Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales 2009; **S1** (4): 1603-1606

EFECTO DEL ESPESOR EN EL COMPORTAMIENTO MICROMAGNETICO DE PELICULAS DELGADAS DE FE SIMULADAS MEDIANTE OOMMF

A.C. García Castro [1,], B Cruz [1], L. A. Cáceres [1],*

- ✓ Este artículo forma parte del "Volumen Suplemento" **S1** de *la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales* (*RLMM*). Los suplementos de la RLMM son números especiales de la revista dedicados a publicar memorias de congresos.
- ✓ Este suplemento constituye las memorias del congreso "*X Iberoamericano de Metalurgia y Materiales (X IBEROMET)*" celebrado en Cartagena, Colombia, del 13 al 17 de Octubre de 2008.
- ✓ La selección y arbitraje de los trabajos que aparecen en este suplemento fue responsabilidad del Comité Organizador del *X IBEROMET*, quien nombró una comisión *ad-hoc* para este fin (véase editorial de este suplemento).
- ✓ La *RLMM* no sometió estos artículos al proceso regular de arbitraje que utiliza la revista para los números regulares de la misma.
- ✓ Se recomendó el uso de las "Instrucciones para Autores" establecidas por la *RLMM* para la elaboración de los artículos. No obstante, la revisión principal del formato de los artículos que aparecen en este suplemento fue responsabilidad del Comité Organizador del *X IBEROMET*.

Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales 2009; **S1** (4): 1603-1606

EFECTO DEL ESPESOR EN EL COMPORTAMIENTO MICROMAGNETICO DE PELICULAS DELGADAS DE FE SIMULADAS MEDIANTE OOMMF

A.C. García Castro [1,], B Cruz [1], L. A. Cáceres [1],*

1: Departamento de Física, Grupo de Propiedades Magnéticas y Magnetoópticas de Nuevos Materiales, Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia

** E-mail: a.c.garcia.castro@gmail.com*

Trabajos presentados en el X CONGRESO IBEROAMERICANO DE METALURGIA Y MATERIALES IBEROMET
Cartagena de Indias (Colombia), 13 al 17 de Octubre de 2008

Selección de trabajos a cargo de los organizadores del evento

Publicado On-Line el 29-Jul-2009
Disponible en: *www.polimeros.labb.usb.ve/RLMM/home.htmll*

Resumen

Usando un modelamiento y simulación del comportamiento micromagnético en películas delgadas de hierro se ha calculado numéricamente la variación de sus propiedades magnéticas, estudiando el efecto del espesor sobre la dinámica de la magnetización en presencia de un campo magnético externo aplicado. El sistema bidimensional es modelado mediante el software OOMMF (Object Oriented Micro-Magnetism Framework) que está desarrollado en base a la distribución de la magnetización dependiente del tiempo determinada por la ecuación de Landau-Lifshitz-Gilbert. Los resultados sugieren una disminución en el campo coercitivo y de la magnetización remanente con el aumento del espesor.

Palabras Claves: *micromagnético, magnetización remanente, campo coercitivo, OOMMF.*

Abstract

Using a modeling and simulation of the micromagnetic behavior on iron thin films, we have been computed numerically variations on magnetic properties, studying the effect of thickness on the magnetization dynamics in presence of a magnetic external applied field. The two-dimentional system is modeled through OOMMF (Object Oriented Micro-Magnetism Framework) software developed on based of a magnetization distribution determined by Landau-Lifshitz-Gilbert equation. The results suggest a decrease in the coercive field and remanent magnetization with the increase of the thickness.

Keywords*: micromagnetism, remanent magnetization, coercitive field, OOMMF.*

1. INTRODUCCION

Los requerimientos para el desarrollo de nuevas tecnologías llevan consigo un avance en la manera de abordar nuevos campos de investigación. Este es el caso del desarrollo de nuevos materiales magnéticos, usados por ejemplo, en el área de la grabación, campo en el cual se hace imprescindible el entendimiento a fondo de los procesos de magnetización cada vez a menor escala con el fin de optimizar y reducir la longitud de bit en dichos materiales. Es por esta razón que el modelamiento micromagnético ha tenido un rápido desarrollo en aras de explicar estos comportamientos magnéticos propios de estas aplicaciones.

Las simulaciones micromagnéticas permiten un profundo entendimiento de los efectos que tienen los campos aplicados en el material modelado a una longitud de escala intermedia entre los dominios magnéticos y distancias atómicas; que se deben tener en cuenta para un correcto análisis y obtención de valores teóricos, así como para la visualización aproximada de los procesos presentes en la dinámica de magnetización.

La esencia de las aproximaciones micromagnéticas es tomar un punto de vista semiclásico del magnetismo, ya que no se describe el magnetismo con el rigor de la mecánica cuántica, pero es necesario modelarlo con suficiente detalle como para obtener un correcto análisis de las estructuras magnéticas; así la magnetización en cualquier punto de una celda de discretización será representada por un vector promedio del momento magnetico de cientos de espines propios del material, ubicado en el centro del cubo, cuya magnitud es la magnetización de saturación, siendo así la magnetización solo una función de la posición.

Los antecedentes muestran que investigaciones,

modelaciones y simulaciones basadas en la ecuación dinámica de Landau-Lifshitz-Gilbert en conos ferromagnéticos Boardman *et al*. [1], nano-hilos Boboc *et al*. [2], uniones de nano-magnetos Adeyeye y Welland [3] y películas delgadas, dan resultados acordes con los reportados experimentalmente, y aportan explicaciones a dichos valores numéricos, corroborando que esta es una herramienta poderosa en el entendimiento del magnetismo a esta escala de desarrollo.

En este trabajo hemos estudiado esquemáticamente la magnetización remanente, el campo coercitivo y la dinámica de la magnetización de películas delgadas de hierro para espesores que varían desde los 15 nm hasta los 150 nm analizando la influencia de los diferentes términos de la energía en la dinámica de la magnetización representada en el proceso de histéresis.

2. METODO

Para realizar las simulaciones usamos la discretización de diferencia finita (FD en el cual el espacio es discretizado en celdas rectangulares idénticas) que es la base del programa para simulación micromagnética Object Oriented Micromagnetism Framework (OOMMF), software desarrollado por el National Institute of Standars and Technology (NIST) Donahue y Porter [4].

El método para resolver la dinámica de magnetización dependiente del tiempo es llevado a cabo implementando una solución a la ecuación diferencial de Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG)

$$\frac{d\mathbb{M}}{dt} = -\gamma \mathbb{M} \times \mathbb{H}_{ef} - \frac{\gamma\alpha}{M_s}\mathbb{M} \times (\mathbb{M} \times \mathbb{H}_{ef}) \quad (1)$$

Donde $\mathbb{M}$ representa la magnetización, $\mathbb{H}_{ef}$ el campo efectivo (que es la superposición del campo externo aplicado $\mathbb{H}_{app}$, contribuciones de anisotropía $\mathbb{H}_k$, intercambio $\mathbb{H}_{ex}$, y campos de desmagnetización $\mathbb{H}_d$) γ la razón giromagnética de Gilbert, α la constante de amortiguamiento, y M_s la magnetización de saturación del material.

El primer término en la ecuación (1) describe la precesión del vector de magnetización $\mathbb{M}$ alrededor del campo efectivo, el segundo término describe su disipación. El campo efectivo es tomado como:

$$\mathbb{H}_{ef} = \mathbb{H}_{ex} + \mathbb{H}_k + \mathbb{H}_d + \mathbb{H}_{app} \quad (2)$$

La expresión para modelar el campo de desmagnetización es supremamente importante ya que representa la interacción entre cada vector de magnetización en cada una de las celdas que conforman el material modelado, un correcto análisis de este término determina un correcta representación de las paredes de dominio que afectan el comportamiento magnético en el ciclo de histéresis, así según Newell *et al.* [5] la magnetización es representada por una distribución discreta $\mathbb{M}_i$ de campo a los puntos r_i, así el campo en r_i será:

$$(\mathbb{H}_d)_i = -\sum_j \mathbb{N}_{(r_i - r_j)} \cdot \mathbb{M}_j \quad (3)$$

Con:

$$\mathbb{N}_{(r_i - r_j)} = \frac{1}{4\pi v_i}\int_{\mathbb{S}_i} d\mathbb{S} \int_{\mathbb{S}_j'} \frac{d\mathbb{S}'}{|r - r'|} \quad (4)$$

Donde el campo de desmagnetización será la suma sobre todo *i*. Siendo $\mathbb{N}_{(r_i - r_j)}$ el tensor de desmagnetización entre dos celdas de discretización y $d\mathbb{S} = \hat{n} \cdot dS$ donde $\hat{n}$ es normal a la superficie de la celda.

El algoritmo para la solución de las ecuaciones (3) y (4) es realizado mediante Transformada Rápida de Fourier (FFT), asumiendo un vector magnetización constante ubicado en el centro de la celda, los demás términos del campo efectivo son expuestos por Donahue y Porter [4].

Los parámetros del material usados como datos de entrada (hierro en nuestro caso), son presentados en la Tabla 1 Boboc *et al*. [2], Donahue y Porter [4].

La celda de discretización fue puesta en 5 nm acorde con los requerimientos para cálculos numéricos correctos, que establecen una correlación directa con la longitud de intercambio del hierro determinada de acuerdo con Torres Bruna *et al.* [6] por la relación:

$$\lambda_{ex} = \left(\frac{2A}{\mu_0 M_s^2}\right)^{1/2} \quad (5)$$

Siendo λ_{ex} la longitud de intercambio, A el coeficiente de intercambio y μ_0 la permeabilidad magnética del vacío.

Tabla 1. Parámetros de entrada usados para el hierro.

Propiedad	*Valor*
Constante de Anisotropía (K_1)	48 kJ/m^3
Tipo de Anisotropía	Cúbica
Planos Cristalinos	[100]/[010]
Coeficiente de Intercambio (A_x)	21 pJ/m
Constante de Amortiguamiento (α)	0.5
Magnetización de Saturación (M_s)	1.7 x 10^6 A/m

Las configuraciones vectoriales son obtenidas para una discretización de 30000 y 300000 celdas en el caso de las películas de 15 *nm* y 150 *nm* de espesor respectivamente conservando una lateral de 0.5 μm para todas las películas, manteniendo un intervalo de tiempo de simulación de 0.1 μs.

La magnetización es inicialmente dispuesta en modo aleatorio y luego el campo es aplicado en la dirección x perteneciente al plano de la película (eje fácil), así el campo aplicado es llevado hasta $\mu_0 H = \pm 400\ mT$ pasos de 10 mT hasta obtener el ciclo de histéresis.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

Una distribución típica de la magnetización es presentada en la Figura 1. Para una película con geometría cuadrada de espesor $d = 15\ nm$ con un campo aplicado de $\mu H = 400\ mT$ donde se evidencia una magnetización saturada cumpliendo con las condiciones de borde continuas para este sistema.

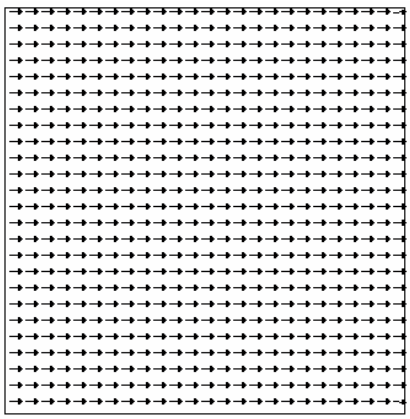


Figura 1. Distribución de los vectores de magnetización correspondiente al estado de saturación después de un campo aplicado a lo largo de la dirección del eje fácil.($d = 15\ nm,\ \mu H = 400\ mT$).

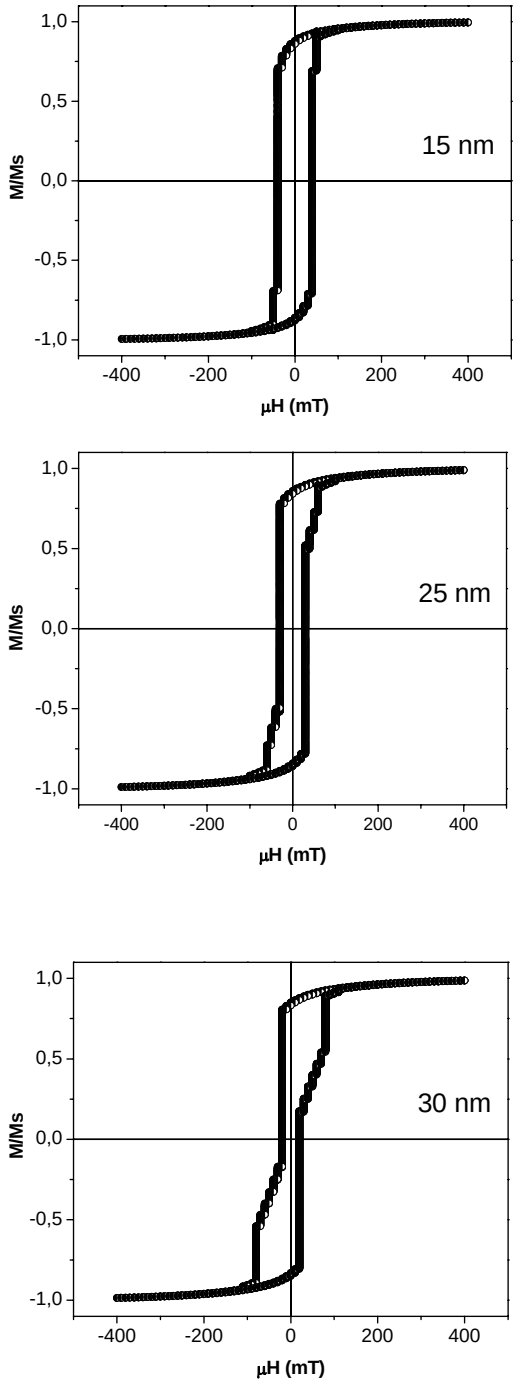


Figura 2. Curvas de histéresis obtenidas mediante OOMMF para las muestras de 15, 25, 30 nm respectivamente.

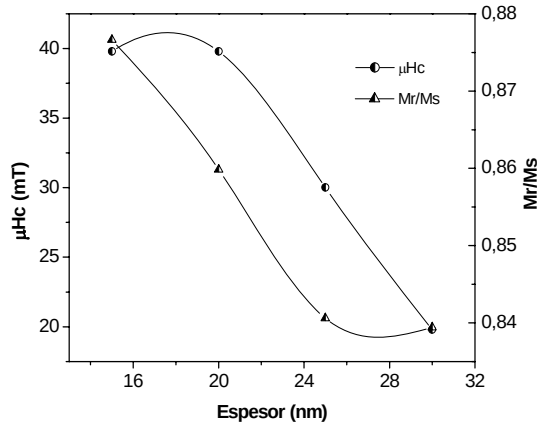


Figura 3. Comportamiento de Campo Coercitivo (H_c) y la magnetización remanente (M_r/M_s) con respecto a la variación del espesor para películas de Fe.

En la Figura 2 se observan curvas de magnetización en función del campo aplicado, obtenidas para espesores de *15, 25 y 30 nm* respectivamente.

De esta figura se extraen valores para el campo coercitivo de $\mu H_c = 39\,mT$ y una magnetización remanente del *87%* para la película de *15 nm*, además se observa un estrangulamiento de las curvas de histéresis para la valores superiores a 30 nm debido al cambio en los modos de inversión.

Para espesores superiores a 30 nm se obtienen curvas similares en donde es evidente una disminución en la variación de la permeabilidad y, por tanto, un incremento en los valores de campo necesarios para saturar el sistema.

La Figura 3 muestra la variación de la magnetización remanente y del campo coercitivo para diferentes espesores, en donde se nota una disminución de estas características del sistema, asociada con el crecimiento de los tamaños de dominio influenciada por el aumento de espesor.

Los valores obtenidos están en acuerdo con reportes de simulaciones y datos experimentales obtenidos en películas delgadas de Fe crecidas por sputtering. Kim y Oliveria [7], Bertoncini *et al.* [8].

4. CONCLUSIONES

Películas delgadas magnéticas de hierro fueron simuladas mediante el software OOMMF obteniéndose una disminución del campo coercitivo evidenciando así un comportamiento ferromagnético blando para varios valores de espesor, identificando el efecto de la dinámica de magnetización en el comportamiento. Se ha logrado simular la dinámica de la magnetización en el comportamiento.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Richard P. Boardman, Hans Fangohr, Matthew J. Fairman, Jurgen Zimmermann, Simon J. Cox, Alexander A. Zhukov, Peter A.J. de Groot. *J. Magn. Magn. Mater*. 2007; 312 (5): 234-238.

[2] Boboc A. Rahman I. Z. Rahman M. A. *J. Mater. Proces. Tech.* 2004; 153-154 (6) 785-790.

[3] Adeyeye A. O. Welland M. E. *J. App. Phys. Lett.* 80 (3) 2002

[4] Donahue M. J. Porter D. G. OOMMF User's Guide, National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, MD, 1999, interagency Report NISTIR 6376.

[5] A. J. Newell, W. Williams, and D. J. Dunlop, *J. Geophys. Res.* 98, 9551-9555 (1993).

[6] Torres Bruna J.M., Bartolomé J. García Vinuesa L.M. García Sánchez F. González J.M. Chubykalo-Fesenko O.A. *J. Magn. Magn. Mater*. 2005; 290-291 (4): 149-152.

[7] Kim Y. K. and Oliveria M. *J. App. Phys.* 74. (2) (1993) 1233-1241

[8] P. Bertoncini, P. Wetzel, D. Berling, A. Mehdooui, B. Loegel, G. Gewinner, R.Poinsot, V. Pierron-Bohnes, *J. Magn. Magn. Mater*. 237 (2001) 191-205.