

¿CÓMO INTERACTÚAN DOS NANOIMANES?

Juan Luis Palma, Ingeniero en Física, PhD

Este artículo está reescrito y re-editado del artículo original: *Micromagnetic Simulations of Permalloy Double-Dot Structures*, publicado en *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* de Elsevier, de los autores Felipe Tejo, Rosa M. Corona, Claudia Arenas, Juan Luis Palma y Juan Escribá (Doi: 10.1016/j.cap.2017.02.021)

RESUMEN

En el siguiente estudio, hemos investigado a través de cálculos numéricos, el cómo interactúan dos pastillas magnéticas de dimensiones nanométricas. Los imanes producen un campo magnético en su vecindad que puede interactuar con otros objetos magnéticos, cambiando así la configuración de sus momentos magnéticos. En este estudio nos centramos en la configuración de dos pastillas magnéticas que las acercamos a distintas distancias, incluso las solapamos entre sí. Se observa un vórtice (como un remolino) de los momentos magnéticos de los imanes, el cual puede ser estable dependiendo de la distancia a la que se encuentren los nanoimanes.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas nanométricos con tamaños menores que la escala mesoscópica (que es la escala comprendida entre los 100 nanómetros y 1 micra) son interesantes debido a que estos elementos tienen un largo que es similar a los largos característicos que otorgan las propiedades físicas y químicas a los sistemas que con ellos se construyan.

En nuestro caso; el largo característico será el tamaño que tenga un dominio magnético. Pero, ¿Qué es esto?... Bueno, imaginemos un imán, y vamos a la estructura interna del material; este imán está compuesto por momentos magnéticos que los podemos pensar como una flecha (vector). Existen regiones en el imán donde todas estas flechas apuntan en una misma dirección, esto se conoce como dominio magnético, el tamaño de esta región queda determinada por la compensación entre las energías involucradas. En una estructura que comprenda longitudes bajo los 100 nanómetros, solo cabe un dominio magnético; es decir son estructuras monodominio.

Por esto, para entender mejor este fenómeno, pensaremos en un imán el cuál produce un campo magnético; es bien conocido que un imán se puede pegar a un material metálico, pero no a cualquier metal, si no que específicamente a uno

ferromagnético. Pensemos en un imán común, como el que se pega comúnmente en el refrigerador; si acercamos algo de cobre (una moneda) este no se pegará al imán, ya que el cobre es diamagnético. Si le acercamos una aguja (de hierro) está se pegará al imán, ya que el hierro es ferromagnético.

La propiedad física del magnetismo, se debe en sus orígenes al espín del electrón, incluso, a la distribución de cargas en el átomo. Y a gran escala lo observamos, por ejemplo, cuando un imán se pega a un metal ferromagnético. Dependiendo de la distribución y el ordenamiento de espines en el material, podremos saber si es un material magnéticamente fuerte (ferromagnético) o magnéticamente débil (diamagnético, paramagnético), o tiene algún orden más extravagante (antiferromagneto, ferrimagneto), en lo que no queremos profundizar ahora. Los materiales ferromagnéticos, generan un campo magnético externo alrededor de ellos, el cuál se llama campo desmagnetizante. Alguna vez Si dos estructuras magnéticas se acercan, entonces el campo magnético generado por una de esas estructuras afectará a la configuración magnética de la otra estructura magnética y viceversa. Es por esta razón, que se vuelve necesario estudiar la interacción entre nanoimanes.

Entonces, ¿De qué factores depende este campo desmagnetizante? Principalmente, depende del orden que tengan los momentos magnéticos dentro del imán, y a nivel de la nanoescala, uno de los factores más preponderantes es la forma del imán. Si se tiene un nanoimán con la forma de una lenteja, este imán preferirá ordenar sus espines en el plano de la lenteja. Por otro lado, si se tiene un imán con la forma de un arroz, los momentos magnéticos preferirán alinearse en el eje más largo de esta geometría.

En general las estructuras cuadradas, rectangulares o polígonos, no se utilizan mucho en aplicaciones debido a que en las esquinas de la estructura se forman configuraciones de dominio magnético que son complejas [6,7].

Por lo expuesto anteriormente, muchos grupos de investigación a nivel mundial están interesados en estudiar materiales en la nanoescala que tengan formas circulares, como puntos [8] (llamados en inglés dots o nanodots, que tienen la forma de una pastilla como la aspirina), y también anillos nanométricos [9]. Este tipo de estructuras se pueden sintetizar debido a los recientes avances en las técnicas de litografía electrónica [10], técnica que nos permite obtener un control preciso de la forma geométrica y la separación entre elementos. Para ciertos parámetros geométricos de los nanodots la configuración magnética estable que exhiben es un vórtice, como si todos los momentos magnéticos dibujaran un remolino en tres dimensiones, con su centro en el centro de este nanodot [11], con lo cual se genera un campo desmagnetizante muy bajo, muy débil. Cuando dos nanodots están muy cerca, el campo desmagnetizante de un nanodot puede alterar las propiedades magnéticas del otro nanodot, y cambiar su configuración magnética; en otras palabras: desarmaría este remolino de momentos magnéticos [12, 13]. Por estas razones se espera que los nanodots sirvan como los elementos de un dispositivo de almacenamiento magnético [14], así como los Compact Disks (CD's comunes), como un disco duro de un computador, e incluso como elementos de un dispositivo de memoria magnética, así como la memoria RAM de un computado.

Las propiedades magnéticas de los nanodots han sido investigadas intensivamente [15-17], sin embargo, no se han investigado las propiedades de las estructuras compuestas por dos nanodots, y es importante desde un punto de vista de las aplicaciones. Varios grupos de investigación han estudiado las propiedades magnéticas de nanoanillos, arreglos de nanoanillos e incluso las propiedades de resonancia de nanodots [18 - 21]. Por esto, el objetivo de nuestro estudio, es investigar las propiedades de una estructura de compuesta de dos nanodots de un material metálico y magnético (Permaloy; el cuál es una mezcla de otros dos metales magnéticos, el Níquel (80%) y el Fierro (20%)), y estudiar el magnetismo de estas estructuras como función de la separación (llamaremos a esta distancia D) entre los centros de estas estructuras. Este parámetro D es crucial para el diseño de nuevos dispositivos de almacenamiento y lógicos [22, 23].

Para investigar el magnetismo en estas estructuras, obtendremos una curva que caracteriza las propiedades magnéticas de estas estructuras, llamada curva de histéresis magnética. Esta curva nos entrega información acerca de la magnetización, e indirectamente del ordenamiento de los espines dentro del nanoimán. Por ejemplo, supongamos que en

el eje Y (vertical) queremos medir el grado de magnetización, con un valor máximo de 1 y un valor mínimo de -1, y en el eje X (horizontal) queremos medir el campo magnético externo aplicado a la estructura. Entonces, imaginemos que todos los espines (estas flechas que describimos anteriormente) apuntan hacia la dirección del campo magnético, digamos: hacia la derecha, entonces la magnetización será máxima y tendrá valor 1. Supongamos otro valor de campo, menos intenso que el anterior, digamos que cercano a cero; luego si la mitad de los espines apunta a la derecha y la otra mitad a la izquierda: entonces se restan sus contribuciones al valor de la magnetización y la magnetización será cero, por ejemplo. Por otro lado, si el campo apunta en la dirección opuesta a la que apuntaba inicialmente entonces los espines apuntarán en esta nueva dirección, digamos, para ser consecuentes: izquierda. Esto nos daría el valor de mínima magnetización, es decir -1. Entonces, lo que debemos rescatar de aquí, es que, por medio de la curva de histéresis magnética, podemos hacernos una idea de las propiedades magnéticas y del ordenamiento de los espines al interior del nanoimán.

SIMULACIONES MICROMAGNÉTICAS

Investigamos las curvas de histéresis mediante cálculos numéricos, específicamente, mediante simulaciones micromagnéticas utilizando un software de libre acceso [24]. Las estructuras de nanodots dobles, están compuestas por dos nanodots con un diámetro (d) de 80 nanómetros, y una altura (h) de 20 nanómetros. La distancia entre los centros de los nanodots (D) puede variar desde $D=d$; cuando los nanodots están juntos, tocándose, hasta que D se hace infinita. Para esto introduciremos un parámetro que nos dirá que tan juntos están los nanoimanes, $\gamma=d/D$, donde $\gamma=0$ cuando los nanoimanes están infinitamente separados y $\gamma=1$ cuando los nanoimanes se están tocando en un punto. Si los imanes se superponen un sobre el espacio que ocupa el otro, entonces definiremos un parámetro nuevo; $\delta=D/d$, donde $\delta=1$ si los nanoimanes están juntos y tocándose en un punto, y $\delta=0$ si los nanoimanes están puestos uno sobre el espacio del otro. Es decir, forman un solo nanodot.

El esquema en la figura 1 ilustra lo explicado anteriormente. Hemos considerado una aleación de dos metales magnéticos, de Níquel y de Fierro, llamada Permaloy la cual tiene una magnetización de saturación de $MS=860 \times 10^3 \text{ A/m}$, y una constante de rigidez (magnéticamente hablando) de $A=13 \times 10^{-12} \text{ J/m}$. Para las simulaciones micromagnéticas, hemos dividido las estructuras en pequeños cubos de 1 nanómetro de lado, los cuales representarán un macroespín, un conjunto de espines apuntando en una misma dirección. Esto es válido, siempre que este cubo tenga un largo menor a largo que alcanza la interacción de intercambio entre espines cercanos, esta longitud característica se conoce como "largo de Exchange".

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cuando el campo magnético externo se aplica en la dirección horizontal, se pueden observar curvas de histéresis como las que se muestran en la figura 2. En particular, en la figura 2a, se observan las curvas de histéresis de un nanodot aislado ($\delta=0$) hasta que los dots se empiezan a separar, quedando juntos y en contacto de un punto ($\delta=\gamma=1$). La figura 2b muestra desde

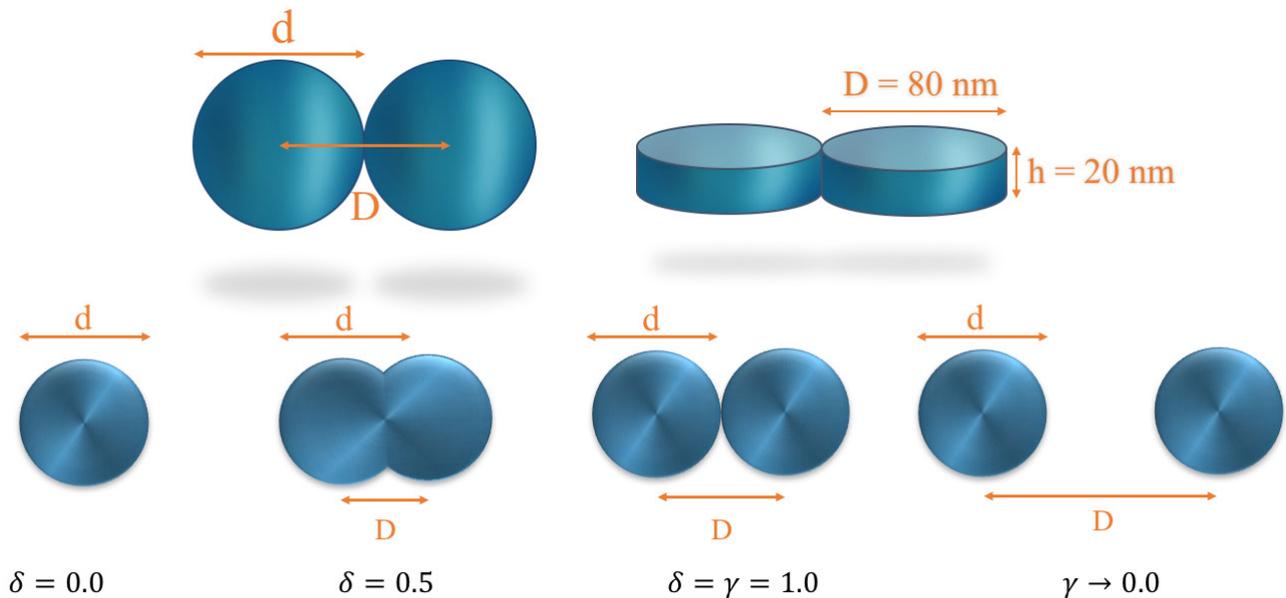


FIGURA 1

Esquema de la geometría de un nanodot, y la distribución espacial de dos nanodots.

que los dots están juntos hasta que se empiezan a separar por lo menos una distancia de 10 veces su diámetro ($\gamma=0.1$). Para las curvas de histéresis mostradas en la figura 2, se observa un cuello bien definido, lo que corresponde al comportamiento típico de la nucleación, propagación y aniquilación de una configuración del tipo vórtice de los momentos magnéticos en la nanoestructura de doble-dot. Para el caso $\delta < 1$, se observa la propagación de un solo vórtice, mientras que para el caso de $\gamma < 1$, se observan dos vórtices. Un caso especial se representa cuando $\delta=\gamma=1$, en donde la configuración se asemeja a un vórtice, pero sin un núcleo bien definido. Esta última configuración es menos estable que las otras que se generan, ya que la repuesta de la inversión de la magnetización ocurre a campos más bajos. Y cuando los parámetros γ y δ se hacen más pequeños, la configuración se hace más estable ya que las estructuras tienen un núcleo más definido.

Para entender mejor este comportamiento, se muestran en la figura 3 las configuraciones para los distintos casos descritos, en donde los colores indican la dirección hacia donde apuntan los espines. El color rojo, indica que todo ese grupo de espines apunta en la dirección del campo aplicado, que en este caso es la dirección horizontal en +x, por lo que los espines rojos apuntan hacia la derecha, tal como en el caso de la figura 0 que ilustra un vórtice. El caso del color azul, es cuando los espines apuntan en la dirección contraria a la que se aplicó el campo magnético externo, es decir, en este caso el grupo de espines que se encuentra dentro de la zona azul está apuntando hacia la izquierda. Las zonas verdes son las que no tienen una dirección horizontal, a esto se le conoce como que no tienen una proyección sobre el campo aplicado, por lo que pueden apuntar hacia arriba o hacia abajo. Con esta información se puede imaginar un vórtice, tal como el mostrado en la figura 0, la que corresponde al caso de la figura 3a.

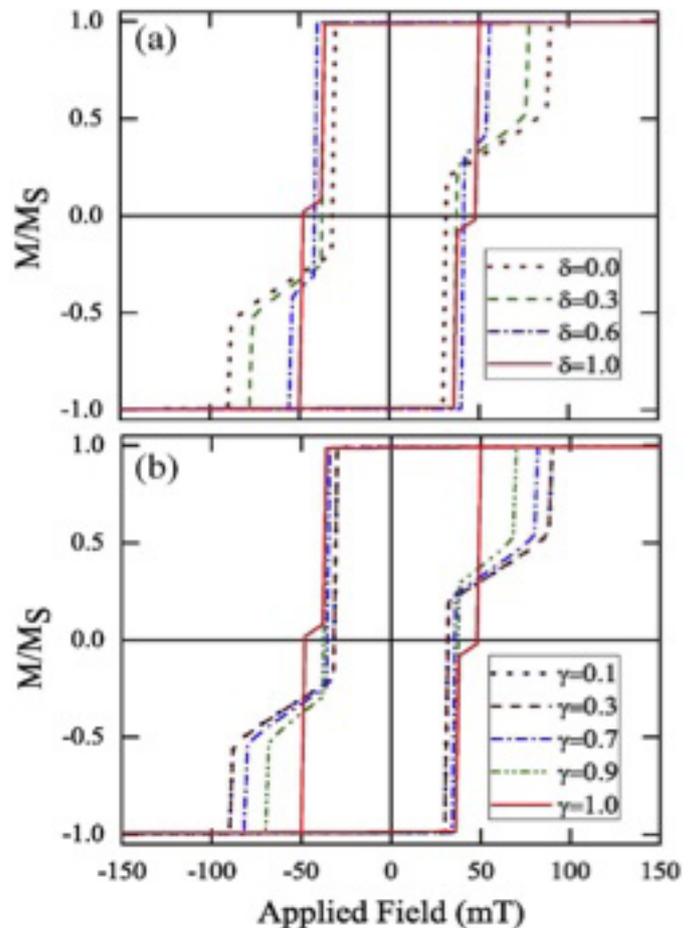


FIGURA 2

Curvas de histéresis de las estructuras de doble-dot, cuando el campo se aplica en la dirección horizontal de la estructura.

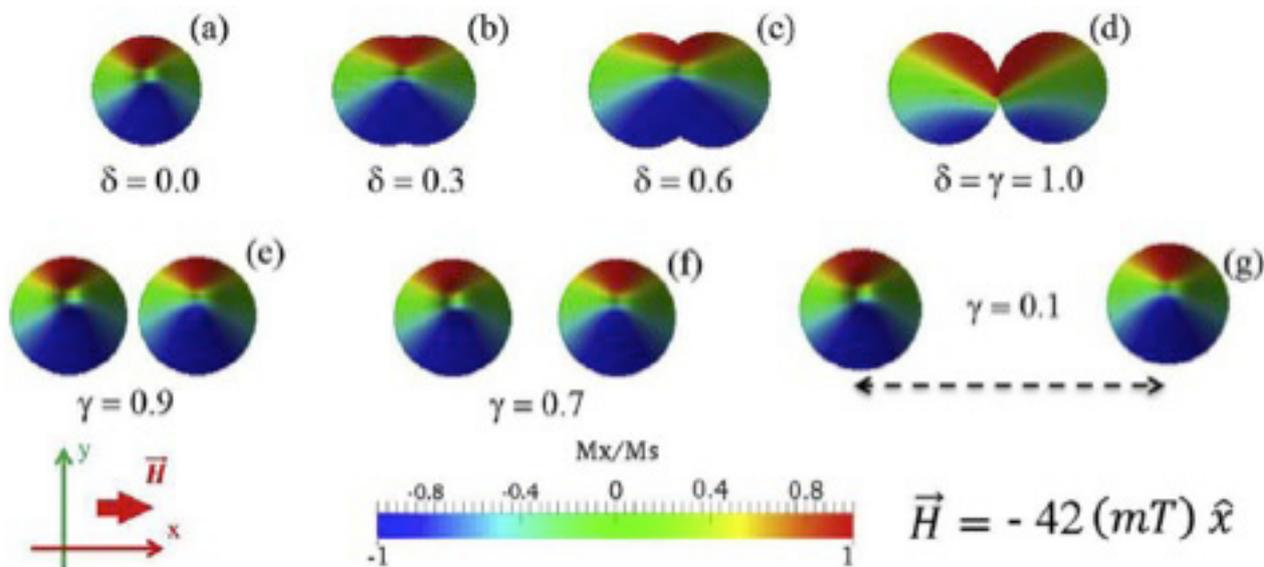


FIGURA 3

estructura de doble-dot, con distintas separaciones entre los nanoimanes. El campo magnético externo se aplicó en la dirección del eje X, la dirección horizontal. En las zonas rojas los espines apuntan hacia la derecha, en las zonas azules apuntan hacia la izquierda y en las zonas verdes los espines apuntan hacia arriba o hacia abajo.

Otra característica que se puede rescatar son las propiedades magnéticas de estos sistemas, en este caso nos referimos al campo coercitivo y a la magnetización remanente. Empecemos por el campo coercitivo; cuando la magnetización se invierte, es decir, cuando en la curva de histéresis se pasa del valor 1 al valor -1, existe una transición que en algún punto interseca al eje horizontal, al eje del campo aplicado. Este punto de intersección representa el campo coercitivo, y está relacionado con el campo que se necesita para invertir la magnetización de la estructura, es decir, que todos los espines que apuntaban a la derecha, al aplicar un campo con la intensidad del campo coercitivo, ahora se invertirán y apuntarán hacia la izquierda. Si una curva de histéresis es más ancha, entonces tiene un campo coercitivo mayor, y es más difícil invertir la magnetización de ese sistema. Por otro lado, si una curva de histéresis es más delgada, este campo coercitivo es menor, y representa la posibilidad de invertir más fácilmente la magnetización del sistema.

La magnetización remanente, es la magnetización que permanece en el nanoimán cuando se le quita el campo magnético externo aplicado. Es decir, cuando el campo aplicado tiene un valor 0, es cuando la curva de histéresis interseca al eje vertical, y este valor representa la cantidad de imanación del nanodot cuando se retira el campo aplicado.

En la Figura 4 se observa el comportamiento del campo coercitivo y la magnetización remanente para el caso en el que el campo se aplica en la dirección horizontal. Se observa de esta figura que cuando los nanoimanes están solapados, el campo coercitivo es mayor. Esto quiere decir, que se debe aplicar un campo más intenso para invertir la magnetización, nos costará más energía pasar de que los espines apunten de la derecha hacia la izquierda. Por otro lado, cuando los nanoimanes están separados, cuesta menos energía invertir la magnetización.

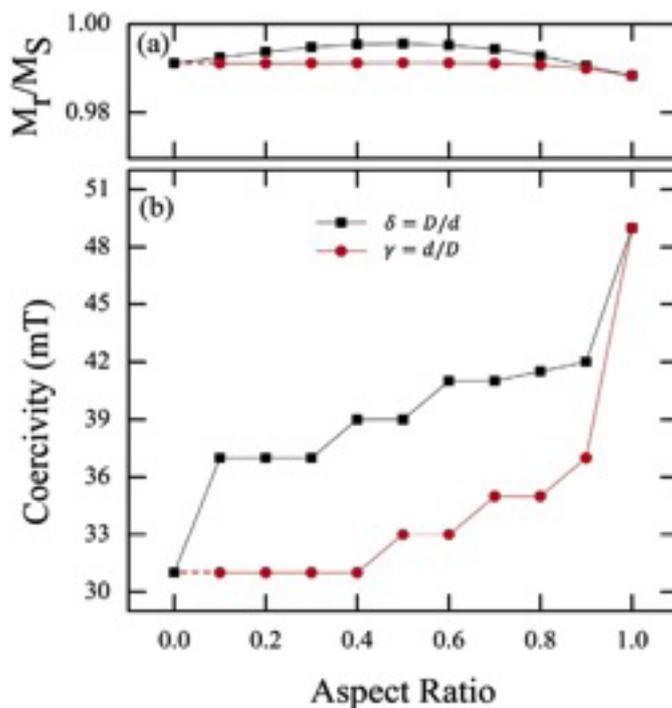
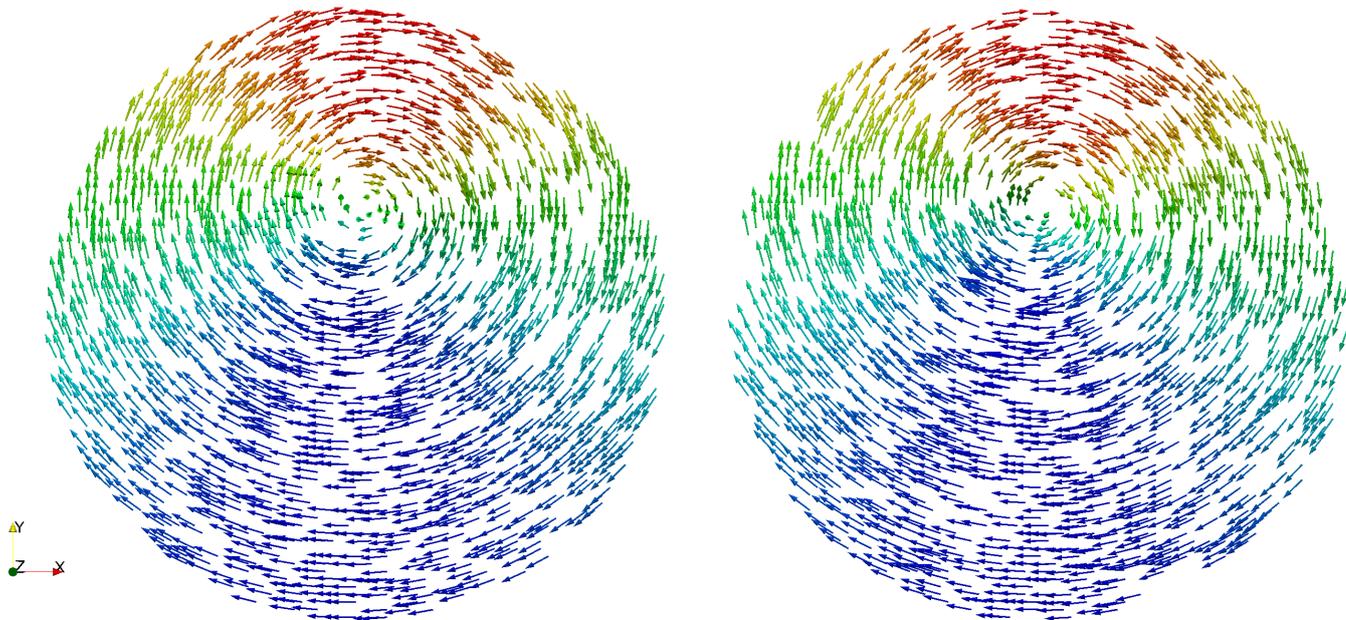


FIGURA 4

comportamiento del campo coercitivo y de la magnetización remanente en función de la separación entre los nanoimanes.

La magnetización remanente, en cambio, se mantiene casi constante para ambos casos; cuando los nanoimanes están solapados y cuando están separados. Aunque, se observa una pequeña diferencia y se puede observar que los nanoimanes solapados quedan un poco más imanados que los separados.



Los momentos magnéticos de los átomos en un nanoimán, se auto-configuran como vórtices en ciertas configuraciones geométricas y de campo magnético externo aplicado.

Además del caso en que el campo magnético, se aplica en el eje X, también se estudió el caso en el que el campo magnético se aplica en el eje Y. En este caso, se forman dos vórtices en las estructuras y estos vórtices comienzan a moverse a lo largo de la dirección X, es decir, se mueven perpendicularmente a la dirección de campo aplicado. Para este caso las curvas de histéresis lucen considerablemente distintas, debido a estas nuevas configuraciones magnéticas y a que el campo se está aplicando en una dirección que no es preferencial para el sistema. A estas direcciones preferenciales se les conoce como, anisotropía magnética, y radica en la forma, la estructura cristalina y otras propiedades de las partículas. Para una descripción más detallada los invito a leer la publicación original.

CONCLUSIONES

Hemos investigado el comportamiento de una estructura compuesta por dos nanoimanes con forma de pastilla, llamados nanodots. Hemos estudiado la configuración magnética, la anisotropía del sistema, y el acoplamiento magnetostático de las estructuras (es decir, como el campo generado por un nanoimán afecta al otro nanoimán). Los resultados muestran que la geometría y distribución del sistema afectan fuertemente a las propiedades magnéticas, donde en las curvas de histéresis magnética aparece un cuello bien pronunciado, lo que evidencia una reversión tipo vórtice. Solo en un caso, cuando los nanoimanes están juntos y se tocan en un punto, no se tiene un vórtice. Solo se tiene algo que se asemeja a un vórtice, pero sin un núcleo bien definido. Además, que los sistemas en los que los nanoimanes están solapados, es más difícil revertir la magnetización que en los sistemas de nanoimanes que están separados. Este tipo de estudio es muy útil a la hora de diseñar dispositivos lógicos o de almacenamiento de información, por lo que es aplicable a nuevas tecnologías que van a la vanguardia en el campo de dispositivos que ayuden a la informática y al renombrado Internet de las cosas (Internet of Things).

REFERENCIAS

- [1] R.P. Cowburn, M.E. Welland, *Science* 287 (2000) 1466.
- [2] M.M. Miller, G.A. Prinz, S.F. Cheng, S. Bounnak, *Appl. Phys. Lett.* 81 (2002) 2211.
- [3] J.G. Zhu, Y. Zheng, G.A. Prinz, *J. Appl. Phys.* 87 (2000) 6668.
- [4] J. Akerman, *Science* 308 (2005) 508.
- [5] M. Klaui, C.A.F. Vaz, W. Wernsdorfer, *Phys. Rev. Lett.* 90 (2003) 097202.
- [6] R.P. Cowburn, *J. Phys. D* 33 (2000) R1.
- [7] H. Wang, H. Hu, M.R. McCartney, D.J. Smith, *J. Magn. Magn. Mater.* 303 (2006) 237.
- [8] G. Shimon, A.O. Adeyeye, C.A. Ross, *Phys. Rev. B* 89 (024302) (2014).
- [9] M. Zhu, C. Mathieu, W. Scholz, S. Dubbaka, M. Kautzky, *J. Appl. Phys.* 113 (2013) 17B905.
- [10] A.O. Adeyeye, N. Singh, *J. Phys. D* 41 (2008) 153001.
- [11] A. Fernandez, C.J. Cerjan, *J. Appl. Phys.* 87 (2000) 1395.
- [12] J. I. Martin, J. Nogues, Kai Liu, J. L. Vicent, Ivan K. Schuller, *J. Magn. Magn. Mater.* 256 (2003) 449.
- [13] M.Natali, A.Popa, U.Ebels, Y.Chen, S.Li, M.E.Welland, *J.Appl.Phys.*96(2004) 4334.
- [14] Y. Li, T.X. Wang, *J. Magn. Magn. Mater.* 322 (2010) 2773.
- [15] M. Natali, I.L. Prejbeanu, A. Lebib, L.D. Buda, K. Ounadjela, Y. Chen, *Phys. Rev. Lett.* 88 (2002) 157203.
- [16] K.Y. Guslienko, A. Hoffmann, *Phys. Rev. Lett.* 97 (2006) 107203.
- [17] J.E. Villegas, C.-P. Li, Ivan K. Schuller, *Phys. Rev. Lett.* 99 (2007) 227001.
- [18] H. Shu-Ting, C. Shuang-Quan, S. Hui-Gang, *Chin. Phys. B* 20 (2011) 127503.
- [19] Q. Ye, S. Chen, K. Zhong, Z. Huang, *Phys. B* 407 (2012) 790.
- [20] S. Jain, H. Schultheiss, O. Heinonen, F.Y. Fradin, J.E. Pearson, S.D. Bader, V. Novosad, *Phys. Rev. B* 86 (2012) 214418.
- [21] F. Lopez-Urias, J.J. Torres-Heredia, E. Munoz-Sandoval, *Phys. B* 483 (2016) 62.
- [22] A. Imre, G. Csaba, L. Ji, A. Orlov, G.H. Bernstein, W. Porod, *Science* 311 (2006) 205.
- [23] X. Zhu, J.-G. Zhu, *IEEE Trans. Magn* 39 (2003) 2854.
- [24] M.J. Donahue, D.G. Porter, *OOMMF User's Guide, Version 1.2a3, 2002.* <http://math.nist.gov/oommf>.

Postgrados tan **Flexibles** como tú necesitas

Oferta

2do. Trimestre

2017



Programas flexibles
articulados y modulares

- Diplomados y postítulos.
- Magíster en 1 año y medio. 5 trimestres de 11 semanas c/u.
- Salidas intermedias con 3 diplomados internos.

Comisión Nacional
de Acreditación
CNA-Chile

3 años acreditada
DESDE DICIEMBRE 2014
HASTA DICIEMBRE 2017

GESTIÓN INSTITUCIONAL / DOCENCIA DE PREGRADO

 **600 6000 177**

postgrados@ucentral.cl
www.ucentral.cl/postgrado



UNIVERSIDAD
CENTRAL

INDEPENDENCIA • PLURALISMO • COMPROMISO