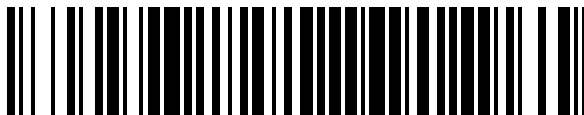


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **1 314 531**

21 Número de solicitud: 202432027

51 Int. Cl.:

H01F 10/32

(2006.01)

12

SOLICITUD DE MODELO DE UTILIDAD

U

22 Fecha de presentación:

16.02.2023

43 Fecha de publicación de la solicitud:

05.03.2025

71 Solicitantes:

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
(75.00%)**

**Avenida de Séneca, 2
28040 Madrid (Madrid) ES y
UNIVERSIDAD DE CASTILLA-LA MANCHA
(25.00%)**

72 Inventor/es:

**RANCHAL SÁNCHEZ, Rocío;
COTÓN SÁNCHEZ, Noelia;
CABRERA GALLARDO, Alejandro José y
ANDRÉS GONZÁLEZ, Juan Pedro**

54 Título: **Sistema magnético en forma de multicapa con inversión de la imanación isotrópica y al unísono**

ES 1 314 531 U

DESCRIPCIÓN

Sistema magnético en forma de multicapa con inversión de la imanación isotrópica y al unísono

5 **Sector de la técnica**

La presente invención se encuadra en el campo de materiales magnéticos. De forma más concreta, la invención se refiere a materiales magnéticos en forma de película delgada de aplicación en la industria de materiales magnéticos.

10

Antecedentes de la invención

Uno de los campos más estudiados dentro de los materiales magnéticos es el de los acoplamientos magnéticos para controlar los procesos de imanación en sistemas multicapa, también conocidos como superredes o heteroestructuras, formados a partir del apilamiento de capas magnéticas de distintos materiales. El acoplamiento magnético entre las diferentes láminas es de gran importancia tanto para el entendimiento de fenómenos fundamentales como para aplicaciones prácticas en la industria y la investigación experimental.

Uno de los efectos que conllevan el uso en el ámbito de las aplicaciones de sistemas multicapas magnético es el conocido como efecto *exchange-bias*, de amplia utilización en dispositivos de espintrónica. Otros acoplamientos magnéticos que se utilizan en las multicapas magnéticas son la interacción de tipo Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida (conocida como RKKY), el acoplamiento antiferromagnético entre materiales formados por elementos de tierras raras pesados y metales magnéticos de transición, o las interacciones con paredes de dominio, por ejemplo.

Sin embargo, a pesar de la indiscutible gran utilidad de los sistemas multicapa magnéticos y el número considerable de acoplamientos que pueden existir, uno de los grandes inconvenientes de los sistemas multicapa es que, en el proceso de inversión de la imanación, pueden aparecer saltos independientes de la imanación provenientes del comportamiento magnético de cada material constituyente por separado. Independientemente de la intensidad del acoplamiento, este fenómeno es evidente cuando el espesor de las capas excede la longitud de correlación de canje o la pared de dominio del material. De hecho, hay que considerar diferentes longitudes dependiendo del fenómeno considerado. Por ejemplo, en los conocidos como "spring magnets" se acopla una capa magnéticamente dura con otra blanda para obtener un material con propiedades magnéticas mixtas en los que se necesita una inversión de la imanación coherente, sin saltos independientes por parte de cada material constituyente. Para ello, la capa magnéticamente blanda tiene que ser suficientemente fina, siendo este espesor crítico el doble del espesor de la pared de dominio del material duro. Como el material duro tiene una anisotropía magnética muy elevada, este requisito impone una gran restricción al espesor de la fase blanda, del orden de las decenas de nanómetros, siendo esta distancia menor que su propia pared de dominio o longitud de correlación de canje. En cualquier caso, es una práctica usual el desarrollar sistemas multicapa en los que el espesor de las capas es menor que su longitud de canje o su pared de dominio para evitar saltos independientes de la imanación. Esto implica un control preciso del espesor si se busca una inversión de la imanación coherente. Por otro lado, las aplicaciones a desarrollar están limitadas por la necesidad de que las capas magnéticas tengan un espesor menor que estas longitudes críticas.

Por tanto, sería deseable superar esta restricción del espesor de las capas (que viene impuesta por aspectos fundamentales de los materiales magnéticos, como son por ejemplo la interacción de canje y la anisotropía magnética) para desarrollar sistemas multicapa magnéticos en los que, a pesar de estar constituidos por capas magnéticas con un espesor mayor que su longitud de

correlación canje o pared de dominio dependiendo del fenómeno considerado, el proceso de inversión de la imanación se realice de manera solidaria por las capas constituyentes de tal forma que en el ciclo de histéresis solo se observe un proceso de inversión de la imanación coherente.

5 Para superar este límite impuesto por las propiedades magnéticas de los materiales constituyentes que forman sistemas multicapa, la presente invención se basa en utilizar la propiedad de magnetostricción (propiedad de los materiales ferromagnéticos que hace que estos cambien de dimensión cuando se altera su estado de imanación) para acoplar distintos materiales magnéticos cuando formen parte de un sistema multicapa. El fenómeno de
10 magnetostricción se ha utilizado anteriormente para desarrollar sensores magnéticos con diferentes aplicaciones como un sensor magnético híbrido piezoeléctrico-ferromagnético (ES2164525_B2), un sensor para detección de posición (ES2785023_T3, WO2006123103_A1, EP2735849_A1), un sensor para la medida de la evolución de la masa de un cultivo celular (ES122352482_B1), por ejemplo.

15 En relación a sistemas magnéticos multicapa, existen documentos en los que se mencionan con el objetivo de controlar el coeficiente de magnetostricción (GB2268191_A) y/o con el objetivo de controlar el campo coercitivo de dichos sistemas (ES2171237_T3). Sin embargo, hasta el momento, no se han utilizado materiales magnetostrictivos para controlar el acoplamiento entre
20 capas magnéticas y, a partir de dicho acoplamiento, controlar la inversión magnética.

Explicación de la invención

25 La presente invención presenta un sistema multicapa de materiales magnéticos en donde las capas magnéticas se encuentran acopladas solidariamente mediante procesos magnetoelásticos. El sistema se basa en acoplar capas magnetostrictivas de materiales magnéticos cuyos coeficientes de magnetostricción son de signo opuesto.

30 La configuración más sencilla consiste en una estructura bicapa formada por dos capas donde una capa tiene coeficiente de magnetostricción positivo (el material se alarga cuando se imana) y la otra capa tiene un coeficiente de magnetostricción negativo (el material se encoge cuando se imana).

35 La obtención de un sistema magnético en forma de multicapa comprende:

- Seleccionar un sustrato sobre el que depositar las capas.
- Seleccionar dos materiales magnetostrictivos con coeficiente de magnetostricción (λ) de signo opuesto.
- Realizar el crecimiento de las capas magnetostrictivas seleccionadas de manera consecutiva
40 hasta el espesor deseado, alternando capas de materiales con coeficientes de magnetostricción de signo opuesto.

45 El crecimiento de las capas se puede realizar por electrodeposición, por pulverización catódica o *sputtering*, o por cualquier otra técnica que permita el control de espesor de crecimiento del material magnético en forma de capa, como el láser pulsado o deposición de capa atómica.

50 El método se puede extrapolar a una estructura multicapa siempre que las capas de materiales con coeficientes de magnetostricción de signos opuestos se encuentren dispuestas de manera alternada. No existe requerimiento sobre valores de anisotropía magnética o de interacción de canje para cada uno de los materiales constituyentes. No existe restricción en la técnica de la fabricación de capas ni en el espesor de las mismas (que puede ser superior a la longitud de canje o a la de la pared de dominio, sin que se observe el proceso de inversión de la imanación

de cada capa por separado). Tampoco existe restricción a una composición determinada, siempre que los coeficientes de magnetostricción de los materiales implicados sean de signo opuesto.

5 El acoplamiento magnético hace que las capas magnetostrictivas sufran un proceso de inversión de la imanación de manera solidaria como se encuentra esquematizado en la Figura 1. Este efecto permite que en el ciclo de histéresis no aparezcan los procesos de inversión de cada capa de manera independiente, sino que se produzca una inversión de la imanación de manera solidaria.

10 La magnetostricción es el efecto por el que un material ferromagnético cambia de dimensiones cuando se imana. De manera cuantitativa, este cambio de dimensión viene dado por el coeficiente de magnetostricción:

$$15 \quad \lambda = \frac{l - l_0}{l_0}$$

donde l_0 es la longitud inicial y l la longitud final del material imanado. Así, un material magnetostrictivo con $\lambda > 0$ se alarga en la dirección del campo magnético aplicado, mientras que un material con $\lambda < 0$ se comprime.

20 En un sistema bicapa o multicapa, cuando el material magnetostrictivo está sometido a un campo magnético aplicado, no es libre para sufrir la deformación mecánica que vendría impuesta por su coeficiente de magnetostricción, ya que se encuentra anclado por el resto de materiales que no sufren esa misma deformación. De este modo, en un sistema bicapa, por ejemplo, cuando se aplica un campo magnético externo, el material 1 con $\lambda_1 > 0$ trata de estirarse en la dirección del campo magnético; sin embargo, la capa 2 que es una capa magnetostrictiva con $\lambda_2 < 0$ tenderá a comprimirse ante ese mismo campo aplicado, de tal forma que impide la elongación del material con $\lambda_1 > 0$, haciendo que esté sometido a un esfuerzo mecánico de compresión $\sigma_1 < 0$. El efecto combinado de $\lambda_1 > 0$ y $\sigma_1 < 0$ da lugar a la aparición en la capa 1 de una anisotropía magnetoelástica inducida negativa $K_1 < 0$, de acuerdo a la ecuación:

$$K_1 = \frac{3}{2} \lambda_1 \sigma_1$$

35 De manera similar, la capa 2 con $\lambda_2 < 0$, debido a su coeficiente de magnetostricción negativo, tenderá a contraerse ante la aplicación de un campo magnético externo; pero esta deformación mecánica se verá dificultada por el material de la capa 1, que tiende a alargarse debido a su $\lambda_1 > 0$. Por tanto, la capa 2 se ve sometida a un esfuerzo mecánico de tracción $\sigma_2 > 0$, apareciendo en la capa 2 una anisotropía magnetoelástica inducida $K_2 < 0$.

$$40 \quad K_2 = \frac{3}{2} \lambda_2 \sigma_2$$

45 Por todo ello, ante la aplicación de un campo magnético externo, aparece en ambas capas una anisotropía magnetoelástica inducida perpendicular a la dirección de dicho campo, que da lugar a un aumento de anisotropía magnética total en el plano del sistema y que fomenta que el proceso de inversión de la imanación de las capas se realice de manera solidaria sin que se observe un salto de imanación para cada material, a pesar de que su espesor sea mayor que la longitud de canje o la pared de dominio y de que tengan distinto campo coercitivo.

Los efectos descritos en cada una de las capas magnetostrictivas del sistema multicapa son independientes de la dirección del campo magnético aplicado, del espesor de cada material magnetostrictivo, del campo coercitivo de cada material, del proceso de fabricación de los materiales, de las magnitudes de los coeficientes de magnetostricción, etc. El único requisito es que los coeficientes de magnetostricción de los materiales en una estructura bicapa sean de signo opuesto; y para una estructura multicapa, el requisito es que las capas con coeficiente de magnetostricción de signo opuesto se coloquen de manera alternada.

Además, como las anisotropías magnéticas se inducen al aplicar un campo magnético externo, los ciclos de histéresis son equivalentes en todas las direcciones en el plano (Figura 2).

Se puede realizar cualquier tipo de combinación de capas magnetostrictivas siempre que se fabrique la bicapa o la estructura multicapa a partir de capas alternadas con coeficientes de magnetostricción de signo opuesto. Posibles combinaciones serían aleaciones de $\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_x$ con la composición adecuada para que $\lambda < 0$, acopladas con aleaciones de $\text{Fe}_{1-y}\text{Ga}_y$, con la composición adecuada para que $\lambda > 0$; capas de aleación de $\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_x$ con la composición adecuada para que $\lambda < 0$, acopladas con capas de aleación de $\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_x$ con la composición adecuada para que $\lambda > 0$. Otros tipos de aleación magnetostrictivas como las basadas en FeCoB, FeCo o FeGaB, o aleaciones altamente magnetostrictivas basadas en aleaciones entre metales magnéticos de transición y tierras raras como el TbFe₂, TbFeCo, etc..., también son posibles.

Breve descripción de los dibujos

Para complementar la descripción que se está realizando y con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención, se acompaña como parte integrante de dicha descripción, un juego de dibujos en donde con carácter ilustrativo y no limitativo, se ha representado lo siguiente:

Figura 1.- Esquema de anisotropías magnetoelásticas inducidas en cada capa magnetostrictiva (1) y (2) ante la aplicación de un campo magnético externo en un sistema bicapa. Las líneas en discontinuo representan las dimensiones iniciales del sistema y en cada capa se indica el signo de la magnetostricción, el esfuerzo mecánico y de la anisotropía magnetoelástica inducida.

Figura 2. - Ciclos de histéresis de una bicapa formada por dos materiales (NiFe y FeGa) con coeficiente de magnetostricción de diferente signo y con espesores de 0.5 μm en ambos casos, donde se representa la magnetización del material (M) en relación a la magnetización de saturación (M_s) al aplicar un campo magnético (H). Los ciclos han sido medidos con el campo magnético externo aplicado en diferentes direcciones con respecto a una tomada como referencia.

Figura 3. - Ciclo de histéresis de capas individuales de $\text{Ni}_{90}\text{Fe}_{10}$ con un espesor de 100 nm que se indica en la figura como NiFe(100 nm)/FeGa(0 nm), y de $\text{Fe}_{72}\text{Ga}_{28}$ de 200 nm de espesor que se indica en la figura como NiFe(0 nm)/FeGa(200 nm). Se incluyen también ciclos de histéresis de bicapas con un espesor de $\text{Ni}_{90}\text{Fe}_{10}$ de 100 nm y de $\text{Fe}_{72}\text{Ga}_{28}$ de 100 y 200 nm, respectivamente, que se indican en la figura como NiFe(100 nm)/FeGa(100 nm), y NiFe(100 nm)/FeGa(200 nm).

Realización preferente de la invención

La presente invención se ilustra mediante los siguientes ejemplos, los cuales no son limitativos de su alcance.

Ejemplo 1

Este ejemplo se refiere a la obtención de una bicapa formada por una capa de $\text{Ni}_{90}\text{Fe}_{10}$ con una magnetostricción negativa de ~ -20 ppm, y de una capa de $\text{Fe}_{72}\text{Ga}_{28}$ con una magnetostricción positiva de ~ 100 ppm. El espesor de cada capa dentro de la estructura bicapa es mayor que su respectiva longitud de canje, por lo que sería esperable observar el proceso de inversión de cada capa por separado. Las capas son crecidas por electrodeposición utilizando un sustrato de vidrio recubierto con una capa de Au de un espesor suficiente para aumentar la conductividad eléctrica del sustrato y que sea posible el proceso de electrodeposición.

El tiempo de crecimiento se ajusta para cada capa de acuerdo a la ley de Faraday para cada material, creciéndose las capas de manera consecutiva utilizando un electrolito adecuado para cada caso, y ajustando el tiempo de crecimiento para el espesor requerido.

Ejemplo 2

En este ejemplo se muestra el efecto del método de crecimiento de las capas.

Se obtiene la bicapa del ejemplo 1 realizando el crecimiento de las capas mediante la técnica de pulverización catódica, también conocida como *sputtering*. En este caso no existe restricción para la conductividad eléctrica del sustrato pudiendo utilizar cualquier tipo de sustrato que sea compatible con la temperatura de crecimiento de las capas magnetostrictivas. En principio, el crecimiento se puede realizar a temperatura ambiente. Se parte de blancos con la composición deseada esto es, $\text{Ni}_{90}\text{Fe}_{10}$ y $\text{Fe}_{72}\text{Ga}_{28}$, y se ajusta el tiempo de crecimiento de cada capa a su ritmo de crecimiento para obtener las capas con el espesor requerido.

Ejemplo 3

En este ejemplo se muestra el comportamiento magnético de bicapas obtenidas, con un espesor superior a la longitud de canje y a la pared de dominio.

Se miden ciclos de histéresis de una bicapa formada por una capa de magnetostricción positiva de $\text{Fe}_{72}\text{Ga}_{28}$ y otra capa de $\text{Ni}_{90}\text{Fe}_{10}$ con magnetostricción negativa, con espesores de $0.5\ \mu\text{m}$ en ambos casos. Los ciclos que se presentan se miden con el campo en el plano formando diferentes ángulos entre el campo magnético aplicado y una dirección de referencia para demostrar tanto la inversión de la imanación solidaria de ambas capas magnetostrictivas como la isotropía en el plano desde el punto de vista magnético de las muestras.

En la Figura 2 se observa que los ciclos de histéresis son equivalentes en todas las direcciones en el plano de la muestra debido al acoplamiento entre las capas magnetostrictivas, a pesar de que el espesor de ambas capas es muy superior a sus respectivas longitudes de canje y paredes de dominio que son de 31 nm y 97 nm para el $\text{Ni}_{90}\text{Fe}_{10}$ y de 19 y 61 nm para el $\text{Fe}_{72}\text{Ga}_{28}$, y de que tienen campos coercitivos diferentes, 22 Oe para el $\text{Ni}_{90}\text{Fe}_{10}$ y 42 Oe para el $\text{Fe}_{72}\text{Ga}_{28}$.

Ejemplo 4

En este ejemplo se compara el comportamiento de capas individuales y sistemas bicapa obtenidas por el método descrito.

En la figura 3 se observan los ciclos de histéresis de capas individuales de $\text{Ni}_{90}\text{Fe}_{10}$ con un espesor de 100 nm que se indica en la figura como $\text{NiFe}(100\ \text{nm})/\text{FeGa}(0\ \text{nm})$, y de $\text{Fe}_{72}\text{Ga}_{28}$ de 200 nm de espesor que se indica en la figura como $\text{NiFe}(0\ \text{nm})/\text{FeGa}(200\ \text{nm})$. Se incluyen también ciclos de histéresis de bicapas con un espesor de $\text{Ni}_{90}\text{Fe}_{10}$ de 100 nm y de $\text{Fe}_{72}\text{Ga}_{28}$ de

100 y 200 nm, respectivamente, que se indican en la figura como NiFe(100 nm)/FeGa(100 nm), y NiFe(100 nm)/FeGa(200 nm).

- 5 Se observan las diferencias entre capas individuales de $\text{Ni}_{90}\text{Fe}_{10}$ y $\text{Fe}_{72}\text{Ga}_{28}$ debido a su diferente campo coercitivo mientras que en los sistemas bicapa solo se observa un proceso de inversión de la imanación a pesar de que los espesores son mayores que las longitudes de canje y paredes de dominio respectivas.

REIVINDICACIONES

1. Sistema magnético en forma de multicapa con inversión de la imanación isotrópica y al unísono que comprende una o más bicapas alternadas donde cada bicapa está formada por dos materiales magnéticos magnetostrictivos con coeficiente de magnetostricción de signo contrario y donde el espesor de cada capa que forma una bicapa es mayor que su longitud de canje o pared de dominio, caracterizado por que cada bicapa está formada por una aleación de $\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_x$ con una composición tal que el coeficiente de magnetostricción es negativo ($\lambda < 0$), acoplada a una aleación de $\text{Fe}_{1-y}\text{Ga}_y$ con una composición tal que el coeficiente de magnetostricción es positivo ($\lambda > 0$).
2. Sistema magnético en forma de multicapa con inversión de la imanación isotrópica y al unísono que comprende una o más bicapas alternadas donde cada bicapa está formada por dos materiales magnéticos magnetostrictivos con coeficiente de magnetostricción de signo contrario y donde el espesor de cada capa que forma una bicapa es mayor que su longitud de canje o pared de dominio, caracterizado por que cada bicapa está formada por una aleación de $\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_x$ con una composición tal que el coeficiente de magnetostricción es negativo ($\lambda < 0$), acoplada a una aleación de $\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_x$ con una composición tal que el coeficiente de magnetostricción es positivo ($\lambda > 0$).
3. Sistema magnético en forma de multicapa con inversión de la imanación isotrópica y al unísono que comprende una o más bicapas alternadas donde cada bicapa está formada por dos materiales magnéticos magnetostrictivos con coeficiente de magnetostricción de signo contrario y donde el espesor de cada capa que forma una bicapa es mayor que su longitud de canje o pared de dominio, caracterizado por que cada bicapa está formada por una aleación basada en FeCoB, FeCo o FeGaB y otra aleación de la misma naturaleza pero de diferentes composiciones de forma que los coeficientes de magnetostricción de cada capa que forma la bicapa tengan signos opuestos.
4. Sistema magnético en forma de multicapa con inversión de la imanación isotrópica y al unísono que comprende una o más bicapas alternadas donde cada bicapa está formada por dos materiales magnéticos magnetostrictivos con coeficiente de magnetostricción de signo contrario y donde el espesor de cada capa que forma una bicapa es mayor que su longitud de canje o pared de dominio, caracterizado por que cada capa está formada por una aleación basada en metales magnéticos de transición y tierras raras como el TbFe_2 o TbFeCo de la misma naturaleza pero de diferentes composiciones de forma que los coeficientes de magnetostricción de cada capa que forma la bicapa tengan signos opuestos.
5. Sistema magnético en forma de multicapa, según reivindicación 1, donde la bicapa está formada por una capa de $\text{Ni}_{90}\text{Fe}_{10}$ con un coeficiente de magnetostricción negativo y una capa de $\text{Fe}_{72}\text{Ga}_{28}$ con un coeficiente de magnetostricción positivo.
6. Sistema magnético en forma de multicapa, según reivindicación 5, donde cada capa tiene un espesor de 0,5 μm .

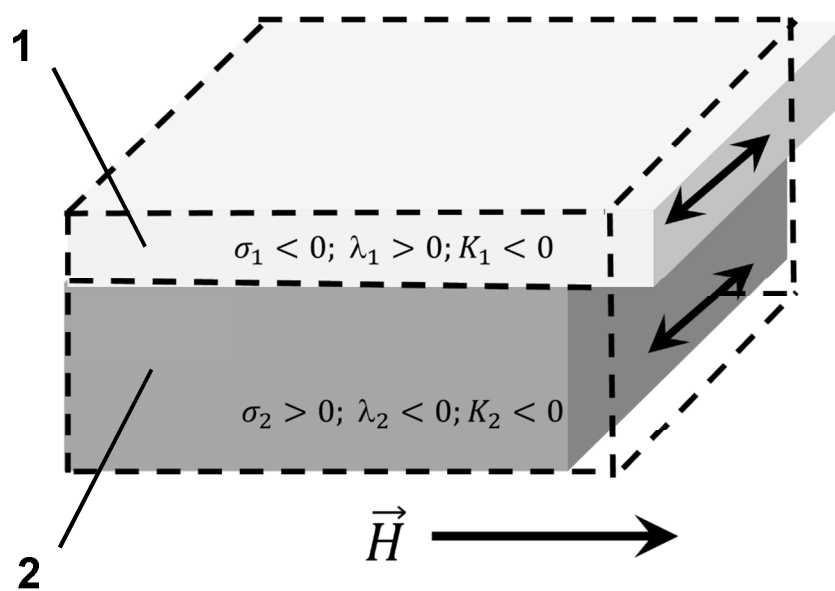


Figura 1

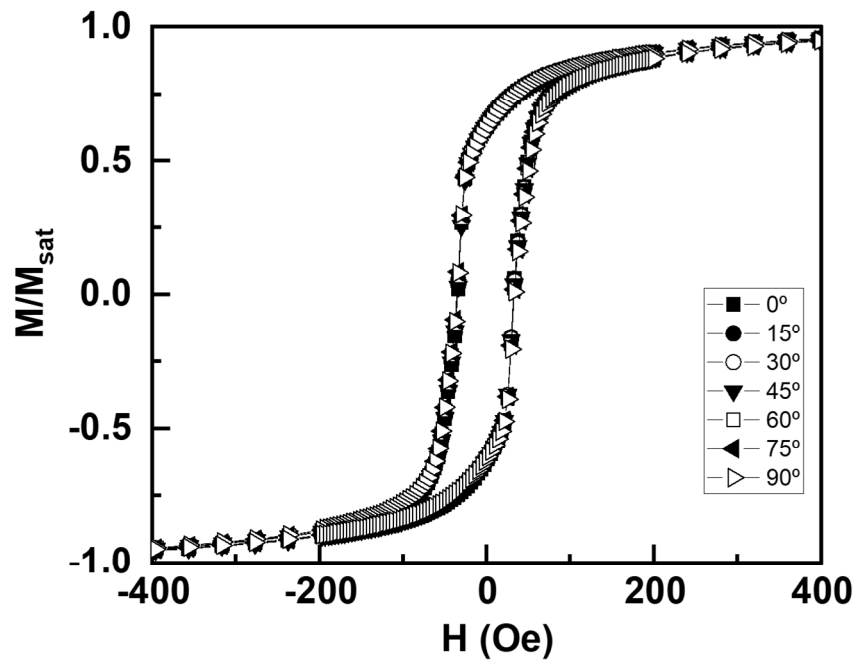


Figura 2

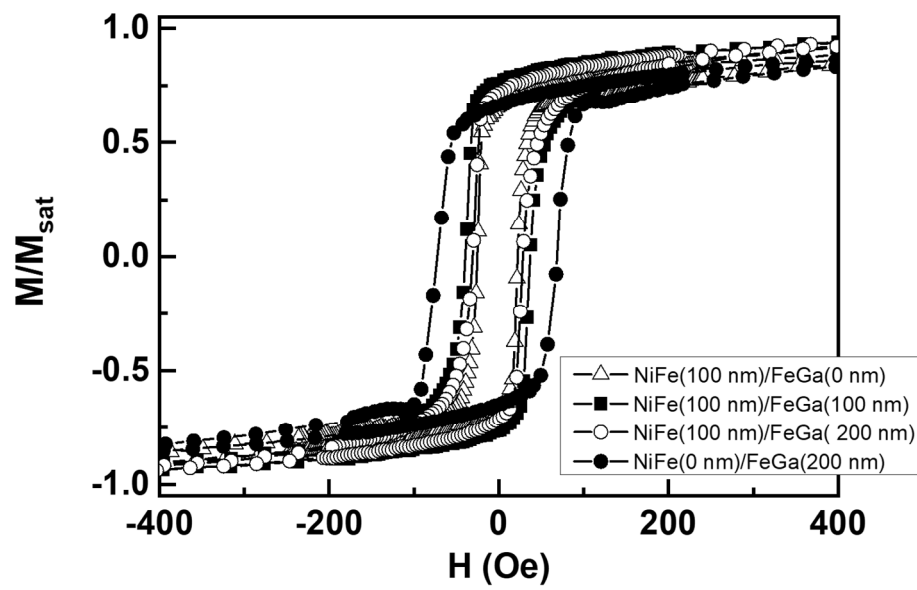


Figura 3