



## Dependencia de Propiedades Magnéticas con Espesores en Bicapas Ferro- $\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ /Antiferro- $\text{La}_{1/3}\text{Ca}_{2/3}\text{MnO}_3$ en Campo Aplicado Cero

L. Marin<sup>1</sup>, M. E. Gomez<sup>1</sup>, J. -G. Ramirez<sup>1</sup>, A. Hoffman<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Física, Universidad del Valle, A.A. 25360 Cali, Colombia

<sup>2</sup> Laboratorio Nacional de Argonne, División de Materia Condensada, Illinois 60439

Recibido 22 de Oct. 2007; Aceptado 3 de Mar. 2008; Publicado en línea 15 de Abr. 2008

### Resumen

Las bicapas de manganita de La dopada con Ca en las estequiometrías  $\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ , fase ferromagnética (F); y  $\text{La}_{1/3}\text{Ca}_{2/3}\text{MnO}_3$ , fase antiferromagnética (AF), fueron estudiadas para determinar la influencia del espesor relativo de cada fase en sus propiedades magnéticas, específicamente, ciclos de histéresis isotérmicos y magnetización en función de la temperatura, en condición de campo aplicado cero (ZFC). Las bicapas F/AF fueron crecidas sobre sustratos monocristalinos  $\text{SrTiO}_3$  con orientación (100) utilizando un sistema de pulverización catódica a altas presiones de oxígeno. Las muestras fueron crecidas a una temperatura de sustrato de 850°C. Se varió el espesor relativo de las muestras sistemáticamente manteniendo el espesor de la bicapa constante en 70 nm. Estos resultados muestran que las propiedades magnéticas de la capa ferromagnética está fuertemente influenciado por la presencia de la interfaz ferro-antiferro y del espesor relativo de las fases.

**Palabras claves:** Manganitas de Lantano-Calcio, bicapas Ferro-Antiferro, Efectos de Interfaz.

### Abstract

Ca-doped La-Manganite bilayers with the ferromagnetic  $\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$  (F) and antiferromagnetic  $\text{La}_{1/3}\text{Ca}_{2/3}\text{MnO}_3$  (AF) phases were studied to determine the influence of the individual phase thicknesses on their magnetic properties; specifically, isothermal hysteresis loops and temperature dependence on magnetization. Magnetic measurements at zero-field cooling (ZFC). F/AF bilayers were grown *in situ* on (100)  $\text{SrTiO}_3$  substrates, using the DC sputtering technique at high oxygen pressures. Substrate temperature during deposition was maintained at 850 °C. We systematically varied the thickness ratio of each phase, maintaining total bilayer thickness constant at 70 nm. Our results show the dependence of the magnetic properties on the presence of the F/AF interface and the relative thickness ratio

**Key Words:** La-Ca Manganite system, Ferro-Antiferro bilayers, interface effects

© 2008 Revista Colombiana de Física. Todos los derechos reservados.

### 1. Introducción

Las bicapas magnéticas formadas por un material ferromagnético (F) y un material antiferromagnético (AF) son un sistema ideal para el estudio sistemático del fenómeno de Polarización de Intercambio ó *Exchange Bias*, dado que se puede influenciar la estructura interfacial controlando los parámetros de crecimiento de la bicapa. El fenómeno de *Exchange Bias* es dependiente de la estructura magnética en la interfaz entre los dos materiales. En estudios previos [1,

2] realizados en superredes Ferro-Antiferro de la manganita de La dopada con Ca,  $[\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3(t_F)/\text{La}_{1/3}\text{Ca}_{2/3}\text{MnO}_3(t_{AF})]_N$  se encontró una dependencia de la magnitud del campo de *Exchange Bias*,  $H_{ex}$ , con el espesor de las capas ferro,  $t_F$  y antiferro,  $t_{AF}$ , que forman la bicapa. En este trabajo reportamos el estudio de las curvas de histéresis magnética para bicapas  $\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3(t_F)/\text{La}_{1/3}\text{Ca}_{2/3}\text{MnO}_3(t_{AF})/\text{SrTiO}_3$  con relación de espesores  $t_F/t_{AF}=6/1$  y  $1/6$  y su dependencia con

la temperatura en las condiciones de enfriamiento sin campo magnético aplicado, ZFC.

## 2. Detalles experimentales

Las bicapas  $\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3/\text{La}_{1/3}\text{Ca}_{2/3}\text{MnO}_3/\text{SrTiO}_3$  fueron crecidas “*in-situ*” usando la técnica de pulverización catódica DC a altas presiones de oxígeno, sobre sustratos mono cristalinos de  $\text{SrTiO}_3$  con orientación (100). Los parámetros de crecimiento de las bicapas se detallan en la Tabla No. 1. La capa depositada directamente sobre el sustrato es la fase antiferromagnética AF, seguida de la fase ferromagnética, F. El espesor total de la bicapa se mantuvo constante en 70nm. Variamos sistemáticamente los espesores para la fase ferromagnética de 60 nm y la antiferro de 10 nm, F60AF10; y viceversa, ferromagnética de 10 nm y la antiferro de 60 nm, F10AF60. Esto es, la relación de espesores  $t_F/t_{AF}=6/1$  y  $1/6$  respectivamente.

**Tabla No.1** Parámetros de deposición para el crecimiento de las bicapas.

	$\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$	$\text{La}_{1/3}\text{Ca}_{2/3}\text{MnO}_3$
Potencia	DC 380V 100Ma	DC 390V 80mA
Sustrato	$\text{SrTiO}_3$ (001)	$\text{SrTiO}_3$ (001)
Gas-Sputtering	$\text{O}_2$ 100%	$\text{O}_2$ 100%
Presión	3.5 mbar	3.5 mbar
Temperatura -Sustrato	850° C	850° C
Rata de deposición	80 nm/h	80 nm/h

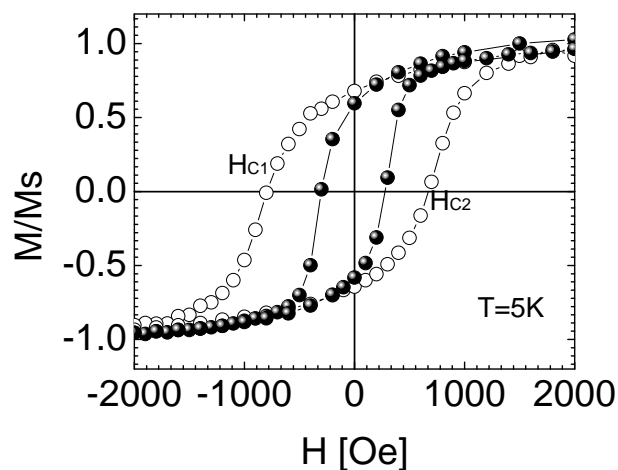
Las medidas magnéticas fueron realizadas utilizando un Magnetómetro SQUID (Superconducting Quantum Interferente Device), de la División de Materia Condensada del Laboratorio Nacional de Argonne. Las curvas isotérmicas de histeresis magnética a campo aplicado cero (ZFC) se midieron en el rango de -2000 a +2000 Oe y a temperaturas entre 5 y 200 K. Las medidas de magnetización se realizaron a temperaturas por debajo de la Temperatura de Curie de las bicapas.

## 3. Resultados y Análisis

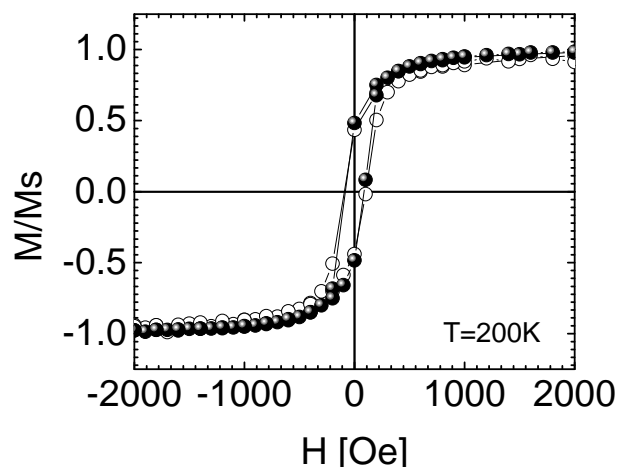
La curva de histeresis, magnetización versus campo aplicado a la temperatura de 5 K se presenta en la Fig. 1 y a 200K se presenta en la Fig 2, para las dos bicapas. Los círculos sin llenar son para la bicapa F10AF60 y los círculos llenos para la bicapa F60AF10. La magnetización se ha normalizado a la magnetización de saturación para cada isoterma. Para la temperatura de 200 K los campos coercitivos para las dos bicapas tiene el mismo valor dentro del margen de error, mostrando la influencia de la temperatura en las propiedades magnéticas de este sistema.

Una curva de histeresis más ancha implica que los campos coercitivos,  $H_c$ , son mayores; esto es, la energía necesaria para desmagnetizar la muestra es mayor en la bicapa con menor espesor de material ferromagnético. Es decir, que es

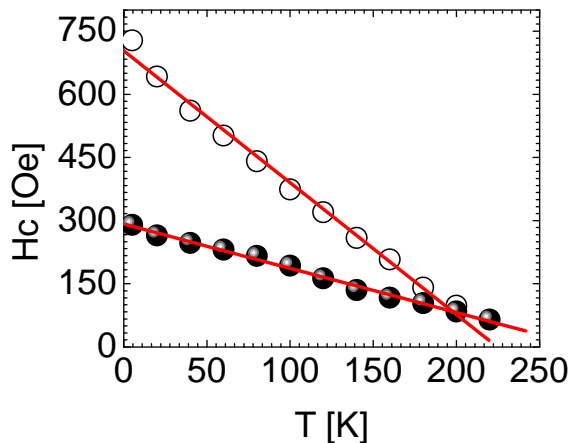
más fácil invertir la dirección de magnetización a la muestra con mayor proporción de fase ferromagnética que aquella con menor proporción de fase ferromagnética. Este resultado nos indica que hay una fuerte influencia de la interfaz entre el material F y el AF en las propiedades magnéticas de las muestras. En la bicapa F10AF60 el ciclo es mas ancho indicando una mayor dificultad para que los espines de la interfaz sean reorientados nuevamente en la dirección del campo que en la bicapa F60AF10, aquella con mayor proporción de fase ferromagnética.



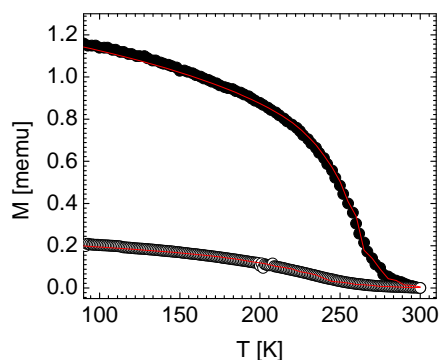
**Fig.1** Ciclos de histeresis magnética a  $T=5\text{K}$ , (○) F10AF60 y (●) F60AF10.



**Fig.2** Ciclos de histeresis magnética a  $T=200\text{K}$ , (○) F10AF60 y (●) F60AF10



**Fig.3** Dependencia del campo coercitivo con la temperatura, (○) F10AF60 y (●) F60AF10



**Fig.4** Dependencia de la magnetización en función de la temperatura, (○) F10AF60 y (●) F60AF10

En la Fig 3. Se muestra la dependencia del campo coercitivo con la temperatura para las dos bicapas, F10AF60 círculos sin rellenar y F60AF10 círculos llenos, extraídos de las isotermas de los ciclos de histéresis magnética y calculado usando la relación  $H_c = -(H_{C1} - H_{C2})/2$ .

Mediante un ajuste de la forma  $H_c = H_c^0 - BT$ , siendo  $H_c^0$  el valor del campo coercitivo a  $T=0$  K y  $B$  la pendiente de la recta, se realizó un análisis por mínimos cuadrados. Los valores de este ajuste se muestran en la Tabla No. 2.

La bicapa con mayor proporción de fase ferromagnética tiene la temperatura de transición más alta, muy cercana a la obtenida para películas de la fase ferromagnética de 100 nm de espesor crecida bajo la misma técnica e idénticos parámetros de crecimiento.

En la Fig 4, se muestran las curvas de magnetización en función de la temperatura a campo cero para las bicapas F10AF60, círculos sin llenar y F60AF10 círculos llenos. Estas curvas son características del material ferromagnético.

Sobre los datos experimentales, se realizó un ajuste de mínimos cuadrados, con una distribución gaussiana alrededor de  $T_c$  [3] que nos permite obtener la temperatura de transición para las bicapas. Los valores son mostrando en la tabla No. 2.

**Tabla No. 2.** Parámetros de ajuste en curvas de histéresis magnética y magnetización Fig 3 y Fig 4.

Bicapa	$H_c^0$ [Oe]	$B$ [Oe/K]	$T_c$ [K]
F10AF60	$700 \pm 10$	$3.13 \pm 0.09$	$241.4 \pm 0.4$
F60AF10	$290 \pm 1$	$1.05 \pm 0.02$	$263.7 \pm 0.4$

#### 4. Conclusiones

Los resultados de este trabajo muestran que las propiedades ferromagnéticas a campo aplicado cero (ZFC) en bicapas de las fases ferro y antiferromagnética de la manganita de La dopada con Ca son fuertemente dependientes del espesor relativo de las capas individuales,  $t_F/t_{AF}$ . Específicamente, hay una dependencia lineal del  $H_c$  con la temperatura,  $H_c$  disminuye a medida que la temperatura aumenta, pero la rapidez de variación es mayor para la bicapa con menor proporción de fase ferromagnética; así mismo la  $T_c$  es menor para esta bicapa. Esto nos indica que la presencia de la interfaz afecta las propiedades magnéticas, y la influencia es más dramática en la medida en que el espesor de la capa ferromagnética sea proporcionalmente menor que el de la capa antiferromagnética.

#### Agradecimientos:

Centro de Excelencia en Nuevos Materiales, contrato CENM-COLCIENCIAS RC- 043-(2005) y a COLCIENCIAS proyecto 1106-05-11458 CT-046-(2002).

#### Referencias

- [1] G. Campillo, M. E. Gómez, A. Berger, A. Hoffmann, R. Escudero, P. Prieto. Journal of Applied Physics. New York: , v.99, (2006).
- [2] M. E. Gómez, G. Campillo, J. -G. Ramírez, P. Prieto, A. Hoffmann, J. Guimpel, N. Haberkorn, A. Condó, F. Lovey, IEEE Transactions on Magnetism. , v.42, n.10, p.2981 - 2983, (2006).
- [3] G. Campillo, A. Berger, J. Osorio, J. E. Pearson, S. D. Bader, E. Baca and P.Prieto; Journal of Magnetism and Magnetic Materials; 237 61-68 (2001).