

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 679 669**

51 Int. Cl.:

| | | |
|--------------------|-----------------------------|-----------|
| H01F 41/30 | (2006.01) B82Y 25/00 | (2011.01) |
| H01L 43/06 | (2006.01) B82Y 40/00 | (2011.01) |
| H01L 43/10 | (2006.01) H01F 41/18 | (2006.01) |
| H01L 43/14 | (2006.01) H01F 10/30 | (2006.01) |
| G11C 11/18 | (2006.01) | |
| G11C 11/56 | (2006.01) | |
| H01F 10/32 | (2006.01) | |
| G01R 33/07 | (2006.01) | |
| G01R 33/032 | (2006.01) | |
| G01R 33/09 | (2006.01) | |

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **21.12.2007 PCT/FR2007/052602**
- 87 Fecha y número de publicación internacional: **24.07.2008 WO08087345**
- 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **21.12.2007 E 07872012 (5)**
- 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **25.04.2018 EP 2106612**

54 Título: **Dispositivo magnético multicapas, procedimiento para su realización, sensor de campo magnético, memoria magnética y puerta lógica que implementa un dispositivo de este tipo**

30 Prioridad:

26.12.2006 FR 0655943

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
30.08.2018

73 Titular/es:

**COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE ET
AUX ÉNERGIES ALTERNATIVES (100.0%)
Bâtiment "Le Ponant D" 25, rue Leblanc
75015 Paris, FR**

72 Inventor/es:

**RODMACQ, BERNARD;
AUFFRET, STÉPHANE;
DIENY, BERNARD y
MORITZ, JÉRÔME**

74 Agente/Representante:

ISERN JARA, Jorge

ES 2 679 669 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Dispositivo magnético multicapas, procedimiento para su realización, sensor de campo magnético, memoria magnética y puerta lógica que implementa un dispositivo de este tipo

5 Ámbito técnico de la invención

10 La presente invención está relacionada con el ámbito de los materiales magnéticos, más particularmente destinados a implementarse en calidad de sensores de campo magnético o dentro de las memorias magnéticas de acceso aleatorio no volátiles, que permiten el almacenamiento y la lectura de datos en unos sistemas electrónicos, incluso en la realización de elementos utilizables en el ámbito de la lógica magnética reprogramable.

Estado anterior de la técnica

15 Una de las aplicaciones contempladas por la presente invención se refiere a unos dispositivos magnéticos que permiten la detección de campos magnéticos basada en la medición del Efecto Hall Extraordinario.

20 Existen dos tipos de Efectos Hall: el Efecto Hall Ordinario y el Efecto Hall Extraordinario. El Efecto Hall Ordinario existe en los materiales metálicos o semiconductores dopados y se debe a la fuerza de Lorentz que actúa sobre los electrones por el efecto de un campo magnético. El Efecto Hall Extraordinario existe limitativamente en los materiales ferromagnéticos y es el resultado de la difusión de los electrones por interacción espín-órbita con los momentos magnéticos del material ferromagnético.

25 La figura 1 es una representación de entre otras de una geometría de medición del Efecto Hall. Esquematiza una cruz realizada de un material ferromagnético, de longitud L (según el eje x), de anchura w (según el eje y) y de espesor t (según el eje z), recorrida por una corriente I según el eje x y sometida a un campo magnético H perpendicular al plano (x, y) . Por el efecto de la fuerza de Lorentz que es el resultado del campo magnético aplicado y de las interacciones espín-órbita que acoplan las trayectorias electrónicas con la imantación local del material, las líneas de corriente se curvan en la dirección transversal a la dirección de la corriente y una tensión, denominada tensión de Hall, va a aparecer, con el fin de restablecer el equilibrio. Esta tensión se mide perpendicularmente al sentido de la corriente, o sea, según la dirección y .

Un parámetro característico del efecto Hall es la resistividad de Hall, que se expresa según la expresión:

35
$$\rho_{xy} = (V_{xy} / I)t = R_0H + 4\pi R_s M_z \tag{1}$$

donde:

- 40 ■ V_{xy} es la tensión de Hall medida en el plano (L, w) según una dirección perpendicular a la de la corriente eléctrica,
- I es la intensidad de la corriente inyectada,
- t es el espesor de la película fina,
- R_0 es el coeficiente de Hall Ordinario,
- 45 ■ H es la amplitud del campo magnético aplicado,
- R_s es el coeficiente de Hall Extraordinario y M_z es la componente perpendicular de la imantación de la película fina.

Por otra parte, la corriente I que circula en la película fina genera una tensión longitudinal según la expresión:

50
$$V_{xx} = RI \tag{2}$$

donde $R = \rho_{xx}L/(wt)$ es la resistencia del material y ρ_{xx} su resistividad eléctrica longitudinal (paralelamente a la dirección de la corriente I). Combinando las relaciones (1) y (2), se obtiene:

55
$$V_{xy}/V_{xx} = (w/L) \rho_{xy}/\rho_{xx} \tag{3}$$

60 donde ρ_{xy}/ρ_{xx} es un parámetro sin dimensión llamado ángulo de Hall, que caracteriza la capacidad del material para desviar el flujo de electrones con respecto a la dirección del campo eléctrico longitudinal. Su valor es del orden de algunos puntos porcentuales para los materiales magnéticos usuales. w/L es un factor geométrico que puede ser como mucho del orden de 1.

El primer término de la ecuación (1), R_0H , corresponde a la resistividad de Hall Ordinaria y el segundo término, $4\pi R_s M_z$, corresponde a la resistividad de Hall Extraordinaria. Para unos campos magnéticos relativamente escasos, el Efecto Hall Ordinario es generalmente varios órdenes de magnitud más escaso que el Efecto Hall Extraordinario y, por lo tanto, puede desdarse.

Si la imantación de la película ferromagnética es paralela al plano, lo que es generalmente el caso para unas capas finas, su componente perpendicular M_z aumenta linealmente con el campo magnético aplicado, hasta alcanzar la imantación de saturación M_s . Por lo tanto, en tanto en cuanto M_z es inferior a M_s , la tensión de Hall Extraordinaria es proporcional al campo magnético aplicado.

La figura 2 representa esquemáticamente la variación de la resistividad de Hall con el campo magnético aplicado. Para $H < 4\pi M_s$, la resistividad varía linealmente con el campo aplicado, hasta alcanzar $\rho_{xy} = 4\pi R_s M_s$. Más allá, la resistividad varía linealmente con el campo aplicado con una pendiente R_0 (primer término de la ecuación (1)) mucho más escasa como se ha indicado anteriormente. La región útil de funcionamiento de un sensor de campo magnético basado en este principio está limitada, por lo tanto, a unos valores de campo magnético inferiores a $4\pi M_s$, donde M_s es la imantación de saturación del material magnético considerado.

Es la pendiente de la curva $\rho_{xy}(H)$ la que determina la sensibilidad del campo magnético de un sensor de este tipo, expresada en microohmio centímetro por Tesla ($\mu\Omega\text{cm/T}$). Esta pendiente puede igualmente, teniendo en cuenta el espesor t de la película fina y según la relación $\rho_{xy} = t \times R_{xy}$, expresarse en ohmio por Tesla (Ω/T). Con el fin de maximizar esta pendiente, se puede, o bien aumentar el término R_s de Efecto Hall Extraordinario, o bien disminuir la anisotropía magnética planar del material, con el fin de reducir el campo de saturación perpendicular.

Hay dos mecanismos de difusión espín-órbita implicados en el Efecto Hall Extraordinario, denominados con la expresión anglosajona "*skew scattering*" (literalmente "difusión de través") y "*side-jump effect*" (literalmente "salto de lado").

En consecuencia, el coeficiente de Efecto Hall Extraordinario R_s puede escribirse de la siguiente forma:

$$R_s = a\rho_{xx} + b\rho_{xx}^2 \quad (4)$$

donde ρ_{xx} representa la resistividad longitudinal y a y b son unas constantes positivas. El primer término de la relación (4) corresponde a la "*skew scattering*" y domina generalmente en las aleaciones diluidas a baja temperatura. El segundo término, relacionado con el efecto "*side-jump*", es más importante en las aleaciones de fuerte concentración de impurezas y a alta temperatura.

Por lo tanto, se ve que la elección de un material de fuerte resistividad longitudinal y de fuerte difusión espín-órbita es favorable para maximizar R_s . Esta fuerte resistividad longitudinal es una ventaja igualmente, ya que permite, para unos dispositivos de pequeño tamaño, conservar una respuesta de tensión suficiente limitando al mismo tiempo la corriente que circula en dicho dispositivo a unos valores soportables, por debajo de un valor que conlleva unas modificaciones estructurales irreversibles (fenómenos de electromigración).

La fuerte resistividad longitudinal se obtiene, o bien aumentando el desorden atómico del material (aleación desordenada, por ejemplo), o bien disminuyendo el espesor de la película (se conoce que, para una capa muy fina, la resistividad eléctrica varía aproximadamente como la inversa del espesor de la película). La contribución de difusión espín-órbita se aumenta por una elección de material que contenga unos elementos de número atómico elevado, por ejemplo, el platino, el paladio, el oro o los metales de la serie de las Tierras Raras.

Sin embargo, hay que puntualizar que la incorporación de unos materiales de este tipo está forzosamente limitada de concentración, con el fin de conservar unas buenas propiedades magnéticas para la aleación ferromagnética.

Un segundo medio de aumentar la pendiente de la curva $\rho_{xy}(H)$ es disminuir la anisotropía magnética planar del material, es decir, introducir un término suplementario de signo opuesto al término convencional $4\pi M_s$. Este término anotado como H_s puede tener como origen o bien una anisotropía volúmica de origen magnetocristalino o inducida por unas exigencias elásticas de crecimiento, o bien una anisotropía de interfaz debida a unas interacciones electrónicas interfaciales. Un caso tradicional es, por ejemplo, la influencia de una capa de platino en contacto con una capa magnética de cobalto, de níquel o de hierro.

En presencia de este término suplementario, el campo de anisotropía perpendicular H_K puede escribirse de la siguiente forma:

$$H_K = 4\pi M_s - H_s \quad (5)$$

De una manera cualitativa, el campo de anisotropía perpendicular H_K va, por lo tanto, a disminuir de forma regular cuando H_s va a aumentar, siendo todavía la imantación de la capa magnética paralela al plano, hasta tender hacia cero, límite por debajo del que, cuando H_s es superior a $4\pi M_s$, la imantación de la capa magnética es espontáneamente (es decir, sin campo magnético aplicado) perpendicular al plano de la capa. En este último caso, el material magnético posee dos estados estables de campo nulo y, por lo tanto, puede integrarse en unos dispositivos tales como memorias magnéticas o puertas lógicas magnéticas.

La figura 3 es una representación esquemática de la curva de imantación obtenida en esta situación, para una muestra tradicional de composición $Pt_{1,8nm}/Co_{0,6nm}/Pt_{1,8nm}$. Esta curva puede obtenerse o bien por medición convencional de magnetometría, o bien por medición del Efecto Hall, o bien también por medición del Efecto Kerr o del Efecto Faraday magneto-óptico. Las flechas indican el sentido de recorrido del ciclo magnético cuando se aplica la excitación magnética H indicada en abscisa. Las flechas monodireccionales representan las evoluciones irreversibles de los ciclos, mientras que las flechas bidireccionales representan sus evoluciones reversibles. En ordenada, los niveles de imantación se dan en unidades arbitrarias.

Reduciendo progresivamente el campo magnético aplicado en un valor positivo, por ejemplo, a un valor nulo, la imantación de la capa magnética permanece perpendicular a su plano y orientada en el sentido de este campo magnético anteriormente aplicado. Entonces, es necesario aplicar un campo magnético de sentido opuesto, de amplitud más o menos grande, con el fin de reorientar la imantación de la capa, siempre en una dirección perpendicular al plano, pero en un sentido opuesto, esto es, en el sentido de este nuevo campo magnético aplicado.

El campo magnético necesario para esta basculación, más precisamente el campo magnético que hay que aplicar para que la imantación, promediada sobre el conjunto de los ámbitos magnéticos, sea nula, se llama campo coercitivo y se denomina H_C en la figura 3. El valor de este campo coercitivo va a determinar la estabilidad de la imantación, en un sentido o en el otro, respecto a las perturbaciones magnéticas exteriores.

Cuanto más fuerte es este campo coercitivo, más estable es el material respecto a estas perturbaciones. Pero también, en este caso, más difícil es modificar intencionadamente la dirección de la imantación, como, por ejemplo, en el marco de la utilización de este material en calidad de memoria magnética, para la que la información está justamente codificada por el sentido de la imantación.

Por lo tanto, se puede preferir un campo coercitivo escaso que necesita menos energía para conseguir hacer bascular la imantación, con, tal vez en este caso, necesidad de "blindar" magnéticamente el dispositivo respecto a las perturbaciones magnéticas exteriores o, si no, preferir un campo coercitivo fuerte, lo que hace el dispositivo más estable, pero más consumidor de energía.

Hay que mencionar igualmente que se pueden utilizar otras formas de determinar la orientación y la amplitud de la imantación de una capa magnética.

Por ejemplo, se puede medir la resistencia eléctrica de una tricapa formada por dos capas magnéticas independientes separadas por un metal no magnético o por una capa de óxido, estando la imantación de una de las dos capas magnéticas atrapada en una dirección determinada. La resistencia eléctrica de este apilamiento es más escasa en el caso en que las dos imantaciones son paralelas, comparado con el caso en que las imantaciones son antiparalelas (fenómeno bien conocido de magnetorresistencia gigante o túnel).

Se pueden utilizar igualmente los efectos magneto-ópticos, en los que la interacción entre la luz incidente y los momentos magnéticos de la capa magnética provoca una rotación del plano de polarización de la luz incidente, así como una modificación de su elipticidad.

Existen en la literatura algunos materiales que pueden presentar algunas de las características expuestas más arriba.

Se pueden citar, por ejemplo, los sistemas multicapas bien conocidos cobalto/platino, que presentan una fuerte anisotropía magnética perpendicular. En función de los espesores de las capas elementales de platino y de cobalto, del número de repeticiones del motivo (Co/Pt) y de la presencia de una capa tampón de platino, se puede obtener, o bien un sistema que presenta una imantación espontáneamente (de campo magnético nulo) perpendicular al plano de las capas, o bien una imantación en el plano de las capas, pero que presenta una muy fuerte susceptibilidad magnética perpendicular (pendiente de la capa $M_z = f(H)$). Desafortunadamente, estos materiales presentan una resistividad longitudinal escasa, debida a la escasa resistividad de sus componentes metálicos.

Otro ejemplo, descrito en la publicación de T. W. Kim, S. H. Lim, R. J. Gambino, "*Spontaneous Hall effect in amorphous Tb-Fe and Sm-Fe thin films*", Journal of Applied Physics, 2001, Vol. 89, p. 7212, se refiere a las aleaciones RE-TM, en las que RE designa un elemento de la familia de las Tierras Raras (Gd, Tb, Sm) y TM un elemento magnético de Transición (Fe, Co, Ni o sus aleaciones). Estos materiales presentan un ángulo de Hall elevado (del orden de un 4 %), una resistividad longitudinal más fuerte que en el caso anterior, pero, por el contrario, una sensibilidad al campo magnético escasa, del orden de $0,4 \Omega/T$.

Las aleaciones de platino y de un Metal de Transición magnética (Fe, Co, Ni) presentan, por su parte, unas sensibilidades al campo magnético más fuertes, del orden de $4 \Omega/T$ y unas resistividades longitudinales del orden de $100 \mu\Omega\text{cm}$ (véase, por ejemplo, G. X. Miao, Gang Xiao, "*Giant Hall resistance in Pt-based ferromagnetic alloys*", Applied Physics Letters, 2004, Vol. 85, p. 73).

Se alcanzan más o menos unas sensibilidades al campo equivalentes con unas aleaciones de un material magnético y de un óxido, por ejemplo, Ni-SiO₂ (véase A. B. Pakhomov, X. Yan, B. Zhao, "Giant Hall effect in percolating ferromagnetic granular metal-insulator films", Applied Physics Letters, 1995, Vol. 67, p. 3497). En ese caso, la ventaja reside en la resistividad longitudinal muy elevada, del orden de 10⁵ a 10⁸ μΩcm, pero el ángulo de Hall es escaso (algunos 0,1 %) y la relación señal a ruido mediocre.

Finalmente, se han obtenidos unas sensibilidades al campo magnético muy elevadas (300 Ω/T) en unas películas finas de níquel. Desafortunadamente, esta sensibilidad, obtenida a baja temperatura (-100 °C), disminuye muy rápidamente para alcanzar un valor casi nulo a temperatura ambiente, lo que limita considerablemente el ámbito de aplicación de estos materiales (véase O. Riss, A. Tsukernik, M. Karpovsky, A. Gerber, "Reorientation phase transition and sensitivity of the extraordinary Hall-effect-based sensors", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2006, Vol. 298, p. 73).

De estas consideraciones resulta que ninguno de los materiales magnéticos conocidos actualmente reúne todas las propiedades necesarias para su utilización en calidad de sensor de campo magnético o memoria magnética, esto es, fuerte resistividad longitudinal (al menos algunos cientos de μΩcm), fuerte resistividad de Hall (algunos puntos porcentuales de la resistividad longitudinal) y fuerte susceptibilidad magnética perpendicular (al menos diez veces más fuerte que para un material magnético convencional de imantación planar, es decir, con un campo de saturación fuera del plano como mucho del orden de algunas decenas de miliTeslas), incluso más bien imantación perpendicular de campo nulo para las aplicaciones de tipo memorias magnéticas o puertas lógicas magnéticas. A este respecto, se puede recordar que los sensores de campo magnético semiconductores presentan actualmente unas sensibilidades al campo magnético del orden de algunos 100 Ω/T.

En otro plano, ya se han propuesto en la literatura unos apilamientos de capas que se parecen a los de la presente invención, pero no con una finalidad de aplicación en unos dispositivos de tipo sensores de campo magnético, memorias magnéticas o componentes lógicos magnéticos.

En primer lugar, se pueden citar unos trabajos que se refieren a unas multicapas compuestas por capas de cobalto que alternan con unas capas de alúmina (Al₂O₃) (véase Ch. Morawe, H. Zabel, "Structure and thermal stability of sputtered metal/oxide multilayers: the case of Co/Al₂O₃", Journal of Applied Physics, 1995, Vol. 77, p. 1969). En esta publicación, los autores no mencionan ninguna eventual propiedad de anisotropía magnética perpendicular de estos materiales, objeto de la presente invención.

Además, estos autores no destinan en absoluto, contrariamente a la presente invención, estos materiales a una utilización en el ámbito de los sensores de campo magnético o de las memorias o componentes lógicos magnéticos basados, en concreto, en la medición del Efecto Hall Extraordinario. De hecho, los autores proponen utilizar estos materiales únicamente por sus propiedades estructurales en el marco de espejos para los rayos X. Por lo tanto, estos trabajos no competen al campo de aplicación contemplado por la presente invención.

Se pueden citar igualmente unos trabajos que se refieren a unas multicapas "discontinuas" compuestas por capas de cobalto o de aleaciones cobalto-hierro que alternan con unas capas de sílice SiO₂ o de alúmina Al₂O₃ (véase 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). Por el término "discontinuas", los autores hacen referencia al hecho de que las capas de Co o CoFe no están en forma de capa fina de espesor casi uniforme, sino más bien en forma de agregados de Co o CoFe recubiertos en la matriz de óxido. Estos sistemas se preparan por pulverización catódica depositando alternativamente las capas de metal magnético y las capas de óxidos. Los átomos de Co o de CoFe tienden a coalescer en forma de islotes disjuntos, lo que conduce a una estructura en plano de agregados más o menos independientes, según el espesor de metal depositado, sumidos en la matriz aislante.

En estas estructuras, solo se conserva, por lo tanto, el "recuerdo" de esta capa fina de Co o CoFe, lo que es una situación completamente diferente de la considerada en la presente invención. En estos estudios relativos a las multicapas discontinuas metal/aislante, no se hace ninguna mención a eventuales propiedades de anisotropía magnética perpendicular de estos materiales. Por último, estos autores tampoco destinan estos materiales a una utilización en el ámbito de los sensores de campo magnético o de las memorias o componentes lógicos magnéticos basados, en concreto, en la medición del Efecto Hall Extraordinario. Por lo tanto, estos trabajos tampoco competen al campo de aplicación contemplado por la presente invención.

También se pueden citar unos trabajos que se refieren a unas multicapas fabricadas por depósito de una aleación cobalto-hierro seguido de una oxidación natural de la superficie de esta aleación en presencia de oxígeno (véase 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 Magnetism, 2005, Vol. 41, p. 2043, y 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 Magnetism, 2005, Vol. 41, p. 2053).

Estas multicapas presentan una fuerte resistividad eléctrica, un fuerte momento magnético y una gran "suavidad" magnética (facilitado para saturar la imantación en una dirección paralela al plano de las capas). Los autores no mencionan propiedad especial en cuanto a la amplitud del Efecto Hall Extraordinario. Aunque presentan unos resultados que parecen indicar una tendencia a la aparición de una cierta anisotropía perpendicular para los escasos espesores de metal magnético, un examen más preciso de los resultados muestra que la reducción observada de la amplitud del campo de anisotropía perpendicular H_K es esencialmente debida a una disminución del término $4\pi M_s$ (véase relación (5)) y no a una contribución cualquiera de un término de anisotropía perpendicular H_s .

De la misma manera, los autores predicen que la imantación es espontáneamente perpendicular al plano de las capas para unos espesores de metal magnético inferiores a 1,1 nanómetro, mientras que al mismo tiempo presentan unos resultados para un espesor de 1,0 nanómetro, por lo tanto, inferior a este límite, que muestran sin ambigüedad que la imantación es, en este caso, paralela al plano de las capas y no perpendicular.

Por último, se pueden citar unos trabajos que se refieren a unos apilamientos constituidos por dos multicapas (Pt/Co) y Co/Pt) separadas por una capa de óxido NiO (véase 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).

En este documento, resulta que las dos multicapas a ambos lados de la capa de NiO tendrían su imantación perpendicular al plano de las capas en ausencia de la capa de NiO. Esto se desprende claramente de la comparación de la figura 2 (presencia de la capa de NiO) y de la figura 3 (ausencia de la capa de NiO), figuras que muestran que en los dos casos la imantación de las capas magnéticas está orientada perpendicularmente al plano de las capas. En otras palabras, por lo tanto, no es la presencia de la capa separadora de NiO la que confiere a este apilamiento sus propiedades de anisotropía magnética perpendicular.

El documento CN 1588539 A describe una multicapa con una alternancia de las capas ferromagnéticas y NiO.

Exposición de la invención

La presente invención propone un medio de realización de un dispositivo magnético de multicapas que presenta un campo de anisotropía fuera del plano de un valor cercano a su campo desmagnetizante, de modo que el dispositivo posee una gran sensibilidad al campo magnético, que puede detectarse por la medición del Efecto Hall Extraordinario o también la medición de la magnetorresistencia o la medición del Efecto Kerr o del Efecto Faraday magneto-óptico. El material utilizado permite reunir las ventajas de los diferentes materiales citados más arriba, esto es, una fuerte anisotropía perpendicular que puede compensar o incluso rebasar la anisotropía de forma propia para las capas finas y en el caso particular de la medición del Efecto Hall, una fuerte resistividad longitudinal y un fuerte coeficiente de Hall extraordinario.

De este modo, la invención contempla un dispositivo magnético multicapas, que incluye, sobre un substrato, una alternancia de capas metálicas magnéticas M y de óxidos, de hidruros o de nitruros O, en el que, el número de capas M es al menos igual a dos y en el que las capas M son continuas.

Además, existe una anisotropía magnética interfacial perpendicular al plano de las capas en las interfaces M/O y O/M para una gama de temperatura igual o superior a la temperatura ambiente, adecuada para orientar la imantación de las capas M sustancialmente de manera perpendicular al plano de las capas.

La fuerte anisotropía magnética perpendicular mencionada más arriba se obtiene, como en el caso de las multicapas cobalto/platino, por unos efectos de exigencia y de hibridación electrónica en las interfaces entre las capas magnéticas y las capas de óxidos, de hidruros o de nitruros. Como en el sistema (Co/Pt), las capas magnéticas deben ser, por lo tanto, finas (algunos nanómetros), con el fin de que estos efectos de interfaces no se vuelvan desdeñables frente a la anisotropía magnética volumétrica de forma, que tiende a mantener la imantación de la capa magnética en el plano.

La fuerte resistividad longitudinal se obtiene por la utilización de capas magnéticas finas, por lo tanto, de fuerte resistividad por el hecho del papel importante que juegan las difusiones interfaciales, que alternan con unas capas de óxido, de nitruro o de hidruro. Al estar el conjunto de estas capas repetido solo un escaso número de veces (tradicionalmente menos de 20 repeticiones) para obtener la estructura multicapa final, la resistencia eléctrica del conjunto del apilamiento es, por lo tanto, elevada.

Según la invención, las capas metálicas magnéticas M presentan un espesor inferior o igual a 5 nanómetros y están constituidas por un material magnético, por una aleación magnética o por una multicapa formada por la alternancia de materiales no magnéticos y magnéticos, eligiéndose estos últimos en el grupo constituido por Fe, Ni, Co o sus aleaciones.

Las capas O de óxidos, de hidruros o de nitruros presentan un espesor al menos igual a 0,3 nanómetro y están realizadas a base de elementos elegidos en el grupo que comprende Al, Mg, Ru, Ta, Cr, Zr, Hf, Ti, V, Si, Cu, W, Co,

Ni, Fe o sus aleaciones y más generalmente de cualquier material o aleación susceptible de formar unos óxidos, hidruros o nitruros estables.

5 Ventajosamente, el substrato que recibe el apilamiento anteriormente citado está realizado de silicio recubierto de silicio oxidado térmica o naturalmente sobre un espesor comprendido entre 2 y 500 nanómetros.

No obstante, dicho substrato puede estar realizado de un material transparente tal como, por ejemplo, vidrio u óxido de magnesio.

10 Según una característica ventajosa de la invención, el dispositivo incluye un material S que sirve de iniciador de crecimiento para la primera capa metálica M, elegido en el grupo que comprende el TiN, CuN, Pt, Ta, Ru, IrMn, PtMn, NiFeCr, los óxidos y los nitruros.

15 Según otra característica ventajosa de la invención, una al menos de las capas metálicas M contiene unas adiciones de metales no magnéticos Pd o Pt, que sirven para modificar las propiedades de anisotropía magnética perpendicular de esta capa o de elementos elegidos en el grupo que comprende Si, C, B, P, N, que sirven para modificar la resistividad eléctrica de esta capa y/o su imantación por unidad de volumen.

20 Según la invención, todas las capas M están realizadas de un mismo material magnético y todas las capas O están realizadas de un mismo material no magnético. No obstante, la composición química de al menos una de las capas metálicas M puede ser diferente de las otras. Asimismo, la composición química de al menos una de las capas O puede ser diferente de las otras.

25 Además, todas las capas O pueden presentar el mismo espesor. No obstante, el espesor de al menos una de las capas O puede ser diferente de las otras.

Asimismo, el espesor de al menos una de las capas metálicas M puede ser diferente de las otras.

30 Según la invención, al menos una de las capas O puede estar constituida ella misma por una pluralidad de capas realizadas de óxido, de hidruro o de nitruro.

Ventajosamente:

- 35 ■ la capa S presenta un espesor comprendido entre 0 y 2 nanómetros,
- cada capa metálica M presenta un espesor comprendido entre 0,3 y 5 nanómetros,
- cada capa O presenta un espesor comprendido entre 0,3 y 5 nanómetros,
- el número de alternancias de capas M y O está comprendido entre 1,5 y 20.

40 El dispositivo magnético de la invención presenta ventajosamente unas dimensiones laterales inferiores a 1 micrómetro.

La invención se refiere igualmente a un procedimiento de realización del dispositivo magnético en cuestión. Este procedimiento consiste:

- 45 - en depositar sobre una superficie eléctricamente aislante una primera capa metálica magnética M por pulverización catódica,
- en depositar una primera capa del metal constitutivo de la capa O sobre esta primera capa M por pulverización catódica,
- en oxidar, hidrurar o nitrurar esta primera capa O,
- 50 - en repetir las tres etapas anteriores o la primera de entre ellas solamente,
- en depositar un contacto eléctrico.

Alternativamente, las segunda y tercera etapas pueden constituir una sola en ello, esto es, el depósito directo, por pulverización de radiofrecuencia, de la capa O de óxido, de hidruro o de nitruro a partir de una diana compuesta por el óxido, por el hidruro o por el nitruro correspondiente.

55 Ventajosamente, el depósito de la primera capa metálica M está antecedido por una preetapa, que consiste en depositar sobre el substrato una capa realizada de un material S iniciador de crecimiento. Esta preetapa es susceptible ella misma de estar antecedita por un depósito sobre el substrato de una capa de un material conductor eléctrico.

60 Según el procedimiento de la invención, se deposita una capa conductora de la electricidad sobre el dispositivo; entonces, este se talla en forma de un pilar de base cuadrada, rectangular, circular o elíptica, con unas dimensiones laterales de algunos cientos de nanómetros o menos.

65

Según la invención, se mide la magnetorresistencia del apilamiento realizado de este modo haciendo recorrer este último por una corriente perpendicularmente al plano de las capas que lo constituyen.

5 Según una variante de la invención, las capas O se obtienen por oxidación, hidruración o nitruración natural de la capa metálica

Según otra variante, las capas O se obtienen por oxidación, hidruración o nitruración por procedimiento por plasma de la capa metálica.

10 Según también otra variante de la invención, las capas O se obtienen por pulverización reactiva en presencia de oxígeno, de hidrógeno o de nitrógeno en la atmósfera de la cámara de depósito.

15 Según también otra variante de la invención, las capas O se obtienen por depósito directo del óxido, del hidruro o del nitruro por pulverización catódica de radiofrecuencia a partir de un material-diana compuesto por óxido, por hidruro o por nitruro metálico.

20 Según la invención, el depósito de algunas capas se realiza a una temperatura diferente de la temperatura ambiente. Por ejemplo, algunas capas de óxidos, de hidruros o de nitruros pueden tener una mejor calidad estructural si se les hace crecer a temperatura elevada (por ejemplo, 200 °C). Por otra parte, el depósito de una capa puede estar seguido, además, de un tratamiento térmico a una temperatura superior a dicha temperatura de depósito. Esto puede ser el caso, por ejemplo, para favorecer la oxidación o la nitruración de una capa o también permitir la cristalización de una capa amorfa.

25 Por otra parte, después de realización de las etapas de depósito, se puede someter el conjunto obtenido de este modo a un tratamiento térmico durante un tiempo más o menos largo, en una atmósfera enrarecida o en presencia de un cierto gas o mezcla de diferentes gases, tales como el oxígeno, el hidrógeno o el nitrógeno, por ejemplo, con el fin de modificar la estructura y/o las propiedades de transporte eléctrico y/o las propiedades magnéticas del dispositivo.

30 La invención contempla un sensor de campo magnético constituido por el dispositivo magnético multicapas de la invención, presentando este último un campo de anisotropía perpendicular que contrarresta casi su campo desmagnetizante.

35 La invención contempla igualmente una memoria magnética constituida por el dispositivo magnético multicapas en cuestión, en el que las capas magnéticas tienen su imantación perpendicular al plano de las capas en ausencia de campo magnético exterior.

40 La invención se refiere igualmente a una puerta lógica magnética constituida por dicho dispositivo magnético multicapas, en el que las capas magnéticas tienen su imantación perpendicular al plano de las capas en ausencia de campo magnético exterior.

Con el fin de determinar la orientación de las imantaciones de las capas magnéticas del dispositivo magnético que las compone:

- 45
- se mide el Efecto Hall Extraordinario por inyección de una corriente eléctrica en una dirección paralela al plano de las capas,
 - o se mide la magnetorresistencia por inyección de una corriente eléctrica en una dirección perpendicular al plano de las capas;
 - o también, se mide el Efecto Kerr o el Efecto Faraday magneto-óptico.
- 50

Breve descripción de los dibujos

55 La figura 1 es una representación esquemática de un ejemplo de modo de medición del Efecto hall Extraordinario de una muestra magnética.

La figura 2 es una representación esquemática de una curva de imantación característica de un dispositivo magnético de la técnica anterior.

La figura 3 es una representación esquemática de la variación tradicional de la imantación en función del campo magnético para un material de anisotropía magnética perpendicular.

60 Estas tres primeras figuras ya se han descrito en relación con el estado anterior de la técnica. La figura 4 es una representación esquemática de una primera forma de realización del dispositivo magnético conforme con la invención.

La figura 5 presenta la variación de la resistencia de Hall en función del campo magnético perpendicular para una estructura del tipo Pt 0,3nm / (CoFe 0,6nm / Al₂O₃ 2,0nm)₅.

65 La figura 6 es una representación esquemática de una segunda forma de realización del dispositivo magnético conforme con la invención.

La figura 7 representa la variación de la resistencia de Hall en función del campo magnético perpendicular para una estructura del tipo Pt 1,0nm / Co 0,6nm / Al₂O₃ 2,0nm / (CoFe 0,6nm / Al₂O₃ 2,0nm)₅.

La figura 8 es una representación esquemática de una tercera forma de realización del dispositivo magnético conforme con la invención.

La figura 9 presenta la variación de la resistencia de Hall en función del campo magnético perpendicular para una estructura del tipo Pt 1,0nm / Co 0,6nm / Al₂O₃ 2,0nm / (CoFe 0,6nm / Al₂O₃ 2,0nm)₅. La presión de oxígeno es ligeramente inferior a la utilizada en el caso de la figura 7.

La figura 10 representa la variación de la resistencia de Hall en función del campo magnético perpendicular para el apilamiento descrito en relación con las figuras 8 y 9, después de un tratamiento térmico de 30 minutos a 350 °C.

La figura 11 es una representación esquemática de una quinta forma de realización del dispositivo magnético conforme con la invención.

Descripción de los modos particulares de realización de la invención

Sin ser limitativo, y a título de ejemplo, los materiales y las técnicas utilizados en los modos de realización descritos a continuación son los siguientes.

Sobre un substrato, por ejemplo, de silicio, de silicio oxidado, de vidrio o de óxido de magnesio, se deposita una primera capa de un metal no magnético que sirve de capa tampón. Esta capa favorece la adherencia y el buen crecimiento del resto de la estructura.

Aunque no sea indispensable para la invención, esta capa se utilizará para la descripción de los modos de realización preferente. Las diversas capas se describirán a partir de esta primera capa de material no magnético (o a falta de la primera capa M), ya que esto es lo que corresponde al orden de depósito sucesivo de las capas durante la fabricación.

La figura 4 es una representación esquemática de una primera forma de realización conforme con la invención. En esta figura (y las figuras siguientes 6, 8 y 11), la dirección de las flechas indica la dirección, en ausencia de campo magnético aplicado, de la imantación de las capas magnéticas (flecha horizontal para una imantación planar, flecha vertical para una imantación perpendicular).

Inmediatamente después del substrato se encuentra una capa de material iniciador de crecimiento, como, por ejemplo, el platino. Puede sustituirse por otro material o por la combinación de otros materiales que se consideren que convienen para iniciar un buen crecimiento de capas finas metálicas, en concreto, que inducen una muy escasa rugosidad de superficie. Se pueden citar, por ejemplo, el nitruro de titanio, el nitruro de cobre, el rutenio, el tántalo, las aleaciones iridio-manganeso, platino-manganeso, níquel-hierro-cromo, etc. Es posible igualmente no utilizar esta capa inicial, si resulta que las cualidades de crecimiento de la capa magnética sobre el substrato son satisfactorias.

A continuación, se encuentra la primera capa M, cuyo espesor es generalmente escaso. Si este espesor rebasa un cierto valor que depende del material utilizado para la capa M y de la intensidad de las interacciones interfaciales con los materiales en contacto con esta capa magnética M, la imantación ya no es, de manera conocida, perpendicular al plano de la capa por el hecho de la anisotropía volúmica de forma de esta capa M que tiende a mantener la imantación de esta capa en su plano.

Para las capas M siguientes, la elección del espesor está determinada sobre todo por la posibilidad de obtención de una capa metálica continua. De hecho, como se ha argüido anteriormente, algunos metales magnéticos humectan mal sobre los óxidos tales como la sílice o la alúmina. En algunos casos, el metal magnético tiene tendencia a coalescer en forma de islotes más o menos disjuntos según el espesor del metal depositado.

En otros casos, los efectos de tensión superficial son demasiado escasos para que tenga lugar el fenómeno de coalescencia en islotes. Entonces, la capa metálica puede ser continua. La gama de espesores que permiten la obtención de capa continua de metal depende de la energía de superficie del óxido, de la energía de superficie del metal y de la energía interfacial de la interfaz óxido/metal y de la humectabilidad de la superficie de depósito por la capa metálica de aporte. Esta gama de espesor posible para la obtención de capas metálicas continuas depende, por lo tanto, a la vez del metal M y del óxido.

Para un mismo material de base M, se puede modificar el espesor crítico de la capa magnética por agregación de elementos de adición, que mejoran la humectabilidad bajando la energía de superficie del metal en favor de la energía de la interfaz óxido/metal. Según un modo habitual de realización, el material es una aleación magnética Co₉₀Fe₁₀ de espesor comprendido entre 0,3 y 5 nanómetros, tradicionalmente de 0,6 nanómetro.

Con el fin de adaptar las propiedades magnéticas del dispositivo en función de la aplicación contemplada (sensor de campo, dispositivo memoria o puerta lógica) y obtener las mejores prestaciones, en concreto, en cuanto a anisotropía magnética perpendicular y de crecimiento sobre la capa de óxido subyacente, la aleación Co₉₀Fe₁₀ puede sustituirse por una aleación Co_xFe_y de concentración diferente o por una aleación ternaria Co_xNi_yFe_z o por

una aleación, cristalizada o amorfa, de uno o varios de estos materiales magnéticos con otro elemento no magnético, tal como el boro, el silicio, el fósforo y/o el carbono. Igualmente, se puede utilizar una aleación o una multicapa compuesta por un material magnético y por un material no magnético.

5 Igualmente, se puede modificar la naturaleza y el espesor de las capas magnéticas a medida que se produce el apilamiento de las capas. La composición química y el espesor de la primera capa magnética no debe ser forzosamente idéntica a la segunda, que no debe ella misma ser forzosamente idéntica a la enésima en el caso en que la bicapa metal magnético/óxido se repita n veces. Esta modificación puede utilizarse ventajosamente según el tipo de propiedad que se desee favorecer, por ejemplo, buen crecimiento de las capas magnéticas (planicidad, textura) o buenas propiedades de anisotropía perpendicular.

10 Después de la primera capa M se encuentra la primera capa O, preferentemente de óxido de aluminio, cuyo espesor es del orden de 0,3 a 5 nanómetros, no siendo esta última cifra muy crítica. Esta capa está constituida generalmente por un depósito de metal, como, por ejemplo, el aluminio, que ha sido oxidado. Pero el aluminio puede sustituirse por cualquier otro elemento susceptible de formar con el oxígeno unos óxidos en capas finas de buena calidad, esto es, por ejemplo, el magnesio, el rutenio, el silicio, el tántalo, el cromo, el circonio, el titanio, el hafnio, el vanadio, el cobalto, el níquel, el hierro, el cobre, el tungsteno y más generalmente por cualquier material o aleación susceptible de formar unos óxidos estables.

15 Igualmente, se puede utilizar para algunas realizaciones particulares, una aleación o una multicapa de estos materiales en calidad de capa de óxido elemental. La naturaleza y el espesor de las capas de óxido pueden modificarse igualmente a medida que se produce el apilamiento de las capas. Por las mismas razones que las mencionadas más arriba, la composición química y el espesor de la primera capa de óxido no deben ser forzosamente idénticas a las de la segunda, que no debe ella misma ser forzosamente idéntica a la enésima en el caso en que la bicapa metal magnético/óxido se repita n veces.

Esta capa de óxido puede sustituirse igualmente por la capa iniciadora de crecimiento (capa tampón) mencionada más arriba.

20 Es posible igualmente realizar el óxido, no por una técnica de oxidación por plasma, sino por una técnica conocida de pulverización reactiva del elemento considerado en presencia de una cierta cantidad de oxígeno en la atmósfera de la cámara de depósito o por un método de oxidación natural o también depositando directamente el óxido por pulverización de radiofrecuencia de un material-diana compuesto MOx, donde M designa uno de los metales citados más arriba y Ox el oxígeno.

25 Pueden obtenerse unos resultados análogos efectuando una nitruración o una hidruración y no una oxidación.

Con el fin de modificar las cualidades de crecimiento de las diferentes capas, también puede ser interesante depositar las capas sucesivas, o algunas de entre ellas, sobre un sustrato mantenido a una temperatura diferente de la temperatura ambiente.

30 El conjunto constituido por la capa M y la capa O puede repetirse hasta que haya aproximadamente 20 capas O y de manera opcional puede incluir una última capa M, con el fin de terminar el dispositivo multicapa por una capa M, en concreto, en el caso en que se desee utilizar el dispositivo magnético según la invención para unas aplicaciones del tipo memorias magnéticas o puertas lógicas magnéticas. Tradicionalmente, el par de capas M luego O se repite, por ejemplo, 5 veces.

35 La figura 5 presenta la variación de la resistencia de Hall en función del campo magnético para una estructura del tipo Pt 0,3nm / (CoFe 0,6nm / Al₂O₃ 2,0nm)₅. El campo magnético se aplica según una dirección perpendicular al plano de las capas. Esta estructura está compuesta, por lo tanto, por cinco repeticiones de una bicapa (CoFe/Al₂O₃) depositadas sobre una capa de crecimiento de platino de un espesor de 0,3 nanómetro.

40 La resistividad longitudinal de este apilamiento es del orden de 1.000 μΩcm, o sea, casi dos órdenes de magnitud superiores a un apilamiento similar metálico (esto es, en el que se habrían sustituido, por ejemplo, las capas de óxido por unas capas de platino de espesor equivalente). La resistencia de Hall varía de forma lineal y reversible sobre una gama de campo magnético de +/- 0,4 T (Tesla) y la sensibilidad al campo correspondiente es del orden de 14 Ω/T.

45 La figura 6 es una representación esquemática de una segunda forma de realización conforme con la invención. La figura 7 presenta la variación de la resistencia de Hall en función del campo magnético para una estructura del tipo Pt 1,0nm / Co 0,6nm / Al₂O₃ 2,0nm / (CoFe 0,6nm / Al₂O₃ 2,0nm)₅, es decir, una bicapa (Co/Al₂O₃) depositada sobre una capa de crecimiento de platino de un espesor de 1 nanómetro y rematada por cinco bicapas (CoFe/Al₂O₃).

50 Como en el caso anterior, la resistividad longitudinal de este apilamiento es, igualmente, del orden de 1.000 μΩcm. La resistencia de Hall es más escasa que en el caso anterior (del orden de 4 Ω a la saturación en lugar de 8 Ω), a causa, por una parte, del mayor número de repeticiones del apilamiento (6 en total en lugar de 5) y del efecto

negativo de la capa inicial de platino más espesa (1,0 nanómetro en lugar de 0,3 nanómetro) que deriva una parte de la corriente que circula en la estructura.

5 Por el contrario, esta capa de platino ligeramente más espesa refuerza considerablemente las propiedades de anisotropía magnética perpendicular. El campo de anisotropía perpendicular es, en efecto, solo de 6 mT (miliTesla), o sea, cien veces más escaso que en el caso de la figura 5 y trescientas veces más escaso que el valor del término de campo desmagnetizante $4\pi M_s$, donde M_s es la imantación de la aleación $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$.

10 En este caso, se obtiene una sensibilidad al campo magnético del orden de $700 \Omega/\text{T}$, o sea, 50 veces más fuerte que en el caso anterior. Este valor es muy ampliamente superior a los valores mencionados en el estado anterior de la técnica, así como a los obtenidos con unos sensores convencionales semiconductores, lo que hace las realizaciones según este modo particularmente adaptada para su utilización en calidad de sensores de campo magnético.

15 Igualmente, se puede puntualizar que esta sensibilidad al campo magnético puede, modificando la estructura del apilamiento y, por lo tanto, las propiedades de anisotropía magnética perpendicular, ajustarse a voluntad. En unas condiciones particulares (por ejemplo, por una oxidación más o menos importante de la capa separadora no magnética), la contribución de anisotropía magnética perpendicular puede llegar a ser tan elevada que la imantación del apilamiento está dirigida entonces espontáneamente (sin campo magnético aplicado) en una dirección perpendicular al plano de las capas.

20 Este es el caso que se ilustra en una tercera forma de realización de la invención esquematizada en la figura 8, con un apilamiento idéntico al presentado en la figura 6, pero para el que las condiciones de oxidación se han modificado ligeramente (presión de oxígeno ligeramente inferior durante la oxidación por plasma de la capa de aluminio), con como consecuencia la estabilización de la dirección de la imantación de las capas perpendicularmente al plano de dichas capas en ausencia de campo magnético aplicado. Este tipo de estructura está, por lo tanto, completamente adaptada para la realización de memorias magnéticas o de puertas lógicas magnéticas.

25 Como se puede ver esto en la figura 9, se obtienen en este caso dos estados estables de campo magnético nulo, o sea, una resistencia de Hall de $\pm 3,5 \Omega$ según si se viene de los campos magnéticos positivos o negativos. La inversión de resistencia se produce para unos campos magnéticos muy escasos, del orden de 0,3 mT en el caso presente.

35 De nuevo, hay que recordar que este parámetro (el campo coercitivo, así como se define en relación con la figura 3) también puede él ajustarse, o bien, modificando la composición del apilamiento (espesores de capas, naturaleza del material ferromagnético, número de repeticiones del motivo metal magnético/óxido), o bien utilizando una técnica o unas condiciones de oxidación diferentes (presión de oxígeno, tiempo de oxidación, potencia de plasma, etc.) ya sea efectuando unos tratamientos térmicos postdepósito.

40 Es el efecto de este último parámetro el que está ilustrado en una cuarta forma de realización. En ese caso, el apilamiento representado en la figura 8 y cuya curva de imantación antes de cualquier tratamiento térmico se presenta en la figura 9, se ha mantenido, después de depósito, a una temperatura de 350°C durante un tiempo de 30 minutos en una atmósfera enrarecida de 10^{-6} mbar, luego enfriado hasta la temperatura ambiente, donde sus propiedades magnéticas se han medido de nuevo.

45 La figura 10 ilustra la variación de la resistencia de Hall en función del campo magnético aplicado perpendicularmente al plano de las capas. Se muestran dos diferencias esenciales con respecto a la figura 9 que representaba la medición de la misma propiedad sobre el apilamiento que no había experimentado tratamiento térmico.

50 Primero, se constata un importante aumento de la amplitud de la resistencia de Hall, que en este momento es de $\pm 4,7 \Omega$ después de tratamiento térmico, o sea, un aumento de un 35 % con respecto al valor inicial. Además, el campo coercitivo se ha modificado considerablemente, puesto que pasa de 0,3 mT a 22 mT después de tratamiento térmico, o sea, un aumento de cerca de dos órdenes de magnitud.

55 Por lo tanto, es completamente posible, por tratamiento térmico, modificar a voluntad las propiedades magnéticas de este tipo de material, con el fin de maximizar la resistencia de Hall y de ajustar en función de la aplicación contemplada la estabilidad de la imantación con respecto al campo magnético exterior (es decir, su campo coercitivo). Estos tratamientos térmicos tienen la ventaja, además, de hacer el dispositivo mucho más estable en cuanto a estructura con respecto a eventuales variaciones de temperatura.

60 En esta forma de realización, el estado magnético del dispositivo puede determinarse o bien por medición de Efecto Hall, o bien también por una medición magneto-óptica.

65 En una quinta forma de realización, en relación con la representación esquemática de la figura 11, es posible superponer dos bloques elementales del tipo $(M_1/O_1)_x/M_1$ y $M_2/(O_2/M_2)_y$, donde M designa un material magnético y O

una capa de óxido, de hidruro o de nitruro, separados por una tercera capa O_3 , y donde x e y son unos números enteros positivos o nulos.

5 La composición y el espesor de las capas que forman cada uno de estos dos bloques, así como los números respectivos x e y de repeticiones de los dos motivos elementales (M_1/O_1) y (O_2/M_2) se eligen para que cada uno de los dos bloques presente espontáneamente (en campo magnético nulo) una imantación perpendicular al plano de las capas. Estos números de repeticiones x e y pueden variar tradicionalmente de 0 a 20.

10 Si el número, la naturaleza y el espesor de las capas M_1 , M_2 , O_1 y O_2 constitutivas de cada uno de los dos bloques, así como el espesor y la naturaleza de la capa O_3 , se eligen bien, las durezas magnéticas (los campos coercitivos) de estos dos bloques pueden ser diferentes. En ese caso, una secuencia particular de campos magnéticos aplicados permitirá alcanzar los cuatro estados magnéticos del apilamiento, para los que las imantaciones de los dos bloques son paralelas (ambas dos hacia arriba o hacia abajo, suponiendo que las capas están apiladas en un plano horizontal) o antiparalelas (una hacia arriba y una hacia abajo). Esta descripción puede generalizarse igualmente
15 para un número de bloques magnéticos superior a dos.

En esta forma de realización, cada uno de los cuatro estados magnéticos corresponde a una resistencia de Hall diferente. La medición de la tensión de Hall correspondiente o de la imantación o de la rotación o de la elipticidad Kerr o Faraday o de la magnetorresistencia, permite, por lo tanto, identificar el estado magnético del dispositivo. Esta
20 forma de realización está adaptada, por lo tanto, para la realización de dispositivos del tipo soportes de registro magnético multiniveles.

En una variante de esta forma de realización, el apilamiento realizado de este modo y tallado en forma de un pilar de base cuadrada, rectangular, circular o elíptica, con unas dimensiones laterales de algunos cientos de nanómetros o
25 menos, puede estar recorrido por una corriente eléctrica en una dirección perpendicular al plano de las capas. Por el fenómeno bien conocido en la literatura y denominado de "magnetorresistencia túnel", las orientaciones paralela y antiparalela de las imantaciones de los dos bloques corresponderán respectivamente a unos estados de baja y alta resistencia eléctrica. Unas tomas de tensión conectadas abajo y arriba del apilamiento permitirán detectar esta
30 diferencia de resistencia eléctrica.

Esta forma de realización, ilustrativa de una estructura de tipo unión túnel magnético, está adaptada, por lo tanto, para la realización de dispositivos tales como unas memorias magnéticas no volátiles o unas puertas lógicas magnéticas.

35 Para algunas o todas las formas de realización descritas más arriba, es posible poner en contacto con una o varias de las capas M consideradas una capa de un material, tal como las aleaciones $IrMn$, $PtMn$, $FeMn$ o $NiMn$, que se consideran que inducen un acoplamiento de intercambio antiferromagnético con dicha o dichas capas M .

La invención se refiere, igualmente, al procedimiento de fabricación de dispositivos conformes con las descripciones anteriores. Este procedimiento se define como sigue, sin que esta presentación sea en ningún caso exhaustiva.

Las diferentes capas de los apilamientos presentados en este documento se depositan por pulverización catódica con unas velocidades de depósito del orden de 0,1 nm/s, sobre unos sustratos de silicio recubiertos con 500
45 nanómetros de silicio oxidado térmicamente.

Las capas de óxido, de hidruro o de nitruro están realizadas depositando primero la capa del material correspondiente, luego efectuando una oxidación, hidruración o nitruración por plasma de esta capa con unas potencias del orden de 10 W a una presión de 3×10^{-3} mbar de oxígeno, de hidrógeno o de nitrógeno durante una
50 duración de algunos minutos.

Primero, se deposita sobre el sustrato una fina capa de material no magnético. Esta capa inicial tiene como finalidad permitir un buen crecimiento de las capas siguientes. Es necesario que sea lo más fina posible, con el fin de que cortocircuite lo menos posible la corriente inyectada en la estructura cuando se desea medir la imantación del apilamiento por Efecto Hall.

55 A continuación, se deposita una capa de aleación magnética $Co_{90}Fe_{10}$, de un espesor igualmente muy escaso. Se conoce en la literatura que, en el caso de las multicapas cobalto/platino, por ejemplo, las mejores propiedades de anisotropía magnética perpendicular se obtienen para unos espesores de capas magnéticas comprendidos entre 0,3 y 1,0 nanómetro. En los ejemplos descritos a continuación, el espesor de la capa de $Co_{90}Fe_{10}$ se ha fijado en 0,6
60 nanómetro. La elección de un espesor tan escaso permite igualmente, como se ha mencionado anteriormente, aumentar fuertemente la resistividad de esta capa comparada con la de una capa más espesa.

A la inversa, disminuir demasiado este espesor podría, o bien disminuir la imantación intrínseca de esta capa, o bien disminuir fuertemente su temperatura de orden magnético. En los dos casos, esto conduciría a una disminución de la imantación efectiva de esta capa a la temperatura de utilización del dispositivo, esto es, en las proximidades de la temperatura ambiente. Según la relación (1), esto conduciría a una disminución de la resistividad de Hall y, por lo
65

tanto, a una disminución de la señal de salida del dispositivo. Para otros tipos de aplicaciones descritas en la presente invención, se podrá aumentar este espesor de la capa magnética hasta 5 nanómetros.

5 Por último, se deposita una capa, de aluminio, por ejemplo, de un espesor del orden de 0,3 a 5 nanómetros. A continuación, se somete la muestra a un plasma, de oxígeno, por ejemplo, en unas condiciones de presión, potencia y tiempo bien definidas. Esto permite transformar este aluminio metálico en óxido de aluminio.

10 Es evidente que, al ser esta capa de alúmina aislante eléctricamente, su espesor es mucho menos crítico que el de las capas anteriores. Esto es, en cambio, diferente si el óxido (o el hidruro o el nitruro) del metal considerado es conductor eléctrico. En el caso de una capa aislante, lo que fija su espesor depende a la vez de las propiedades de crecimiento de esta capa, cuya rugosidad puede amplificarse con el espesor y, por lo tanto, tener un efecto nefasto sobre la cualidad de crecimiento de las capas siguientes y de los mecanismos de oxidación que pueden modificarse eventualmente en función del espesor total. Los siguientes ejemplos se refieren a un espesor de aluminio de 1,6 nanómetro, que corresponde aproximadamente a 2 nanómetros de alúmina después de oxidación de esta capa metálica.

15 Esta bicapa metal magnético / óxido o metal magnético / hidruro o metal magnético / nitruro, puede repetirse eventualmente un cierto número de veces. Cualitativamente, aumentar el número de repeticiones permite disminuir la contribución relativa de la capa iniciadora de crecimiento en las mediciones de transporte eléctrico (proporcionalmente menos corriente derivada en esta capa), pero, por el contrario, conlleva, de manera conocida, una disminución de la anisotropía magnética perpendicular del conjunto del apilamiento.

20 En el caso de una sola repetición, se puede terminar, igualmente, la parte "activa" del apilamiento por una segunda capa magnética, eventualmente diferente de la primera en composición y en espesor.

25 Por último, es posible realizar unos tratamientos térmicos durante o después del depósito del apilamiento. Por tratamiento térmico, se entiende el hecho de someter el material preparado de este modo a una temperatura más elevada que la temperatura a la que se ha depositado, durante un tiempo más o menos largo, en una atmósfera enrarecida o en presencia eventual de un cierto gas o mezcla de diferentes gases, tales como oxígeno, hidrógeno o nitrógeno, por ejemplo.

30 Estos tratamientos tienen como finalidad aumentar la resistividad longitudinal del apilamiento, por disrupción eventual de la capa magnética y/o formación de una aleación en las interfaces. Igualmente, pueden modificar la estructura química o cristalográfica de las capas y, en consecuencia, modificar las propiedades magnéticas del apilamiento realizado de este modo.

35

REIVINDICACIONES

- 5 1. Dispositivo magnético multicapas, que incluye, sobre un sustrato, una alternancia de capas metálicas magnéticas M y de óxidos, de hidruros o de nitruros O, caracterizado:
- por que el número de capas M es al menos igual a dos,
 - por que las capas de óxidos, de hidruros o de nitruros O presentan un espesor al menos igual a 0,3 nanómetro y están realizadas a base de elementos elegidos en el grupo que comprende Al, Mg, Ru, Ta, Cr, Hf, Ti, V, Si, Cu, W o sus aleaciones, de tal modo que se formen unos óxidos, hidruros o nitruros estables,
 - 10 ■ por que las capas M son continuas, presentan un espesor inferior o igual a 5 nanómetros y tendrían su imantación paralela al plano de las capas en ausencia de las capas O,
 - y por que existe, para una gama de temperatura igual o superior a la temperatura ambiente, una anisotropía magnética interfacial perpendicular al plano de las capas en las interfaces M/O y O/M, adecuada para orientar la imantación de las capas M sustancialmente de manera perpendicular al plano de las capas.
- 15 2. Dispositivo magnético multicapas según la reivindicación 1, caracterizado por que las capas metálicas magnéticas M están constituidas por un material magnético, por una aleación magnética o por una multicapa formada por la alternancia de materiales no magnéticos y magnéticos, eligiéndose estos últimos en el grupo constituido por Fe, Ni, Co o sus aleaciones.
- 20 3. Dispositivo magnético multicapas según una de las reivindicaciones 1 y 2, caracterizado por que incluye un material S que sirve de iniciador de crecimiento para la primera capa metálica M, eligiéndose este material S en el grupo que comprende el TiN, CuN, Pt, Ta, Ru, IrMn, PtMn, NiFeCr, los óxidos y los nitruros.
- 25 4. Dispositivo magnético multicapas según una de las reivindicaciones 1 a 3, caracterizado por que al menos una de las capas M contiene unas adiciones de metales no magnéticos Pd o Pt o de elementos elegidos en el grupo que comprende Si, C, B, P.
- 30 5. Dispositivo magnético multicapas según una de las reivindicaciones 1 y 2, caracterizado por que todas las capas M están realizadas de un mismo material magnético y todas las capas O están realizadas de un mismo material no magnético.
- 35 6. Dispositivo magnético multicapas según una de las reivindicaciones 3 a 5, caracterizado:
- por que cada capa metálica M presenta un espesor comprendido entre 0,3 y 5 nanómetros,
 - por que cada capa O presenta un espesor comprendido entre 0,3 y 5 nanómetros,
 - y por que el número de alternancias de capas M y O está comprendido entre 1,5 y 20, o sea, de estructura genérica M/O/M a (M/O)₂₀.
- 40 7. Dispositivo magnético multicapas según la reivindicación 6, caracterizado por que la composición química de al menos una de las capas magnéticas M es diferente de las otras.
- 45 8. Dispositivo magnético multicapas según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, caracterizado por que al menos una de las capas O está constituida ella misma por una pluralidad de capas realizada de óxido, de hidruro o de nitruro.
- 50 9. Dispositivo magnético multicapas según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, caracterizado por que una o varias de las capas M está en contacto con un material que se considera que induce un acoplamiento de intercambio con dicha capa M y, en concreto, FeMn, IrMn, PtMn, NiMn.
- 55 10. Procedimiento de realización de un dispositivo magnético multicapas según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, caracterizado por que comprende las siguientes etapas:
- depósito sobre una superficie eléctricamente aislante de una primera capa metálica magnética M por pulverización catódica,
 - realización de la primera capa O sobre esta primera capa M,
 - repetición de las dos etapas anteriores o de solo la primera de estas,
 - depósito de un contacto eléctrico.
- 60 11. Procedimiento de realización de un dispositivo magnético multicapas según la reivindicación 10, caracterizado:
- por que la etapa de depósito de la primera capa metálica M está antecedida por una preetapa, que consiste en depositar sobre el sustrato una capa realizada de un material iniciador de crecimiento;
 - y por que este material iniciador de crecimiento tiene un espesor lo suficientemente escaso para minimizar la cantidad de corriente derivada en esta capa con respecto a la corriente que circula en la parte activa del dispositivo magnético, cuando dicha corriente se inyecta paralelamente al plano de las capas.
- 65

12. Procedimiento de realización de un dispositivo magnético multicapas según la reivindicación 11, caracterizado por que dicha preeetapa está ella misma antecedida por un depósito sobre el substrato de una capa de un material conductor eléctrico, que sirve para inyectar una corriente eléctrica en una dirección perpendicular al plano de las capas.
- 5
13. Sensor de campo magnético caracterizado por que está constituido por un dispositivo magnético multicapas según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, que presenta un campo de anisotropía perpendicular que contrarresta casi su campo desmagnetizante.
- 10
14. Memoria magnética caracterizada por que está constituida por un dispositivo magnético multicapas según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, en el que las capas magnéticas tienen su imantación perpendicular al plano de las capas en ausencia de campo magnético exterior.
- 15
15. Puerta lógica magnética caracterizada por que está constituida por un dispositivo magnético multicapas según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, en el que las capas magnéticas tienen su imantación perpendicular al plano de las capas en ausencia de campo magnético exterior.

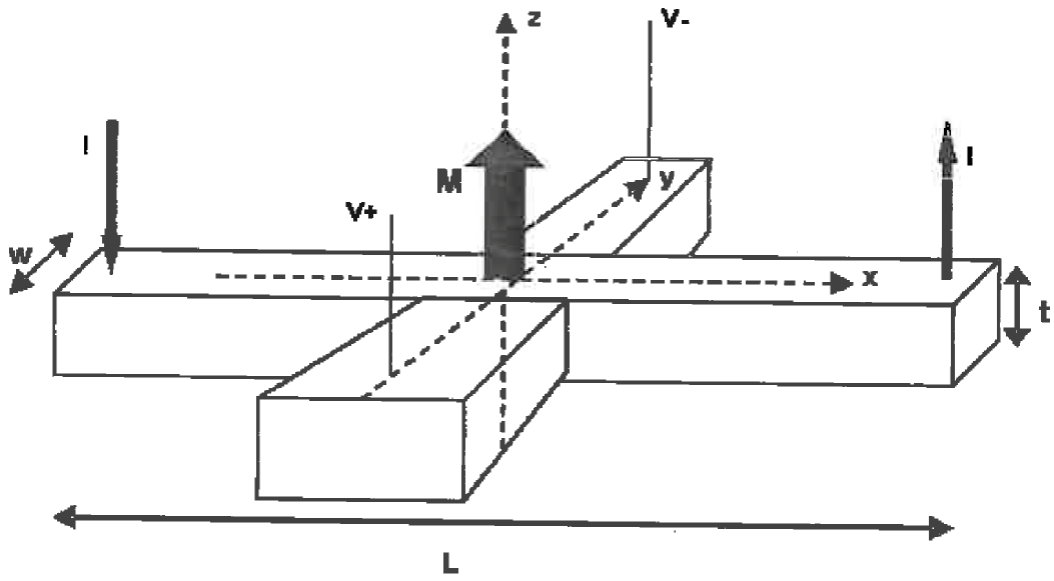


Figura 1

Resistividad de Hall

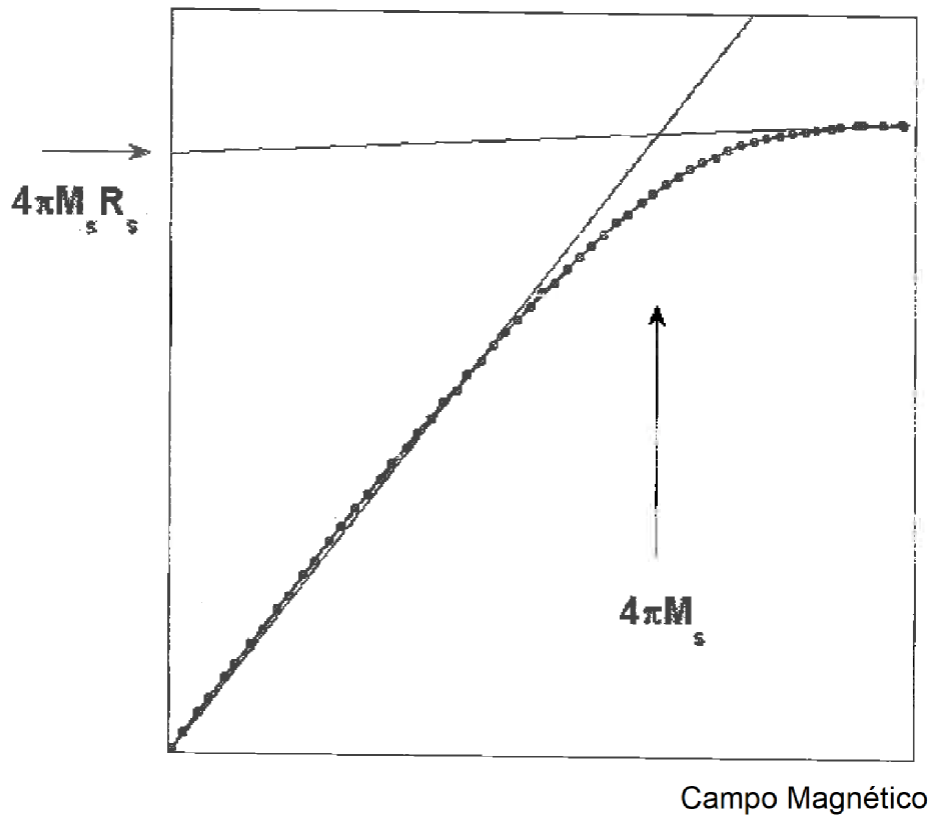


Figura 2

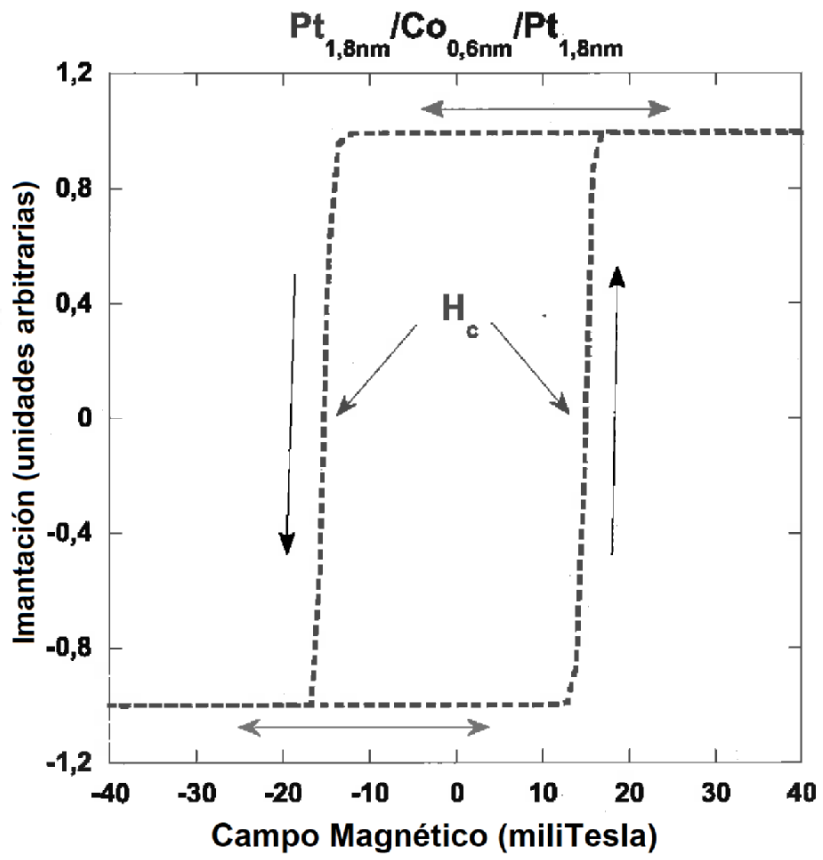


Figura 3

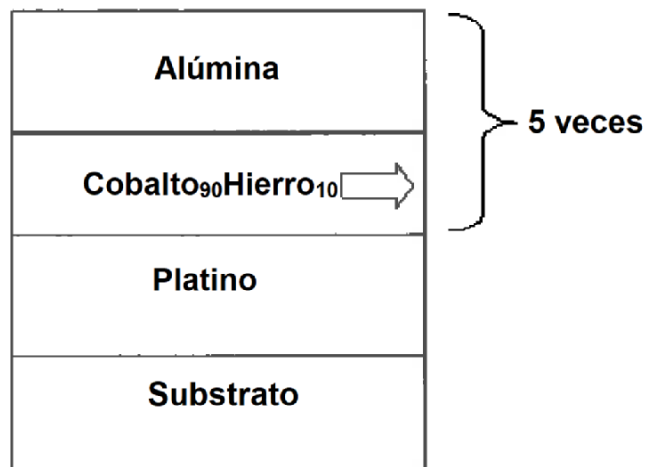


Figura 4

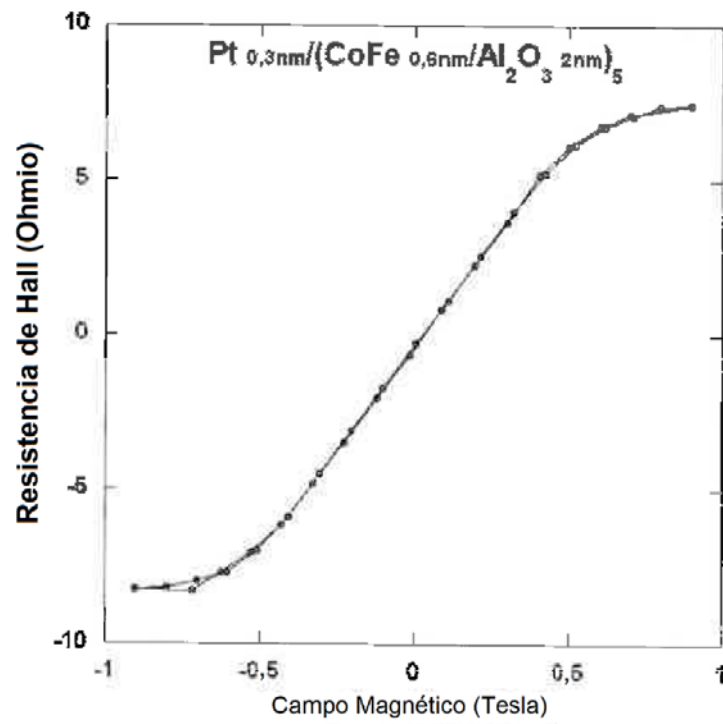


Figura 5

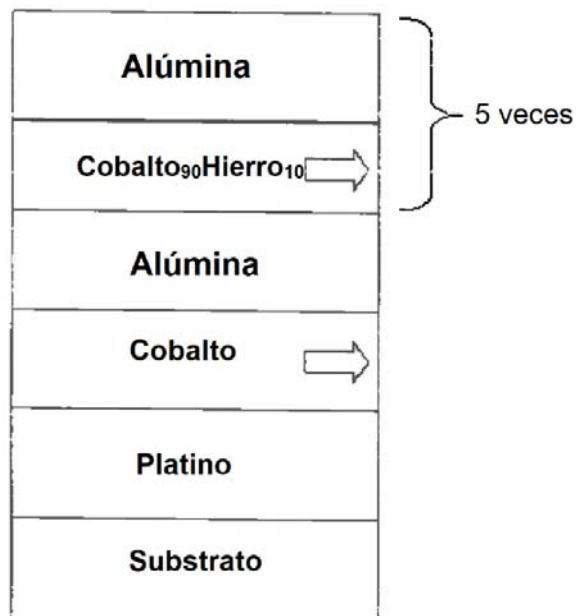


Figura 6

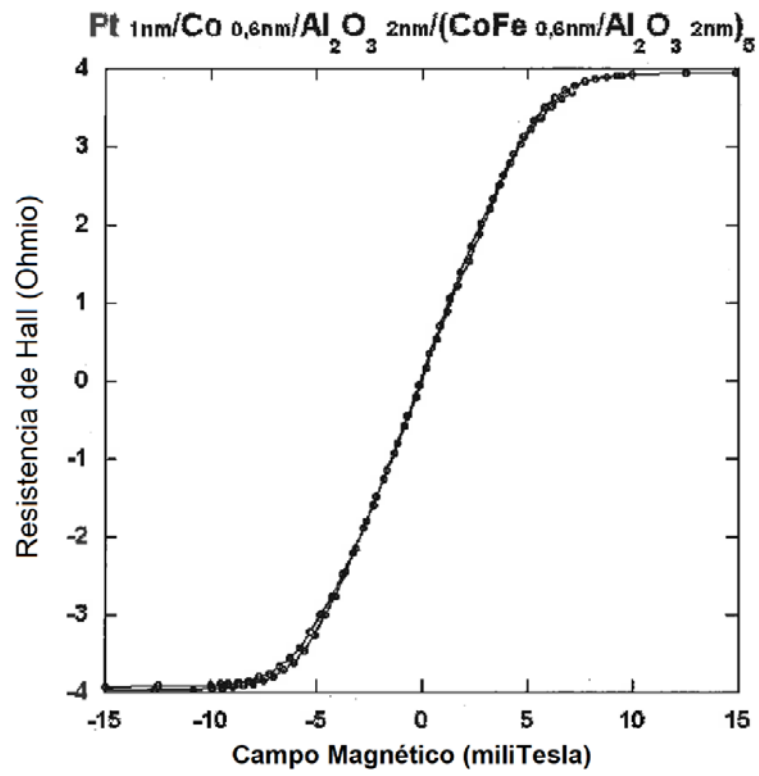


Figura 7

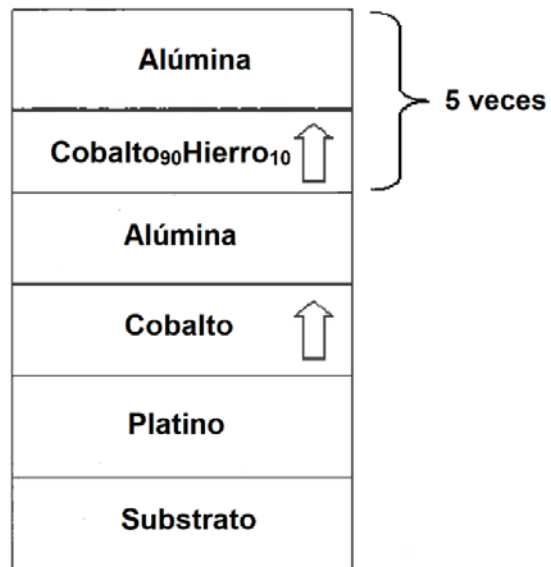


Figura 8

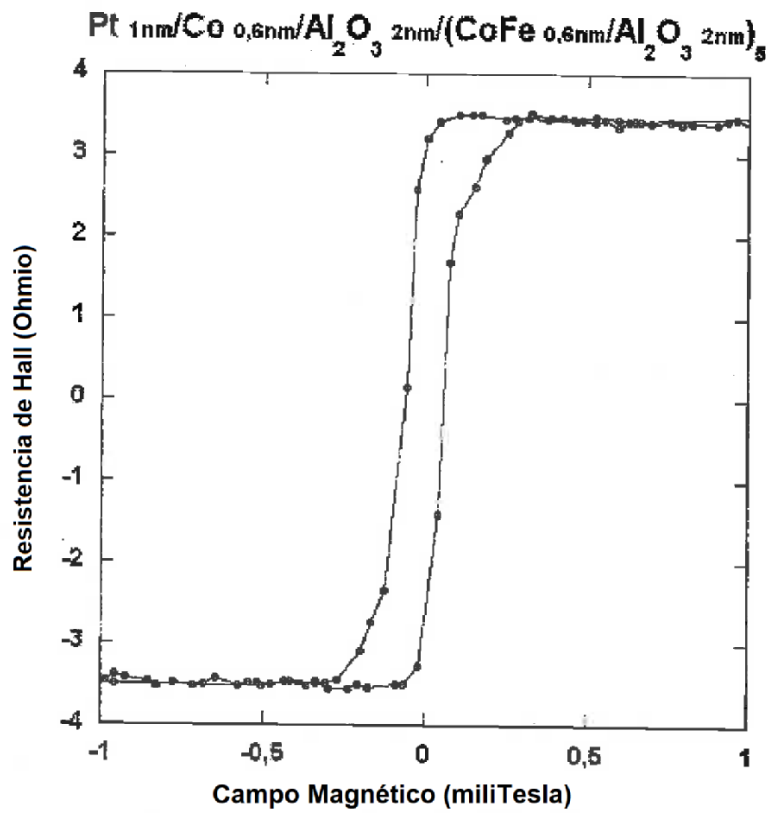


Figura 9

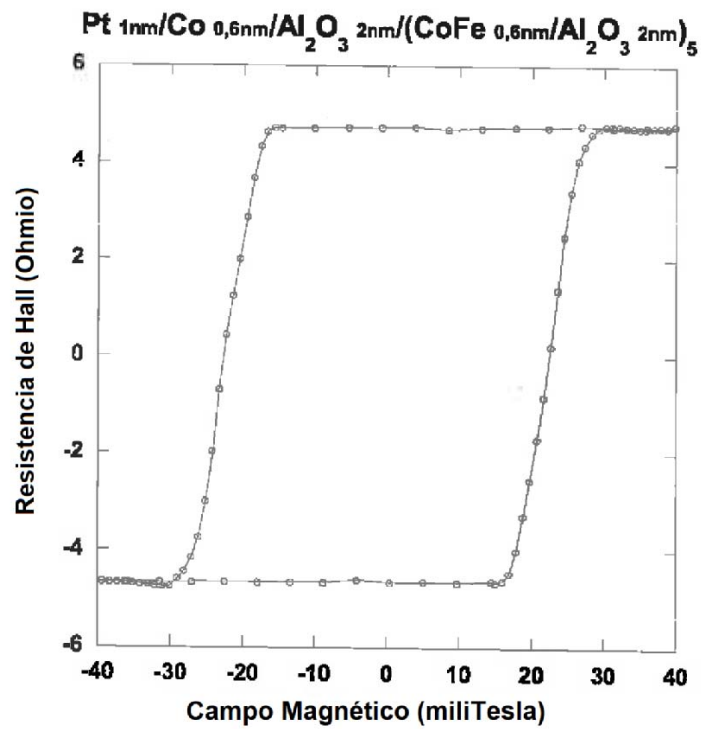


Figura 10

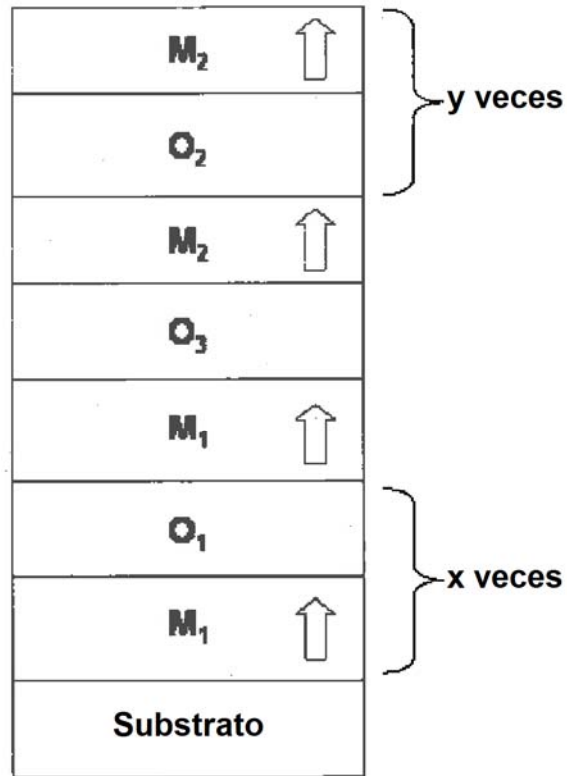


Figura 11