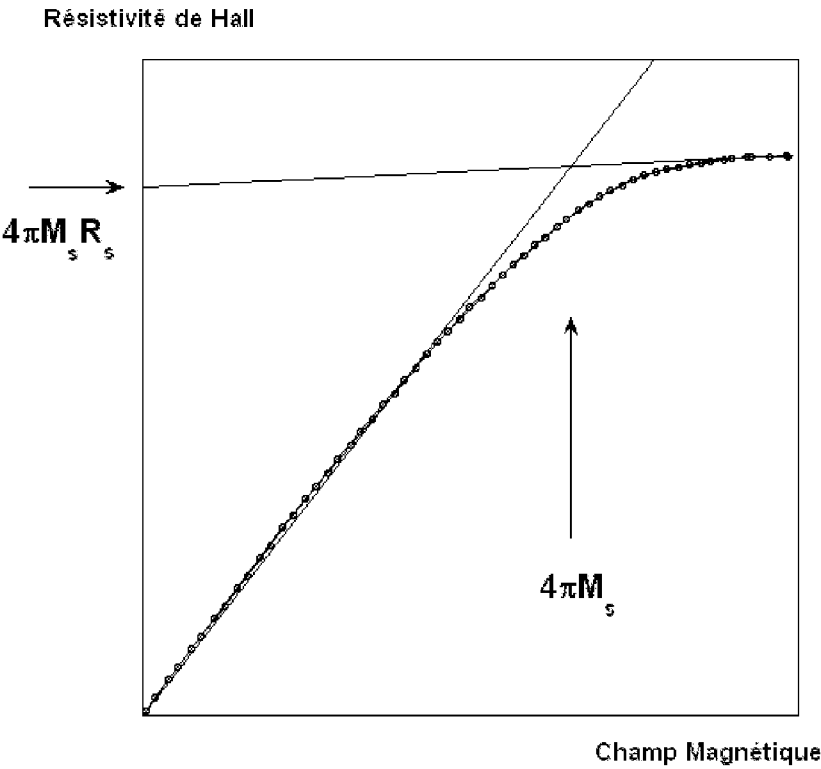


Figure 1

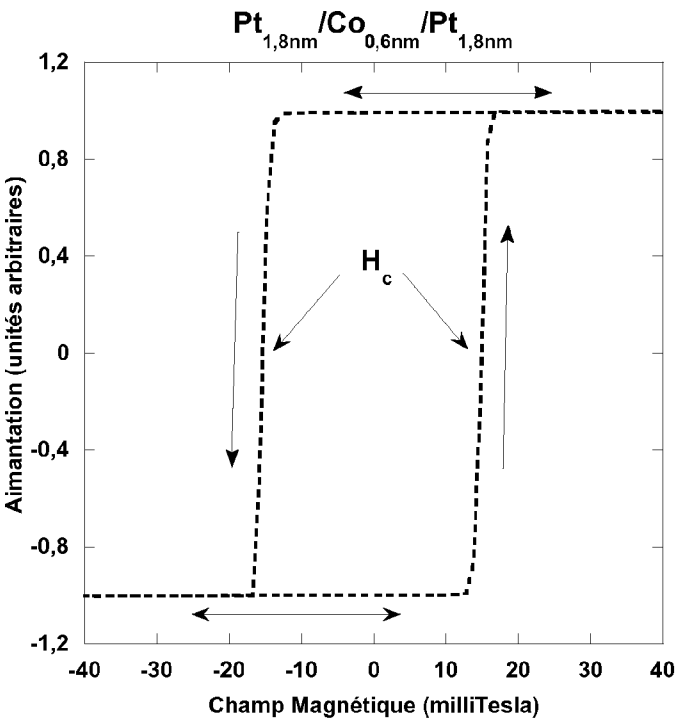
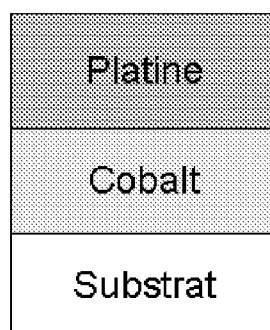
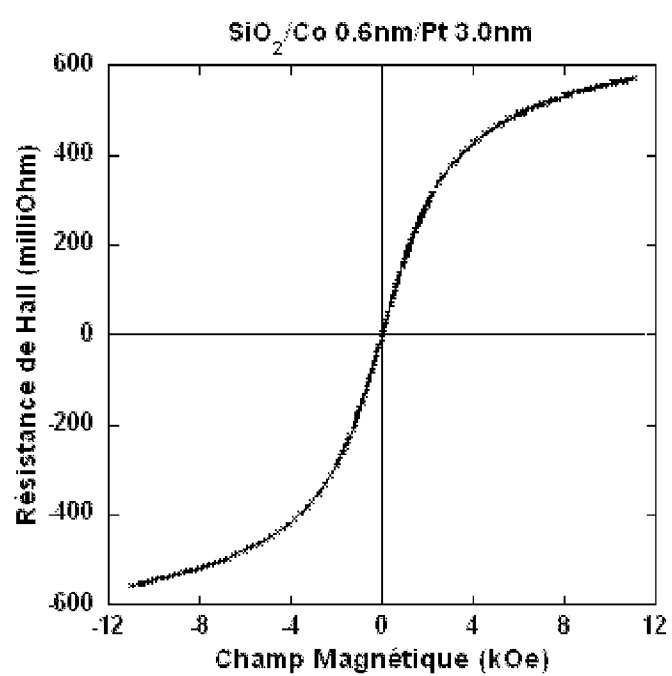


Figure 2

2 / 8

**Figure 3****Figure 4**

3 / 8

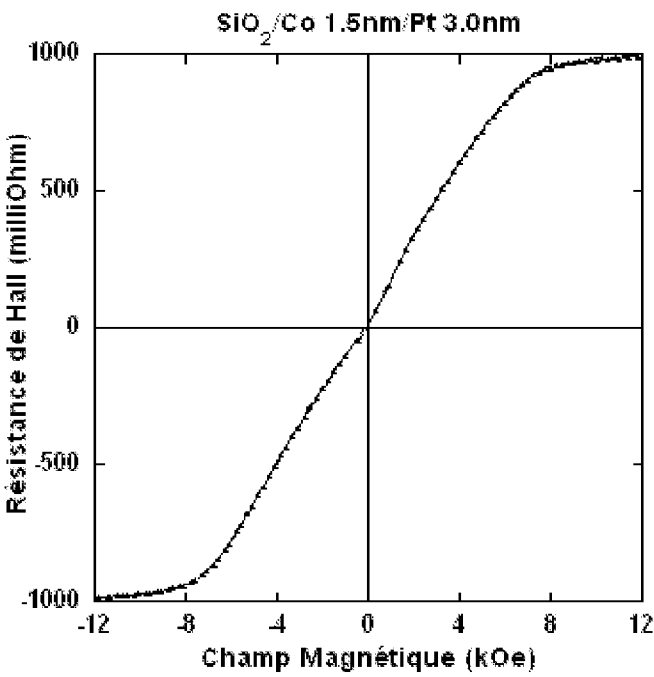


Figure 5

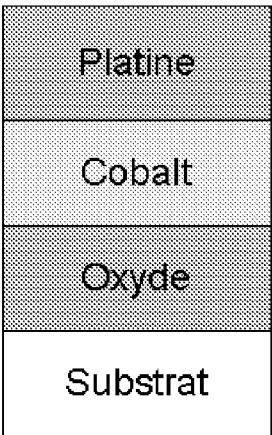


Figure 6

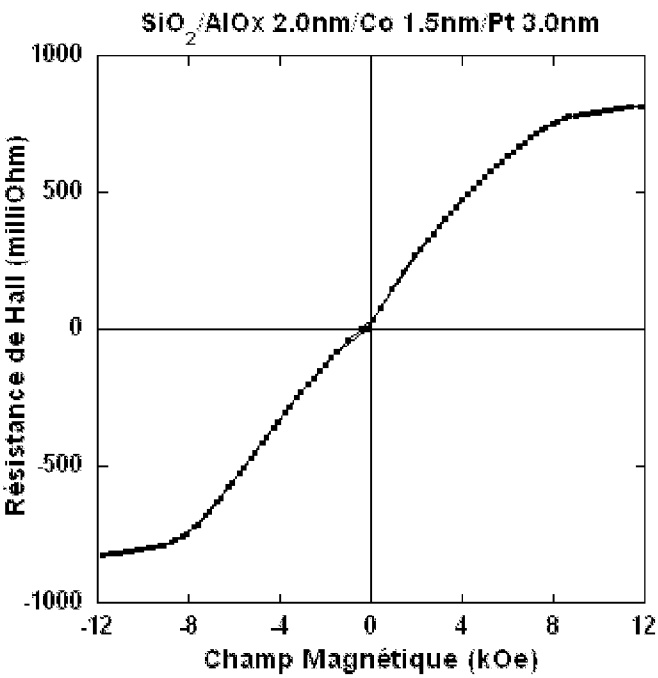


Figure 7

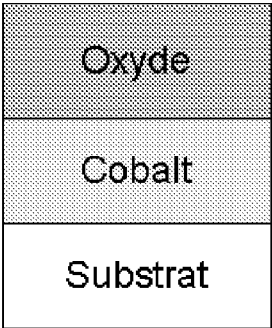
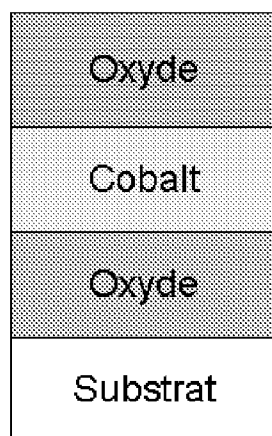
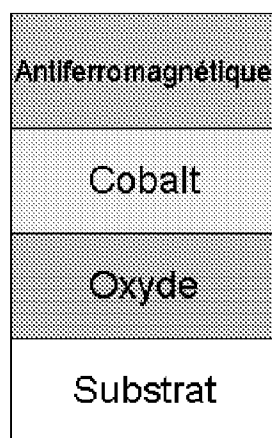
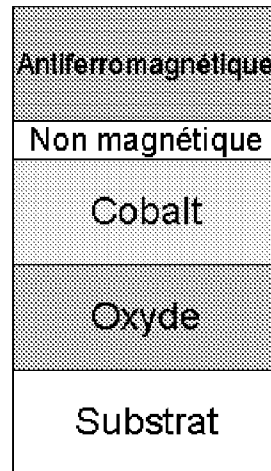
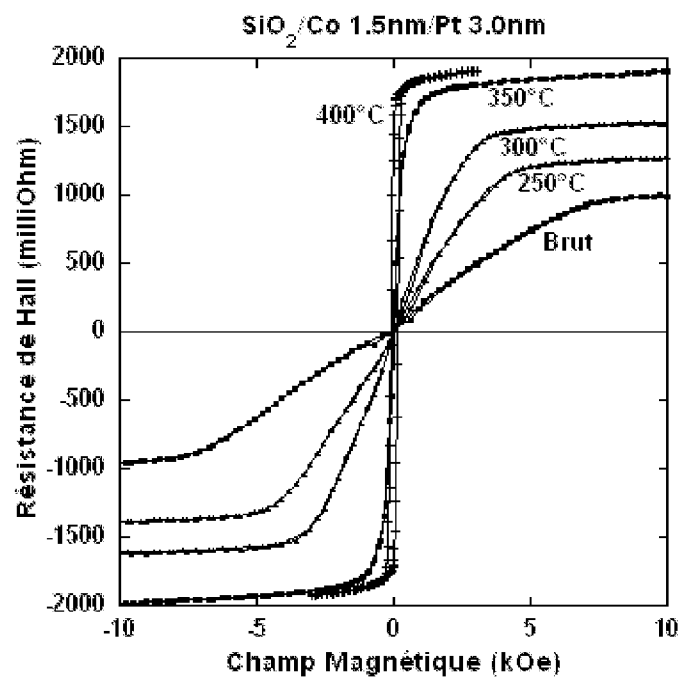


Figure 8

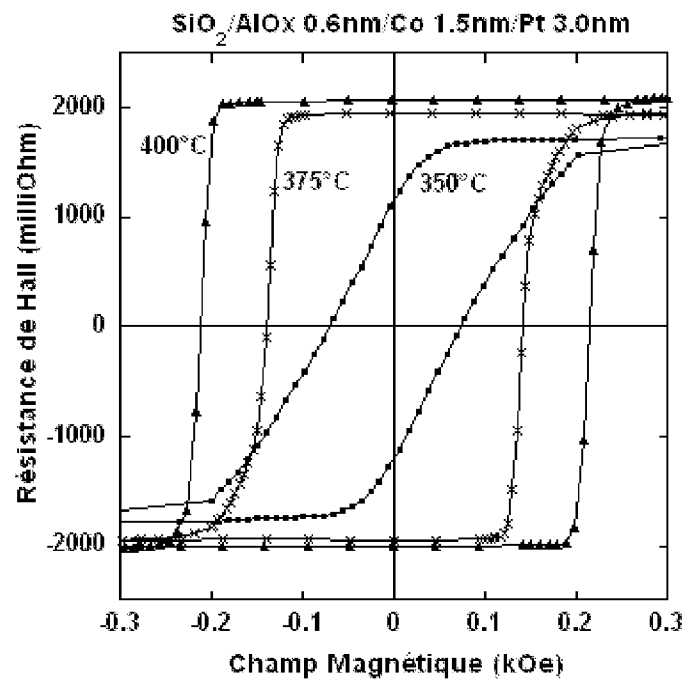
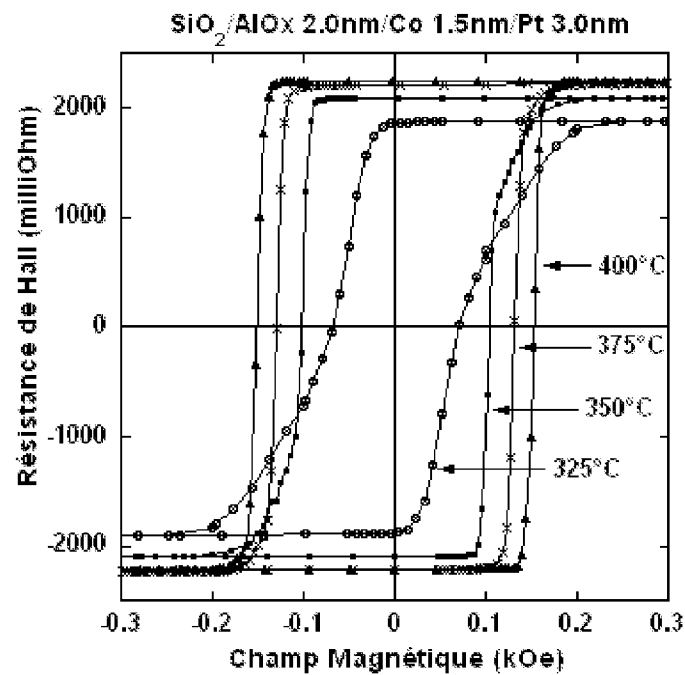
5 / 8

Figure 9Figure 10

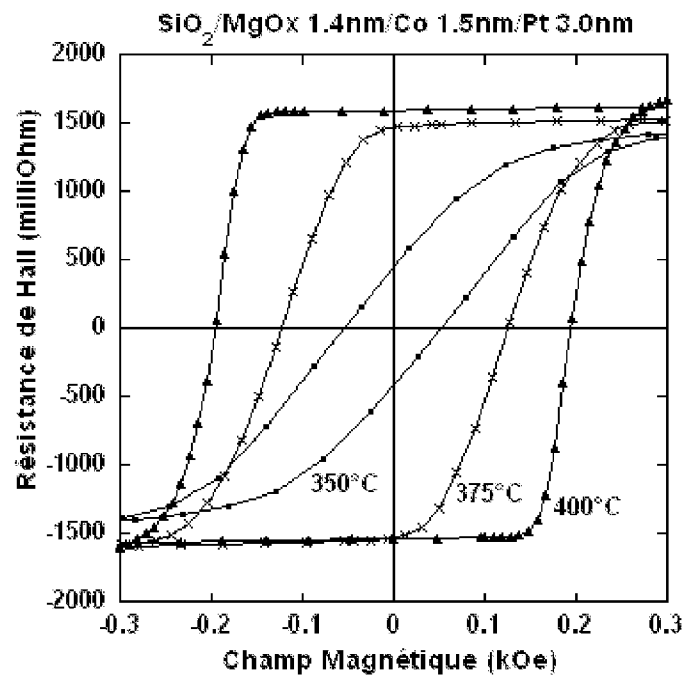
6 / 8

**Figure 11****Figure 12**

7 / 8

Figure 13Figure 14

8 / 8

**Figure 15**

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/FR2009/051062

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

INV. H01L43/06 H01L43/14 H01F10/12
ADD. G01R33/07 G11C11/02

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H01L H01F

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data, INSPEC

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	RODMACQ B ET AL: "Crossovers from in-plane to perpendicular anisotropy in magnetic tunnel junctions as a function of the barrier degree of oxidation" JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS. NEW YORK, US, vol. 93, no. 10, 15 May 2003 (2003-05-15), pages 7513-7515, XP012058203 ISSN: 0021-8979	17,19-27
A	page 7514, left-hand column, paragraph 1 - page 7515, left-hand column, paragraph 1 -----	1
A	EP 0 505 783 A (FUJI PHOTO FILM CO LTD [JP]) 30 September 1992 (1992-09-30) page 3, line 25 - page 5, line 52 ----- -/--	1,6



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier document but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

3 décembre 2009

Date of mailing of the international search report

14/12/2009

Name and mailing address of the ISA/

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Steiner, Markus

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/FR2009/051062

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	GARCIA F ET AL: "Exchange-biased spin valves with perpendicular magnetic anisotropy based on (Co/Pt) multilayers" JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS. NEW YORK, US, vol. 93, no. 10, 15 May 2003 (2003-05-15), pages 8397-8399, XP012058489 ISSN: 0021-8979 page 8397, right-hand column, paragraph 2 - page 8399, left-hand column, paragraph 2 -----	1,13,14
A	MORITZ J ET AL: "Extraordinary Hall effect in thin magnetic films and its potential for sensors, memories and magnetic logic applications; Potential of extraordinary Hall effect in thin magnetic films" JOURNAL OF PHYSICS D. APPLIED PHYSICS, IOP PUBLISHING, BRISTOL, GB, vol. 41, no. 13, 6 June 2008 (2008-06-06), page 135001, XP020133425 ISSN: 0022-3727 page 1, left-hand column, paragraph 1 - page 3, left-hand column, paragraph 3 -----	1,28-35
A	NAWRATH T ET AL: "MAGNETIC ANISOTROPIES AND MAGNETOTRANSPORT IN CEH2/CO MULTILAYERS" PHYSICAL REVIEW, B. CONDENSED MATTER, AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS. NEW YORK, US, vol. 55, no. 5, PART 01, 1 February 1997 (1997-02-01), pages 3071-3082, XP000658410 ISSN: 0163-1829 page 3073, right-hand column, paragraph 2 - page 3078, left-hand column, paragraph 1 -----	1

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/FR2009/051062

Patent document cited in search report		Publication date		Patent family member(s)		Publication date
EP 0505783	A	30-09-1992	DE	69200172 D1		14-07-1994
			DE	69200172 T2		15-09-1994
			JP	4356721 A		10-12-1992

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/FR2009/051062

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE

INV. H01L43/06 H01L43/14 H01F10/12
 ADD. G01R33/07 G11C11/02

Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)

H01L H01F

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés)

EPO-Internal, WPI Data, INSPEC

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	RODMACQ B ET AL: "Crossovers from in-plane to perpendicular anisotropy in magnetic tunnel junctions as a function of the barrier degree of oxidation" JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS. NEW YORK, US, vol. 93, no. 10, 15 mai 2003 (2003-05-15), pages 7513-7515, XP012058203 ISSN: 0021-8979	17, 19-27
A	page 7514, colonne de gauche, alinéa 1 - page 7515, colonne de gauche, alinéa 1	1
A	EP 0 505 783 A (FUJI PHOTO FILM CO LTD [JP]) 30 septembre 1992 (1992-09-30) page 3, ligne 25 - page 5, ligne 52	1, 6
	-/--	

☒ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents

☒ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

* Catégories spéciales de documents cités:

"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent

"E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date

"L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)

"O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens

"P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

"T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention

"X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément

"Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier

"&" document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée

3 décembre 2009

Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale

14/12/2009

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale

Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2
 NL - 2280 HV Rijswijk
 Tel. (+31-70) 340-2040,
 Fax: (+31-70) 340-3016

Fonctionnaire autorisé

Steiner, Markus

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	GARCIA F ET AL: "Exchange-biased spin valves with perpendicular magnetic anisotropy based on (Co/Pt) multilayers" JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS. NEW YORK, US, vol. 93, no. 10, 15 mai 2003 (2003-05-15), pages 8397-8399, XP012058489 ISSN: 0021-8979 page 8397, colonne de droite, alinéa 2 - page 8399, colonne de gauche, alinéa 2 -----	1,13,14
A	MORITZ J ET AL: "Extraordinary Hall effect in thin magnetic films and its potential for sensors, memories and magnetic logic applications; Potential of extraordinary Hall effect in thin magnetic films" JOURNAL OF PHYSICS D. APPLIED PHYSICS, IOP PUBLISHING, BRISTOL, GB, vol. 41, no. 13, 6 juin 2008 (2008-06-06), page 135001, XP020133425 ISSN: 0022-3727 page 1, colonne de gauche, alinéa 1 - page 3, colonne de gauche, alinéa 3 -----	1,28-35
A	NAWRATH T ET AL: "MAGNETIC ANISOTROPIES AND MAGNETOTRANSPORT IN CEH2/CO MULTILAYERS" PHYSICAL REVIEW, B. CONDENSED MATTER, AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS. NEW YORK, US, vol. 55, no. 5, PART 01, 1 février 1997 (1997-02-01), pages 3071-3082, XP000658410 ISSN: 0163-1829 page 3073, colonne de droite, alinéa 2 - page 3078, colonne de gauche, alinéa 1 -----	1

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/FR2009/051062

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
EP 0505783	A	30-09-1992	DE 69200172 D1 14-07-1994
			DE 69200172 T2 15-09-1994
			JP 4356721 A 10-12-1992