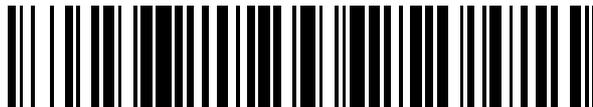


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 658 984**

51 Int. Cl.:

H01F 10/32 (2006.01)

H01F 41/30 (2006.01)

G11B 5/39 (2006.01)

G11B 5/85 (2006.01)

H01L 43/12 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **05.09.2013** **E 13183166 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **08.11.2017** **EP 2846334**

54 Título: **Método de producción de un dispositivo magneto-electrónico multicapa y dispositivo magneto-electrónico**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
13.03.2018

73 Titular/es:

**DEUTSCHES ELEKTRONEN-SYNCHROTRON
DESY (100.0%)
Notkestrasse 85
22607 Hamburg, DE**

72 Inventor/es:

**SCHLAGE, KAI;
ERB, DENISE;
RÖHLSBERGER, RALF;
WILLE, HANS-CHRISTIAN;
SCHUMACHER, DANIEL y
BOCKLAGE, LARS**

74 Agente/Representante:

LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 658 984 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

Método de producción de un dispositivo magneto-electrónico multicapa y dispositivo magneto-electrónico

La presente solicitud se refiere a un método de producción de un dispositivo magneto-electrónico multicapa de acuerdo con la reivindicación 1. La presente solicitud se refiere además a un dispositivo magneto-electrónico que se puede producir por tal método de acuerdo con la reivindicación 14. Tales dispositivos magneto-electrónicos multicapa dependen de las propiedades de estructuras multicapa particulares, que incluyen capas ferromagnéticas separadas por medio de capas no magnéticas intermedias, cuya resistencia eléctrica cambia tras la aplicación de un campo magnético externo. Más particularmente, esta llamada magneto-resistencia es debida al hecho de que la resistencia eléctrica depende de la orientación relativa de la magnetización de las capas ferromagnéticas individuales, y de que un campo magnético externo puede cambiar esta orientación relativa. Dos efectos que dan como resultado una magneto-resistencia son el llamado efecto de magneto-resistencia gigante (GMR), que puede ocurrir en estructuras multicapa en las que las capas no magnéticas intermedias son conductores eléctricos, y el efecto de magneto-resistencia de túnel (TMR), que puede ocurrir en estructuras multicapa en las que las capas no magnéticas intermedias son aisladores eléctricos.

Con el fin de ser útil en la práctica, las estructuras multicapa magneto-resistivas deben ser fabricadas con una orientación relativa definida de la magnetización de las capas individuales, es decir de sus momentos magnéticos que son cantidades vectoriales. Por esta razón, muchas de las estructuras multicapa magneto-resistivas conocidas son bastante complejas y difíciles de preparar. En estructuras multicapa magneto-resistivas de la técnica anterior la orientación de la magnetización de capas ferromagnéticas adyacentes difiere en 0° o 180° . Además, en experimentos de laboratorio se han creado estructuras multicapa en las que la orientación de la magnetización de capas ferromagnéticas adyacentes difiere en 90° , pero resultaron ser muy difíciles de producir de manera fiable y no se han utilizado en dispositivos magneto-electrónicos reales.

Por ejemplo, en un tipo de estructura multicapa magneto-resistiva los materiales y grosores de las capas ferromagnéticas y de las capas no magnéticas intermedias son elegidos cuidadosamente y controlados de tal manera que capas ferromagnéticas adyacentes están acopladas por la llamada interacción RKKY, lo que produce una orientación relativa de momentos magnéticos de las dos capas ferromagnéticas respectivas. La interacción RKKY varía con, entre otros, el grosor de la capa no magnética intermedia, de modo que la orientación de la magnetización de capas ferromagnéticas adyacentes puede ser elegida para ser o bien paralela o bien anti-paralela en remanencia (las orientaciones relativas mencionadas anteriormente de 90° son muy difíciles de realizar de una manera estable). Un campo magnético externo adecuado es capaz de superar la intensidad de acoplamiento de la interacción RKKY y de cambiar la dirección de la magnetización de al menos algunas de las capas ferromagnéticas, cambiando de este modo la resistencia eléctrica de la estructura multicapa. Por ejemplo, la orientación puede ser forzada a cambiar desde anti-paralela en remanencia a paralela tras la aplicación del campo magnético externo. El cambio resultante de la magneto-resistencia de la estructura multicapa puede ser utilizado para detectar la presencia del campo magnético externo.

Debido al hecho de que en la práctica solo es posible de manera fiable realizar orientaciones relativas paralelas o anti-paralelas y de que la intensidad del acoplamiento entre capas proporcionado por la interacción RKKY, cuya intensidad influye en el comportamiento de las capas ferromagnéticas acopladas de una manera extremadamente sensible y cambia tras variar el grosor de la capa intermedia del orden de 0,1 nm, las posibilidades de ajustar selectivamente de manera precisa el campo de conmutación y la dependencia del campo magnético general de la magneto-resistencia son muy limitadas. Por consiguiente, el diseño de los sensores de campo magnético correspondientes adaptados a aplicaciones particulares está restringido. Además, la interacción RKKY solo es observada para un número muy limitado de combinaciones de materiales para las capas ferromagnéticas y las capas intermedias y para capas intermedias muy delgadas.

Un ejemplo adicional de estructuras multicapa magneto-resistivas son las así llamadas válvulas giratorias cargadas por intercambio, en las que una capa anti-ferromagnética está dispuesta en contacto con una capa ferromagnética con el fin de fijar o "sujetar" la magnetización de esa capa ferromagnética por medio de una interacción de intercambio. Una capa ferromagnética adicional es separada y desacoplada de la capa ferromagnética fijada por una capa intermedia no magnética. Por consiguiente, esta capa ferromagnética "libre" puede cambiar su magnetización tras la aplicación de un campo magnético externo adecuado mientras que mantiene la magnetización de la capa fijada. Los sistemas de válvula giratoria pueden ser clasificados dependiendo de las propiedades eléctricas de la capa intermedia no magnética. Las llamadas válvulas giratorias de tipo GMR utilizan capas intermedias eléctricamente conductoras, y las llamadas válvulas giratorias de tipo TMR (magneto-resistencia de túnel) utilizan capas intermedias eléctricamente aislantes, que actúan como barreras de túnel. Las válvulas giratorias TMR son utilizadas, por ejemplo, en dispositivos de memoria de acceso aleatorio magneto-resistivos (MRAM). Con el fin de reducir o evitar campos alejados generados por la capa sujeta y un acoplamiento no deseado entre la capa sujeta y la capa libre, una combinación de dos capas ferromagnéticas anti-paralelas puede ser utilizada como capa sujeta en lugar de una sola capa ferromagnética sujeta. Tal capa combinada sujeta puede estar dispuesta de tal manera que su campo magnético total es cero o cercano a cero en la capa libre. Esta construcción de la capa sujeta es utilizada comúnmente en, por ejemplo, los dispositivos MRAM.

La capa anti-ferromagnética en estas válvulas giratorias es parte de una estructura de sujeción bastante compleja, que complica la fabricación de tales estructuras de válvula giratoria. Adicionalmente, también en este caso las posibilidades

de ajustar selectivamente de manera precisa el campo de conmutación y la dependencia de campo magnético general de la magneto-resistencia son muy limitadas, debido a que el comportamiento de conmutación de la capa magnética libre apenas puede ser influenciado y ningún eje magnético fácil, es decir, ninguna dirección preferida para el momento magnético, es inducida típicamente en la capa libre.

- 5 En cualquier caso, es problemático preparar de manera fiable capas ferromagnéticas que tienen una anisotropía magnética definida en las estructuras multicapa. En este aspecto, sólo se realizaron las orientaciones relativas mencionadas anteriormente de 0° y 180° (y 90° en experimentos de laboratorio).

10 A partir del documento US 6.818.961 se conoce preparar las capas ferromagnéticas de estructuras multicapa magneto-resistivas por deposición de incidencia oblicua, en donde dependiendo del ángulo entre las partículas incidentes que son depositadas y la dirección perpendicular al plano de extensión de las capas ferromagnéticas el eje fácil de la anisotropía uniaxial resultante es o bien paralelo o bien perpendicular al plano definido por la dirección de incidencia de las partículas y la proyección de esa dirección sobre el plano de extensión de las capas ferromagnéticas. De acuerdo con este documento de la técnica anterior, ángulos más pequeños dan como resultado una orientación paralela del eje fácil y ángulos más grandes dan como resultado una orientación perpendicular del eje fácil, y variando el ángulo de incidencia es además posible variar la dureza magnética de las capas. Se utilizó la técnica para preparar estructuras multicapa que tienen orientaciones relativas paralelas de la magnetización de las capas ferromagnéticas.

15 Independientemente del tipo de estructura multicapa magneto-resistiva utilizada los métodos conocidos de producción de dispositivos magneto-electrónicos multicapa proporcionan solo una capacidad limitada para adaptarlos a una aplicación particular. Esto también implica que para algunas aplicaciones los dispositivos magneto-electrónicos multicapa son simplemente de utilidad limitada o no pueden ser utilizados en conjunto. Por ejemplo, si es posible, es muy complicado proporcionar un dispositivo magneto-electrónico multicapa que tiene una sensibilidad cualitativa o cuantitativa definida y deseada para una aplicación particular.

20 Es un objeto de la presente invención proporcionar un método de producción de dispositivos magneto-electrónicos multicapa que aumenta su flexibilidad y la posibilidad de adaptarles a aplicaciones particulares y que extiende su utilidad a nuevas aplicaciones.

25 Este objeto es conseguido por un método como el reivindicado en la reivindicación 1. Las realizaciones preferidas del método son el sujeto de las reivindicaciones dependientes.

30 De acuerdo con la invención un método de producción de un dispositivo magneto-electrónico multicapa, tal como, en particular, un sensor de campo magnético o un dispositivo MRAM, comprende depositar una estructura multicapa que incluye o consiste en dos o más capas ferromagnéticas dispuestas una en la parte superior de la otra en un sustrato. Cada una de las capas ferromagnéticas es depositada de tal manera que es magnéticamente anisotrópica, es decir, que exhibe un momento magnético que tiene una magnitud y una dirección. En la práctica, la dirección del momento magnético se extiende en el plano definido por la capa ferromagnética respectiva.

35 Además, la estructura multicapa es depositada de tal manera que cada una de las dos capas ferromagnéticas adyacentes de las capas ferromagnéticas están separadas por una capa no magnética respectiva. Dependiendo de si una estructura multicapa que se basa en el efecto GMR o en el efecto TMR ha de ser producida, las capas no magnéticas son eléctricamente conductoras o aisladores eléctricos.

40 La anisotropía magnética es creada en parte o en su totalidad por deposición de incidencia oblicua de las capas ferromagnéticas respectivas, es decir cada una de las capas ferromagnéticas respectivas es depositada en un ángulo azimutal respectivo y en un ángulo respectivo de incidencia de las partículas que son depositadas, en el que el ángulo azimutal y el ángulo de incidencia son elegidos para crear la anisotropía magnética uniaxial deseada. En este aspecto, en la manera habitual el ángulo azimutal es el ángulo entre la proyección de la trayectoria de las partículas que son depositadas sobre el plano de la capa ferromagnética respectiva y una dirección de referencia que se extiende en el plano de la capa ferromagnética respectiva. El ángulo de referencia es el mismo para todas las capas de un dispositivo magneto-electrónico particular, pero de otra manera puede ser elegido y determinado arbitrariamente. Asimismo en la manera habitual el ángulo de incidencia es el ángulo entre la trayectoria de las partículas que son depositadas y una dirección perpendicular al plano de la capa ferromagnética respectiva. Como se conoce a partir del documento US 6.818.961 la dirección del eje fácil de la magnetización para cada una de las capas ferromagnéticas respectivas puede ser determinada eligiendo de manera adecuada el ángulo azimutal y un ángulo de incidencia distinto de cero. Con el fin de definir una dirección particular de magnetización a lo largo del eje definido por la anisotropía uniaxial, se puede aplicar un campo magnético externo adecuado relativamente pequeño durante la deposición de las capas ferromagnéticas. Se ha de observar que la estructura multicapa solo puede incluir la capa ferromagnética anterior o también puede incluir otras capas ferromagnéticas producidas de diferente forma, por ejemplo mediante deposición de ángulo cero.

55 Los inventores de la presente invención han reconocido que eligiendo individualmente los grosores, los ángulos azimutales y los ángulos de incidencia para las múltiples capas ferromagnéticas es posible proporcionar de manera flexible y fácil la estructura multicapa con las durezas magnéticas definidas y las orientaciones relativas de la magnetización de las capas ferromagnéticas, y de este modo adaptar de manera flexible la estructura multicapa y el

dispositivo magneto-electrónico a aplicaciones particulares. En particular, es posible generar de manera fácil, de manera fiable y de manera estable cualesquiera orientaciones relativas deseadas de las magnetizaciones de capas ferromagnéticas adyacentes diferentes de la configuración paralela y anti-paralela.

5 Por consiguiente, el método comprende además especificar una curva de magnetización para el dispositivo magneto-electrónico. Debido al hecho de que la curva de magnetización determina el campo de conmutación y el campo dependiente del comportamiento de conmutación, tal como en particular la sensibilidad, esta operación comprende preferiblemente especificar el campo de conmutación y el comportamiento de conmutación y luego determinar una curva de magnetización correspondiente. Se ha de observar en este aspecto que la curva de magnetización también determina la curva de magneto-resistencia para el dispositivo magneto-electrónico, es decir una característica particular de la propiedad magneto-resistiva del dispositivo como un todo. En este contexto la magnetización es medida integralmente sobre la estructura multicapa entera. En cuanto a la medición de la resistencia, puede ser la resistencia en el plano definido por las capas individuales o perpendicularmente a ese plano, es decir, perpendicular a la estructura de capa.

10 Se ha observado que el rendimiento del dispositivo magneto-electrónico solo puede ser determinado con un equipo muy especializado para detectar el cambio de dependencia de campo total de la magneto-resistencia y la relación de señal a ruido. Sin embargo, las características de magneto-resistencia dependientes del campo y la sensibilidad del dispositivo pueden ser concluidas directamente a partir de las curvas de histéresis magnética convencional, porque la conmutación magnética realizada en un cambio en la curva de histéresis es acompañada por un cambio correspondiente en la magneto-resistencia. Por lo tanto, las curvas de histéresis magnéticas detectadas a través de técnicas tales como, por ejemplo, SQUIS o MOKE pueden ser utilizadas para revelar la sensibilidad dependiente del campo del dispositivo magneto-electrónico.

15 Después, un número de capas ferromagnéticas y, para cada una de las capas ferromagnéticas, un momento magnético y una dureza magnética (es decir, la fuerza coercitiva) son determinados de tal manera que la estructura multicapa resultante exhibe la curva de magnetización especificada. Debido a la contribución aditiva de las capas individuales a la curva de magnetización, esta determinación puede ser fácilmente efectuada mediante, por ejemplo, simulaciones convencionales o también utilizando aproximaciones deterministas.

20 Subsiguientemente, para cada una de las capas ferromagnéticas un material magnético, un grosor, un ángulo azimutal y un ángulo de incidencia son determinados de tal manera que se obtiene el momento magnético determinado y la dureza magnética de la capa magnética respectiva. Esta determinación puede ser fácilmente efectuada de una manera determinista basándose en la dependencia conocida del momento magnético y de la dureza magnética en el grosor de parámetros, el ángulo azimutal y el ángulo de incidencia. La dependencia puede ser determinada para cada material posible a modo de experimento. Esta operación puede incluir además opcionalmente determinar para cada capa ferromagnética si una capa de semilla debería estar dispuesta directamente adyacente a la capa ferromagnética correspondiente y a las propiedades de tal capa de alimentación opcional. Una capa de semilla puede estar, por ejemplo, dispuesta directamente entre y en contacto con una capa ferromagnética y un sustrato sobre el cual se deposita la estructura multicapa, tal como preferiblemente un sustrato no magnético, químicamente inerte. Tales capas de semilla son capaces de influir en la estructura cristalina y en el perfil de superficie lateral de la capa ferromagnética depositada respectiva, influyendo así en la anisotropía magnética y en la dureza magnética de la capa ferromagnética, y puede ser más fácil obtener características particulares junto con una capa de semilla en comparación con variar el grosor, el ángulo azimutal y el ángulo de incidencia. Se ha de observarse que, como se ha mencionado anteriormente, mientras se prefiere que todas las capas ferro magnéticas sean depositadas utilizando un ángulo de incidencia distinto a cero, también es posible que para algunas capas ferromagnéticas se utilice una deposición de incidencia de ángulo cero.

40 Finalmente, la deposición de la estructura multicapa es llevada a cabo utilizando el material, el grosor, el ángulo azimutal y el ángulo de incidencia determinados - y posiblemente la capa de semilla determinada - para cada una de las capas ferromagnéticas.

45 Seleccionando y ajustando de manera variable la dureza magnética y el momento magnético de las capas ferromagnéticas, estructuras multicapa que tienen curvas de magneto-resistencia muy diferentes pueden ser realizadas. Por ejemplo, es posible ajustar de manera selectiva la inclinación de la curva de magneto-resistencia en un rango particular de resistencia de campo magnético con el fin de permitir una medición cuantitativa precisa en ese rango. Además, las estructuras multicapa son de baja complejidad, porque las propiedades magnéticas de las capas ferromagnéticas no dependen del acoplamiento magnético entre las capas o de la sujeción. Así, por ejemplo, la estructura multicapa puede ser depositada directamente sobre un sustrato no magnético. Debido a la construcción de dureza magnética selectiva de la capa ferromagnética adyacente al sustrato, ninguna capa de sujeción anti-ferromagnética es requerida entre ellos. Además el grosor y la composición del material de las capas no magnéticas que es mucho menos crítica que en la técnica anterior, porque las propiedades magnéticas de las capas ferromagnéticas están definidas por cada capa ferromagnética por sí mismas. Así, la presente invención extiende drásticamente de manera ventajosa las posibilidades de ajustar de manera selectiva y de manera precisa las características magneto-resistivas de las estructuras multicapa.

55 En una realización preferida, para una, más de una o todas las capas ferromagnéticas el ángulo de incidencia es superior a 45°, preferiblemente superior a 70°, más preferiblemente superior a 80° y lo más preferiblemente superior a 85°. Se ha

encontrado que, ventajosamente, la dureza magnética aumenta rápidamente para ángulos de incidencia superiores a 70°, en particular para ángulos de incidencia superiores a 80°.

5 En una realización preferida, para cada una de las capas ferromagnéticas el ángulo de incidencia es elegido de tal manera que la capa forma hermética respectiva exhibe una anisotropía magnética uniaxial con el eje fácil orientado perpendicularmente con respecto a un plano atravesado por la trayectoria de las partículas que son depositadas y la proyección de esta trayectoria sobre el plano definido por la capa ferromagnética respectiva. Los ángulos que resultan en tal orientación perpendicular generalmente también exhiben una dureza magnética superior a los ángulos que resultan en una orientación paralela.

10 En una realización preferida, para cada una de las dos capas ferromagnéticas adyacentes de las capas ferromagnéticas los ángulos azimutales son diferentes, de tal manera que los momentos magnéticos resultantes tienen diferentes direcciones. En particular, para al menos dos capas ferromagnéticas adyacentes de las capas ferromagnéticas la diferencia en los ángulos azimutales está entre 1° y 179°, preferiblemente entre 1° de encabezados o entre 91° y 179°, es decir se hace uso de la posibilidad de proporcionar fácilmente orientaciones relativas que no son paralelas, anti-paralelas o perpendiculares, mejorando en gran medida de este modo la flexibilidad y la adaptabilidad de la producción de los dispositivos ferromagnéticos.

15 Generalmente, para cada una de las capas ferromagnéticas puede ser utilizada cualquier aleación que contenga elementos que se ordenan ferro-magnéticamente en la aleación de tal manera que da como resultado un momento magnético efectivo de la capa correspondiente. El material seleccionado para la capa ferromagnética es entonces constituido o comprende tales elementos. En una realización preferida, para cada una de las capas ferromagnéticas el material magnético es elegido a partir del grupo consistente en Fe, Co, Ni y aleaciones termodinámicamente estables de los mismos. En este aspecto se ha de observar que cada capa ferromagnética también puede comprender otros materiales además del material magnético. Así, en esta realización se puede utilizar cualquier aleación que contenga suficientes proporciones de Fe, Co y/o Ni para que la aleación exhiba propiedades ferromagnéticas. Tales otros materiales pueden estar presentes, por ejemplo, en una cantidad de hasta el 50% en peso o incluso el 70% en peso.

20 En una realización preferida, cada una de las dos capas ferromagnéticas adyacentes tienen la misma composición de material o cada una de las dos capas ferromagnéticas adyacentes tienen diferentes composiciones de material. En este aspecto, se ha hecho uso de la posibilidad y de la flexibilidad para elegir fácilmente diferentes materiales magnéticos (y otros materiales posibles), mejorando en gran medida de este modo la flexibilidad y la adaptabilidad de la producción de dispositivos magneto-electrónicos.

25 En una realización preferida, para cada una de las capas no magnéticas se determina adicionalmente un material y un grosor, y la estructura multicapa es entonces depositada utilizando el material determinado y el grosor para cada una de las capas no magnéticas. Estos parámetros determinan diferentes características, tales como la resistencia eléctrica, la conservación de la polarización giratoria de los electrones y un acoplamiento indeseado posible entre capas ferromagnéticas adyacentes a través de campos alejados, de modo que una elección adecuada de estos parámetros extiende adicionalmente y facilita el ajuste de las propiedades magneto-resistivas.

30 En una realización preferida la deposición de las capas ferromagnéticas y/o la deposición de las capas no magnéticas es llevada a cabo por medio de deposición de haz de iones o deposición física de vapor, tal como, por ejemplo, pulverización por bombardeo iónico. Preferiblemente, para pulverizar por bombardeo iónico capas depositadas se utiliza una presión de gas de trabajo baja y un sistema de máscara que ayudan a aumentar la uniformidad de la dirección de incidencia de las partículas depositadas y, así, la calidad de las capas depositadas.

35 En una realización preferida la estructura multicapa es depositada sobre un sustrato no magnético, químicamente inerte. Puede ser depositada directamente sobre el sustrato, o, por ejemplo, una capa de semilla puede estar dispuesta entre el sustrato y las estructuras multicapa de tal manera que estén en contacto tanto con el sustrato como con una de las capas ferromagnéticas. En esta conexión se ha observado que, como ya se ha mencionado anteriormente, una capa de semilla respectiva también puede estar dispuesta directamente adyacente a una o más de las capas ferromagnéticas alejadas del sustrato. Como también se ha indicado ya anteriormente, tales capas de semilla, tales como, por ejemplo, capas de tántalo, pueden ayudar a modificar la estructura cristalina y la rugosidad superficial de las capas depositadas y a influir de este modo en la magneto-resistencia del sistema total.

40 Como ya se ha explicado en detalle anteriormente, el método anterior puede ser utilizado ventajosamente para producir un dispositivo magneto-electrónico que comprende una estructura multicapa que incluye al menos dos capas ferromagnéticas dispuestas una en la parte superior de la otra y que tienen cada una de ellas una anisotropía magnética con un momento magnético correspondiente, en el que cada una de las dos capas ferromagnéticas adyacentes de las al menos dos capas ferromagnéticas está separada por una capa no magnética respectiva y exhibe una anisotropía magnética uniaxial con ejes fáciles orientados en diferentes direcciones. Para al menos dos y preferiblemente para todas las adyacentes de las al menos dos capas ferromagnéticas la orientación relativa de los ejes fáciles es diferente de la anti-paralela. Preferiblemente, para cada par respectivo de capas ferromagnéticas adyacentes la orientación relativa es entre 1° y 179°, preferiblemente entre 1° y 89° o entre 91° y 179°. Un dispositivo que tiene tales orientaciones relativas o la magnetización de capas ferromagnéticas adyacentes exhibe propiedades magneto-resistivas no encontradas en

dispositivos de la técnica anterior, y para cualquier aplicación particular posible se puede encontrar un dispositivo que satisface los requisitos de esta aplicación, tal como un campo de conmutación particular y una sensibilidad dependiente del campo particular.

5 En una realización preferida, la estructura multicapa del dispositivo magneto-electrónico es depositada directamente sobre o dispuesta directamente en un sustrato no magnético, químicamente inerte de tal manera que una de las capas ferromagnéticas de la estructura multicapa esté en contacto con el sustrato. Tal dispositivo magneto-electrónico es de una construcción particularmente simple. En la alternativa, una capa de semilla puede estar dispuesta directamente entre el sustrato y una de las capas ferromagnéticas de tal manera que esté en contacto con ambos de ellos.

En una realización preferida el dispositivo magneto-electrónico es un sensor de campo magnético.

10 A continuación se han descrito en más detalle realizaciones ejemplares de la invención con referencia a las figuras.

La fig. 1a) muestra vistas lateral y superior esquemáticas de un sustrato inerte sobre el que es depositada una capa de hierro ferromagnética mediante deposición de pulverización por bombardeo iónico de incidencia oblicua.

15 La fig. 1b) muestra curvas de magnetización esquemáticas de la capa de hierro de la fig. 1a) para el eje fácil y el eje difícil, respectivamente.

La fig. 2 muestra curvas de magnetización esquemáticas de la capa de hierro de la fig. 1a) para los tres ángulos de deposición diferentes $\theta = 0^\circ, 45^\circ$ y 80° .

La fig. 3 ilustra para la capa de hierro de la fig. 1a) la dependencia de la dureza magnética en el ángulo θ de incidencia de los átomos de hierro.

20 La fig. 4 ilustra esquemáticamente un proceso en el que una estructura multicapa que comprende múltiples capas de hierro ferromagnéticas separadas por capas intermedias no magnéticas es depositada sobre un sustrato inerte.

La fig. 5a) muestra curvas de reflectividad de rayos X resonantes electrónicas y nucleares (magnéticas) para el dispositivo 10 magneto-electrónico mostrado en la fig. 7a).

25 La fig. 5b) muestra el comportamiento de saturación magnética del dispositivo magneto-electrónico que depende de un campo magnético externo.

La fig. 6a) ilustra diferentes combinaciones de momentos magnéticos de dos capas de hierro adyacentes de grosor idéntico separadas por una capa no magnética y preparadas de la misma forma que la estructura multicapa del dispositivo magneto-electrónico de la fig. 7a).

30 La fig. 6b) muestra para cada una de las combinaciones de la fig. 6a) la dirección del campo magnético externo utilizada para medir curvas de magnetización.

La fig. 6c) ilustra curvas de magnetización esquemáticas para cada una de las combinaciones de la fig. 6a).

La fig. 7a) muestra un dispositivo magneto-electrónico producido por el proceso ilustrado en la fig. 4.

35 La fig. 7b) ilustra los momentos magnéticos de las capas de hierro individuales de una realización ejemplar del dispositivo magneto-electrónico de la fig. 7a).

40 La fig. 1a) ilustra esquemáticamente la deposición de una capa 1 de hierro ferromagnética sobre un sustrato 2 químicamente inerte por medio de deposición de átomos de hierro de pulverización por bombardeo iónico de incidencia oblicua en una vista lateral y en una vista superior sobre la capa 1 de hierro y el sustrato 2. Como se puede ver en la vista lateral, la dirección 3 de los átomos de hierro incidentes está en un ángulo θ distinto de cero de, por ejemplo, 80° con respecto a la dirección 4 perpendicular al plano definido por la extensión del sustrato 2 y de la capa 1 de hierro. Además, en el ejemplo ilustrado la deposición es efectuada en un ángulo azimutal α de 0° con respecto a una dirección de referencia 5 que se extiende paralela al plano de extensión por la dirección de extensión de la capa 1 de hierro, es decir el ángulo entre la dirección de referencia 5 y la proyección de la dirección de incidencia 3 sobre el plano definido por la extensión del sustrato 2 y de la capa 1 de hierro es cero.

45 Debido a esta deposición de pulverización por bombardeo iónico en un ángulo θ oblicuo grande en la capa de hierro 1 depositada exhibe una anisotropía magnética uniaxial con un eje fácil 6 perpendicular al plano definido por la dirección de incidencia 3 y la proyección de esa dirección sobre el plano de extensión del sustrato 2 y de la capa 1 de hierro. El eje fácil 6 uniaxial corresponde a dos direcciones 7 posibles del momento magnético M_r de la capa 1 de hierro. Una de las direcciones 7 puede ser seleccionada por ejemplo aplicando un campo magnético pequeño durante la deposición.

La fig. 1b) muestra curvas de magnetización esquemáticas de la capa 1 de hierro de la fig. 1a) que corresponden al eje fácil 6 y al eje difícil perpendicular al mismo. Tales curvas de magnetización pueden ser medidas mediante, por ejemplo, MOKE.

5 Con el fin de ilustrar la dependencia de las curvas de magnetización medidas en el ángulo de deposición θ , la fig. 2 muestra las curvas de magnetización esquemáticas para los ángulos libres $\theta = 0^\circ$, 45° y 80° . Para $\theta = 0^\circ$, es decir, cuando la deposición de incidencia oblicua no es utilizada, como es común en la técnica anterior, no se genera ninguna anisotropía magnética uniaxial, de modo que no existe eje fácil. En vez de ello, la curva de magnetización es entonces independiente de la dirección de medición y la capa de hierro es magnética blanda. En un ángulo $\theta = 45^\circ$ está presente un pequeño aumento en la anisotropía magnética, y el eje fácil está orientado perpendicularmente con respecto a la dirección de incidencia 3 de los átomos de hierro. Esto también es cierto para un ángulo $\theta = 80^\circ$, pero adicionalmente la capa 1 de hierro es magnética dura.

10 La fig. 3 ilustra para la capa 1 de hierro de la fig. 1a) la dependencia de la dureza magnética, es decir del campo coercitivo, del ángulo θ de incidencia de los átomos de hierro. Se puede ver que es posible ajustar de manera continua la dureza magnética seleccionando de manera adecuada el ángulo θ . Así, para cualquier material magnético, las capas magnética blanda y magnética dura pueden ser producidas de manera selectiva en una estructura multicapa.

15 La fig. 4 ilustra esquemáticamente un proceso en el que una estructura multicapa que comprende múltiples capas de hierro, de las separadas por capas intermedias no magnéticas es depositada sobre un sustrato inerte, que da como resultado eventualmente un dispositivo magneto-electrónico. La primera operación de este proceso es esencialmente idéntica a la fig. 1a), es decir una capa 1 de hierro ferromagnética es depositada sobre el sustrato 2 mediante deposición de pulverización por bombardeo iónico de incidencia oblicua en un ángulo de deposición θ de 80° . Sin embargo, a diferencia del ejemplo de la fig. 1a), se ha utilizado un ángulo azimutal α de $+20^\circ$, que da como resultado un momento magnético M_1 de la capa 1 de hierro.

20 En la segunda operación, subsiguiente a la deposición de la primera capa 1 de hierro directamente sobre el sustrato, una capa de carbono 8 no magnética es depositada sobre la capa 1 de hierro en incidencia perpendicular, es decir, en un ángulo θ de 0° . Después, una segunda capa 1 de hierro es depositada sobre la capa de carbono 8 de la misma manera que la primera capa 1 de hierro fue depositada sobre el sustrato 2, utilizando un ángulo azimutal de -20° , dando como resultado un momento magnético M_2 de esta capa 1 de hierro perpendicular al momento magnético M_1 de la primera capa 1 de hierro. Después de esto, una segunda capa de carbono 8 no magnética es depositada sobre la segunda capa 1 de hierro en incidencia perpendicular, es decir en un ángulo θ de 0° . Estas operaciones son repetidas varias veces, tal como, por ejemplo, seis veces, de modo que eventualmente se crea una estructura multicapa que comprende una secuencia alternativa de doce capas de hierro y doce capas de carbono 1, 8 en el sustrato 2, en donde cada una de las dos capas 1 de hierro tiene magnetizaciones orientadas en un ángulo relativo de 40° . La estructura multicapa resultante, que constituye un dispositivo 10 magneto-electrónico, es ilustrada en la fig. 7a) y caracterizada magnéticamente en las figs. 5a) y 5b).

25 La fig. 5a) muestra esquemáticamente curvas de reflectividad de rayos X resonantes electrónica (la curva superior) y nucleares (las dos curvas inferiores) medidas para el dispositivo 10 magneto-electrónico mostrado en la fig. 7a). Los detalles de un método con el que puede llevarse a cabo la medición de estas curvas pueden ser tomados de la publicación K. Schlage y R. Röhlberger, "Nuclear resonant scattering of synchrotron radiation: Applications in magnetism of layered structures", J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. (2013) (publicado en línea: <http://dx.doi.org/10.1016/j.elspec.2013.02.005>). También se ha ilustrado que la estructura multicapa puede asumir dos estados de suelo magnéticos, el segundo de los cuales es ilustrado en la fig. 4. Los estados del suelo pueden ser inducidos por un campo magnético externo fuerte de por ejemplo 100 mT (véase el tercio izquierdo de la fig. 5a) y están caracterizados por un ángulo de apertura grande de 140° de las dos subredes magnéticas (magnetización neta baja) y por un ángulo de apertura pequeño de 40° , respectivamente (magnetización neta alta), véase el tercio derecho de la fig. 5a). El estado del suelo 1 que tiene el ángulo de apertura de 140° conduce a un pico de superestructura magnética fuerte en las curvas de reflectividad en un ángulo de $0,25^\circ$.

30 La fig. 5b) muestra el comportamiento de saturación magnética del dispositivo magneto-electrónico que depende de un campo magnético externo para el estado del suelo 1 con un campo externo creciente (símbolos negros) que ha sido aplicado a lo largo del eje difícil resultante. La curva corresponde a la intensidad del pico de la superestructura magnética. Como se ha ilustrado en la fig. 5b), los cambios monótonos de la intensidad corresponden al comportamiento de saturación de las dos subredes debido a la rotación de la magnetización de las capas 1 de hierro individuales fuera de su eje fácil. Los símbolos grises ilustran el desarrollo de la intensidad del pico de la superestructura magnética si el campo magnético externo es disminuido subsiguientemente de nuevo. La curva representada por los símbolos grises es esencialmente idéntica a la curva representada por los símbolos negros, de modo que no está presente ningún efecto de histéresis.

35 La fig. 6a) ilustra diferentes combinaciones de anisotropía magnética impresa (caracterizadas por la orientación del eje fácil y la dureza magnética) de dos capas 1 de hierro adyacentes de grosor idéntico separadas por una capa no magnética y – aparte del menor número de capas – preparada de la misma forma que la estructura multicapa del dispositivo 10 magneto-electrónico de la fig. 7a). La anchura de las flechas en la fig. 6a) indica la magnitud relativa de la

anisotropía magnética impresa, es decir, la dureza magnética, en la que flechas más anchas representan una dureza magnética superior que flechas más estrechas. Son realizadas mediante la elección adecuada de los ángulos de deposición θ y los ángulos azimutales α durante la deposición de las capas 1 de hierro. La fig. 6b) muestra para cada una de las opciones de la fig. 6a) la dirección del campo magnético externo utilizada para medir curvas de magnetización, que se han mostrado en la fig. 6c). Como se puede ver, eligiendo selectivamente los ángulos de deposición θ y los ángulos azimutales α y, de este modo, la dureza magnética y las direcciones de magnetización de las capas 1 de hierro individuales, es posible variar de manera selectiva las características de las curvas de magnetización en un amplio rango. Por ejemplo, la curva de magnetización puede estar hecha para exhibir un salto brusco (la opción superior), para exhibir un comportamiento de conmutación magnética curvada (la opción media) o para exhibir una relación aproximadamente lineal con el campo magnético externo (la opción inferior). Para cada opción la curva de magnetización izquierda ha sido medida para una estructura multicapa con una anisotropía magnética inferior a la curva de magnetización derecha.

El cambio de la magnetización que corresponde a las curvas de magnetización da como resultado un cambio correspondiente de la magneto-resistencia. Por lo tanto, es posible definir una curva de magnetización que conduce a características de magneto-resistencia dependientes del campo adecuadas para una aplicación particular. Después, se pueden determinar las propiedades magnéticas y los parámetros de fabricación correspondientes de las capas 1 de hierro y de las capas 8 intermedias lo que da como resultado la curva de magnetización deseada. Por ejemplo, si se desea una curva de magnetización que tiene características lineales para una aplicación particular, se elige la combinación inferior de los momentos magnéticos. Debido a la posibilidad de realizar características curvadas, inclinadas o casi lineales de la curva de magnetización, es, por ejemplo, posible producir dispositivos magneto-electrónicos que son capaces de llevar a cabo mediciones cuantitativas del campo magnético externo. A diferencia de la técnica anterior, la presente invención permite un ajuste o una configuración flexible de la intensidad de campo magnético o el rango de intensidad de campo magnético y de otras características del campo magnético que puede ser medidas cualitativa y cuantitativamente, y tal ajuste es posible de una manera fácil.

La fig. 7a) muestra un dispositivo 10 magneto-electrónico producido por el proceso ilustrado en la fig. 4. La fig. 7b) es una vista superior esquemática de una realización ejemplar del dispositivo 10 en la que están indicadas las direcciones de los momentos magnéticos de las capas 1 de hierro individuales. Como se puede ver, la dirección del momento magnético varía gradualmente en el sentido de las agujas del reloj desde la capa de hierro más inferior 1' a la capa de hierro más superior 1". Esto ilustra que es posible realizar perfiles de magnetización multicapa muy complejos.

REIVINDICACIONES

1. Un método de producción de un dispositivo magneto-electrónico multicapa, comprendiendo el método:

5 depositar una estructura (10) multicapa que incluye al menos dos capas ferromagnéticas (1) dispuestas una en la parte superior de la otra y que tiene cada una de ellas una anisotropía magnética con un momento magnético correspondiente, en donde cada una de las dos capas (1) ferromagnéticas de las al menos dos capas (1) ferromagnéticas son separadas por una capa (8) no magnética respectiva, y en donde cada una de las capas (1) ferromagnéticas es depositada en un ángulo azimutal respectivo con respecto a una dirección (5) de referencia que se extiende en el plano de extensión de la capa (1) ferromagnética respectiva y en un ángulo de incidencia diferente a cero con respecto a una dirección (4) perpendicular al plano de extensión de la capa (1) ferromagnética respectiva, de tal manera que la capa (1) ferromagnética respectiva exhibe una anisotropía magnética uniaxial, caracterizado por que

- una magnetización es especificada para el dispositivo (10) magneto-electrónico que ha de ser producido,

15 - el número de capas (1) ferromagnéticas y, para cada una de las capas (1) ferromagnéticas, el momento magnético y la dureza magnética para obtener la curva de magnetización especificada son determinados,

- para cada una de las capas (1) ferromagnéticas un material magnético, un grosor, un ángulo azimutal y un ángulo de incidencia son determinados para obtener el momento magnético determinado y la dureza magnética de la capa (1) ferromagnética respectiva, y

20 - finalmente la operación de depositar la estructura (10) multicapa es llevada a cabo utilizando el material, el grosor, el ángulo azimutal y el ángulo de incidencia determinados para cada una de las capas (1) ferromagnéticas.

2. El método según la reivindicación 1, en el que para al menos una de las capas (1) ferromagnéticas el ángulo de incidencia es superior a 45°.

25 3. El método según la reivindicación 2, en el que para al menos una de las capas (1) ferromagnéticas el ángulo de incidencia es superior a 80°.

30 4. El método según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que para cada una de las capas (1) ferromagnéticas el ángulo de incidencia es elegido de tal manera que la capa (1) ferromagnética respectiva exhibe una anisotropía magnética uniaxial con el eje (6) fácil orientado perpendicularmente con respecto a un plano abarcado por la dirección (3) de deposición y la proyección de la dirección (3) de deposición sobre el plano de extensión de la capa (1) ferromagnética respectiva.

5. El método según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que para cada dos capas (1) ferromagnéticas adyacentes de las al menos dos capas ferromagnéticas (1) los ángulos azimutales son diferentes, de tal manera que los momentos magnéticos resultantes tienen diferentes direcciones.

35 6. El método según la reivindicación 5, en el que para al menos dos capas (1) ferromagnéticas adyacentes de las al menos dos capas (1) ferromagnéticas la diferencia en los ángulos azimutales está entre 1° y 89° o entre 91° y 179°.

7. El método según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que para cada una de las capas (1) ferromagnéticas el material es elegido del grupo que consiste en Fe, Co, Ni y aleaciones de los mismos.

40 8. El método según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que cada una de las dos capas (1) ferromagnéticas adyacentes tienen la misma composición material o cada una de las dos capas (1) ferromagnéticas adyacentes tienen diferentes composiciones de material.

9. El método según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, que comprende además

- determinar, para cada una de las capas (8) no magnéticas, el material y el grosor, y

45 - depositar la estructura (10) multicapa utilizando el material y el grosor determinados para cada una de las capas (8) no magnéticas.

10. El método según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que la deposición de las capas (1) ferromagnéticas y/o la deposición de las capas (8) no magnéticas es llevada a cabo por medio de deposición de haz de iones o deposición física de vapor.

50 11. El método según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que la estructura (10) multicapa es depositada sobre un sustrato (2) no magnético, químicamente inerte.

12. El método según la reivindicación 11, una capa de semilla está dispuesta entre el sustrato (2) y la estructura (10) multicapa y está en contacto tanto con el sustrato (2) como con una de las capas (1) ferromagnéticas.

13. El método según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que el dispositivo (10) magneto-electrónico es un sensor de campo magnético.

5 14. Un dispositivo magneto-electrónico que se puede producir por un método según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, que comprende una estructura (10) multicapa que incluye al menos dos capas (1) ferromagnéticas dispuestas una en la parte superior de la otra y que tiene cada una de ellas una anisotropía magnética con un momento magnético correspondiente, en donde cada una de las dos capas (1) ferromagnéticas adyacentes de las al menos dos capas (1) ferromagnéticas están separadas por una capa (8) no magnética respectiva y exhiben una anisotropía magnética uniaxial con los ejes fáciles orientados en direcciones diferentes,

10 caracterizado por que para al menos dos adyacentes de las al menos dos capas (1) ferromagnéticas la orientación relativa de los ejes fáciles es diferente de la anti-paralela.

15 15. El dispositivo magneto-electrónico según la reivindicación 14, en el que la estructura (10) multicapa es depositada directamente sobre un sustrato (2) no magnético, químicamente inerte de tal manera que una de las capas (1) ferromagnéticas de la estructura (10) multicapa está en contacto con el sustrato (2).

Fig. 1

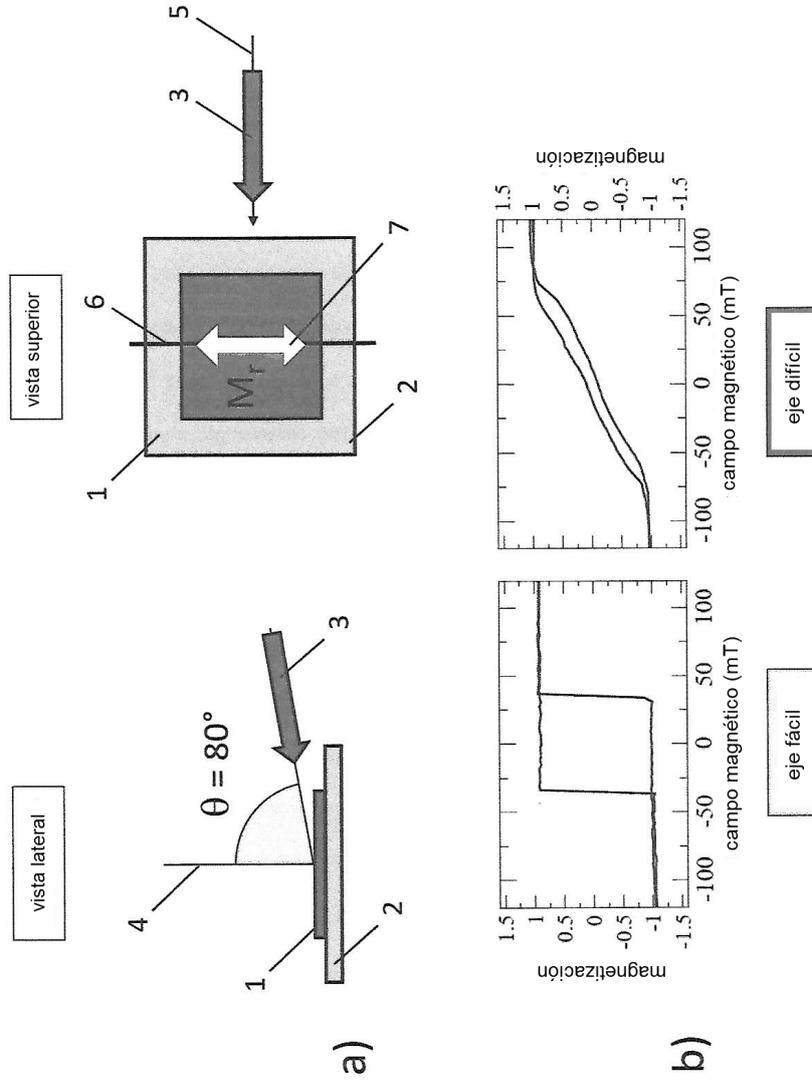


Fig. 2

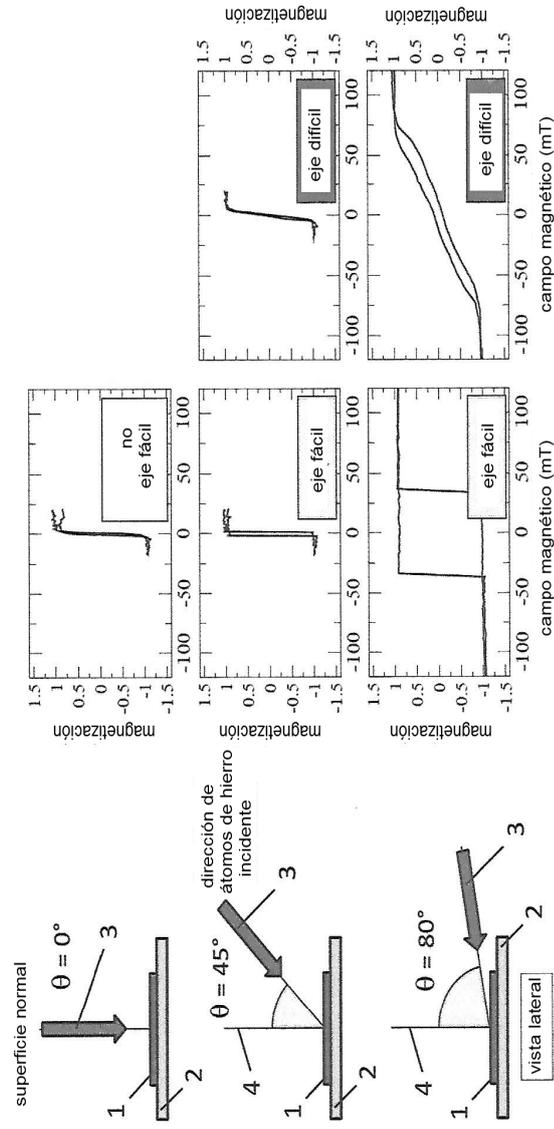


Fig. 3

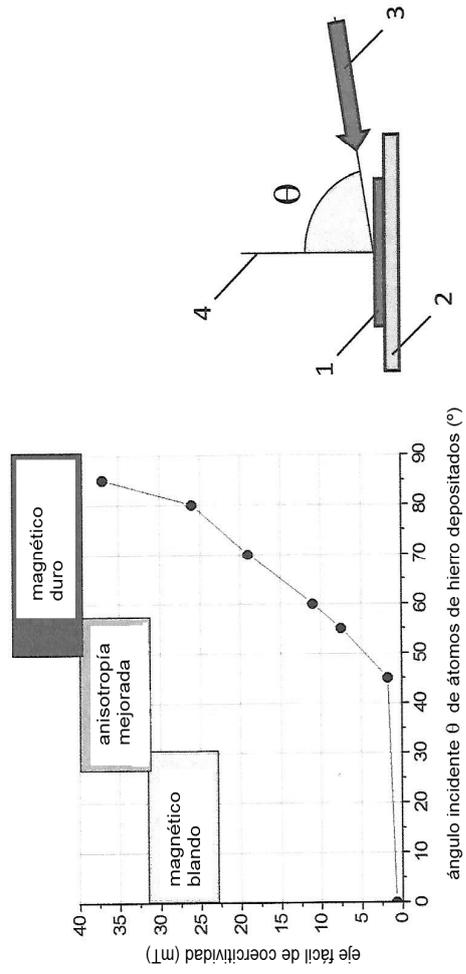


Fig. 4

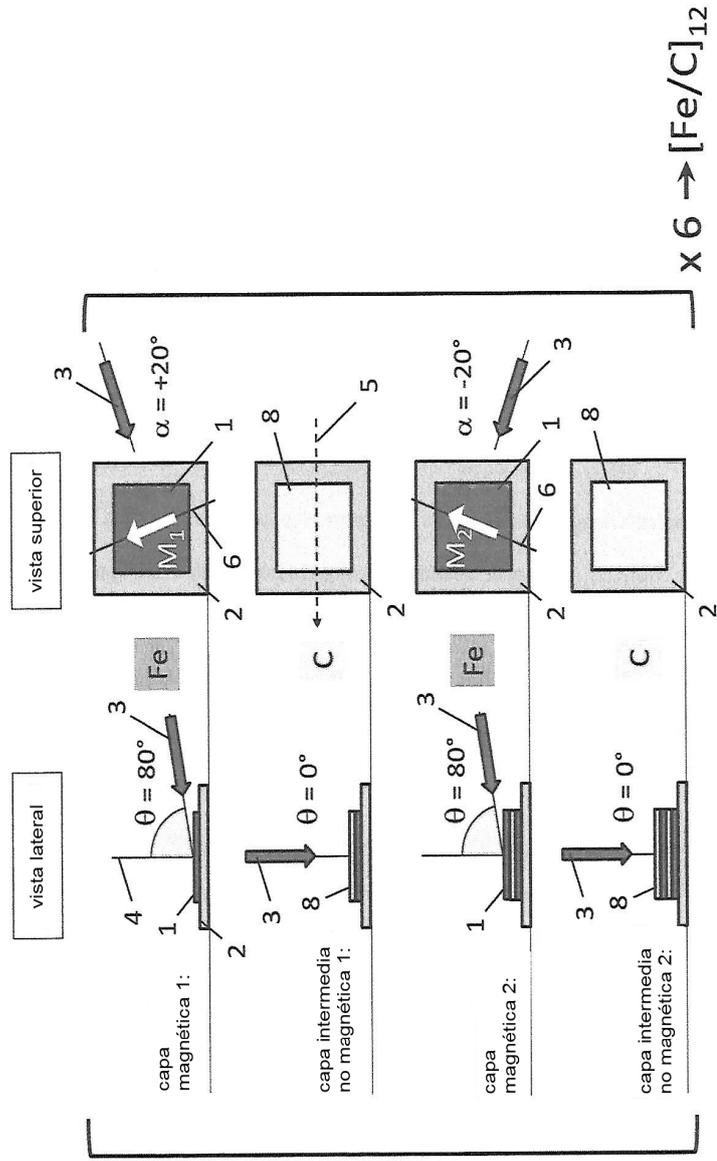
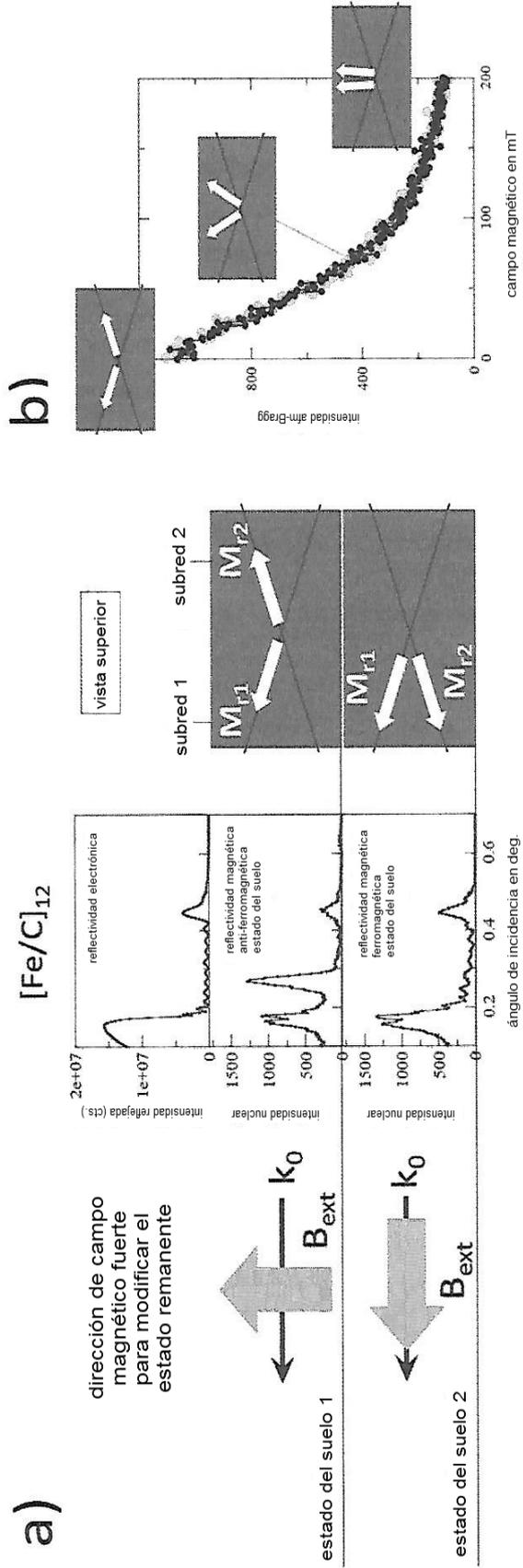


Fig. 5



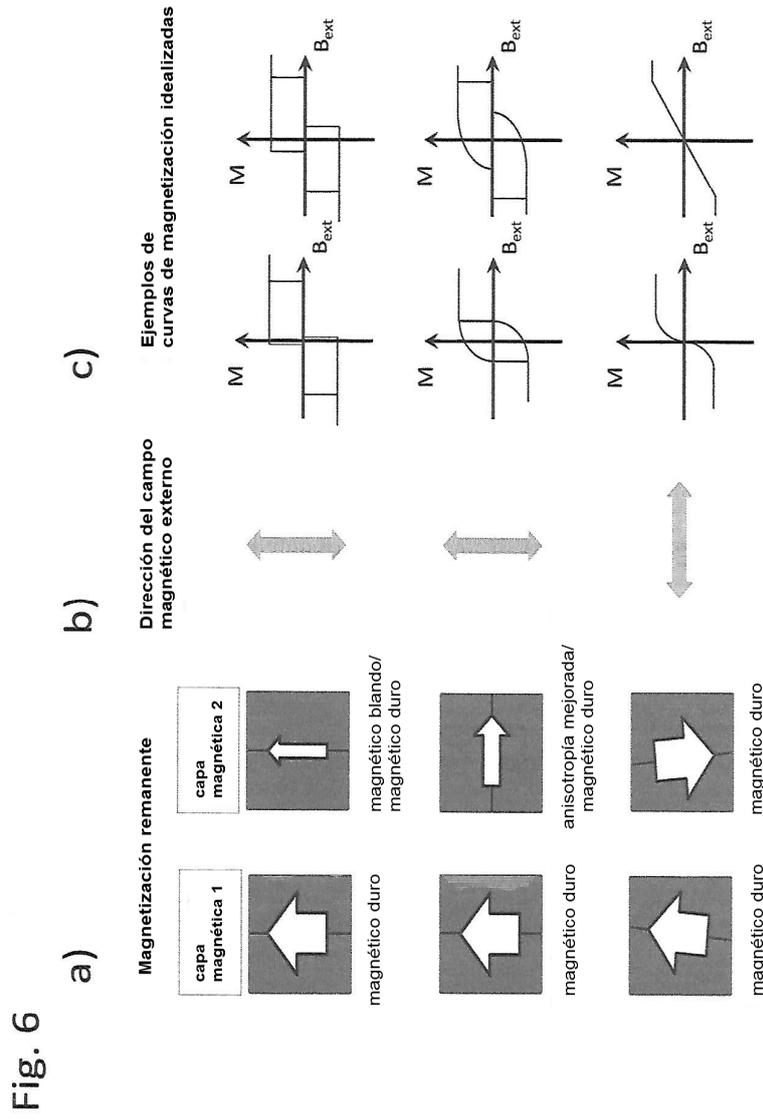


Fig. 7

