

## Influencia de la ferrita de cobalto en la propiedades magnetoeléctricas de las películas delgadas de ferrita de bismuto depositadas por spin coating

Influence of cobalt ferrite on the magnetoelectric properties of thin films of bismuth ferrite deposited by spin coating

Segundo Jonathan Rojas Flores<sup>1</sup>, Moises Miguel Gallozo Cardenas<sup>2</sup>,  
Renny Randy Nazario Naveda<sup>2</sup>, Luisa Amparo Juárez Cortijo<sup>2</sup>,  
Magda Rubi Rodriguez Yupanqui<sup>1</sup>, Luis Manuel Angelats Silva<sup>3</sup>,  
Fenando Enrique Ugaz Odar<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniera, Universidad Cesar Vallejo, Av. Larco 1771, Trujillo, Trujillo, Perú.

e-mail: segundo.rojas.89@gmail.com, mrodriguez@ucv.edu.pe, fugazo@ucvvirtual.edu.pe

<sup>2</sup> Departamento de Ciencias, Universidad Privada del Norte, Av. Del Ejercito 920, Trujillo, Trujillo, Perú.

e-mail: moises.gallozzo@upn.edu.pe, renny.nazario@upn.edu.pe, luisa.juarez@upn.edu.pe

<sup>3</sup> Laboratorio de Investigación Multidisciplinaria, Universidad Privada Antenor Orrego, Av. América Sur 3145, Trujillo, Trujillo, Perú.

e-mail: langelatss@upao.edu.pe

### RESUMEN

Las películas de  $(1-x)$  BiFeO<sub>3</sub>-  $(x)$  CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> variando la concentración ( $x = 0, 0.1, 0.2$  y  $0.3$ ), fueron depositadas por spin coating sobre sustratos de Pt (Pt/TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>/Si) a partir de soluciones precursoras con una concentración de 0.05 molar, la cual fue obtenida por sol-gel. En la caracterización de las películas delgadas se estudió la estructura y las propiedades magnetoeléctricas mediante difracción de rayos X, corriente de fuga, constante dieléctrica, curva de histéresis ferroeléctrica y ferromagnética. En el difractograma de rayos X se muestran picos característicos con la formación de BiFeO<sub>3</sub> y el crecimiento de los picos pertenecientes al CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> con el aumento de  $x$ . Todas las muestras revelan poca corriente de fuga, siendo la menor de  $10^{-10}$  A/cm<sup>2</sup> para  $(0.8)$  BiFeO<sub>3</sub>-  $(0.2)$  CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. La constante dieléctrica se incrementó en el rango de  $10^2$  Hz a  $10^5$  Hz luego disminuyó debido a la relajación dieléctrica, para todas las muestras la pérdida dieléctrica es menor al 4%. Todas las películas muestran polarización y magnetización remanentes mayores a  $60 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  y  $30 \text{ emu}/\text{gr}$  respectivamente.

**Palabras clave:** magnetoeléctricas, películas, ferromagnética y ferroeléctrica.

### ABSTRACT

The films composed of  $(1-x)$  BiFeO<sub>3</sub>-  $(x)$  CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> varying the concentration ( $x = 0, 0.1, 0.2$  and  $0.3$ ) were deposited by spin coating on Pt substrate (Pt / TiO<sub>2</sub> / SiO<sub>2</sub> / Si) from of 0.05 molar concentration precursors solutions, which were obtained by sol-gel method. Thin films characterization was made, the structure and the magnetoelectric properties were studied using X-ray diffraction, leakage current, dielectric constant, ferroelectric and ferromagnetic hysteresis curve. The XRD results show characteristic peaks with the formation of BiFeO<sub>3</sub> and the growth of peaks belonging to CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> with the increase of  $x$ . All samples reveal little leakage current, being the lowest of  $10^{-10}$  A/cm<sup>2</sup> for  $(0.8)$  BiFeO<sub>3</sub>-  $(0.2)$  CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. The dielectric constant increased in the range from  $10^2$  Hz to  $10^5$  Hz then decreased due to dielectric relaxation, for all samples the dielectric loss is less than 4%. All fabricated films show remnants polarization and magnetization greater than  $60 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  and  $30 \text{ emu}/\text{gr}$  respectively.

**Keywords:** magnetoelectric, films, ferromagnetic and ferroelectric.

### 1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas multiferroicos tienen un gran campo de aplicaciones en la espintrónica, almacenamiento de in-

formación, sensores, diodos, etc. [1-3]. Estos materiales se caracterizan por la coexistencia de al menos dos de sus tres propiedades férricas (ferroelectricidad, ferromagnetismo, ferroelasticidad). Los materiales que tiene propiedades ferroeléctricas y ferromagnéticas se les conoce como magnetoeléctricos (ME) debido a la aparición de una polarización eléctrica  $P$  y de una magnetización  $M$  al aplicar un campo magnético  $H$  y un campo eléctrico  $E$  en un material. Existen diferentes métodos de fabricación de estos materiales entre los que se encuentran los compuestos, multicapas y los de fase única [1-6].

Entre los materiales ME más conocidos se encuentre la ferrita de bismuto ( $\text{BiFeO}_3$ , BFO), este material ha generado gran interés debido a la temperatura de transición con una temperatura Néel ( $T_N$ ) y de Curie ( $T_C$ ) de  $\sim 643\text{K}$  y  $\sim 1103\text{K}$  respectivamente [5-6].  $\text{BiFeO}_3$  tiene una estructura perovskita distorsionada con parámetros de red  $a_{\text{rh}}=b_{\text{rh}}=c_{\text{rh}}= 5.63\text{Å}$  y ángulo  $\alpha_{\text{rh}}= 59.35^\circ$ , y grupo espacial  $R3c$  [8-10]. La polarización en el  $\text{BiFeO}_3$  se debe a los iones  $\text{Bi}^{+3}$  que tiene un mayor desplazamiento, causada principalmente por el par solitario (orbital  $s^2$ ), de modo que la polarización proviene principalmente de los átomos del Bi y su polarización es a lo largo de la diagonal [111] de la celda unitaria perovskita [11]. Las propiedades ferroeléctricas son muy buenas en el  $\text{BiFeO}_3$ , pero sus propiedades ferromagnéticas son muy pobres debido a los iones  $\text{Fe}^{+3}$  que están rodeados por seis iones  $\text{Fe}^{+3}$  con espín antiparalelo al ion central generando el llamado ferromagnetismo débil [12-14]. Debido a esto se utilizó la ferrita de cobalto ( $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ , CFO), que es un material conocido por sus excelentes propiedades magnéticas.  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  posee una estructura espinela inversa con temperatura de Curie ( $T_C$ )  $\sim 793^\circ\text{K}$  y parámetro de red  $8.3957\text{Å}$  [15-16].

Para una mejor comprensión de la estructura y las propiedades magnetoeléctricas hemos trabajado la composición  $(1-x)\text{BiFeO}_3-(x)\text{CoFe}_2\text{O}_4$  con  $x = 0, 0.1, 0.2$  y  $0.3$ , sintetizadas por vía de solución química y depositadas sobre sustrato de Pt ( $\text{Pt/TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ ) mediante el método de spin coating. Aquí presentamos las respuestas estructurales, dieléctricas, de corriente de fuga, ferroeléctricas y ferromagnéticas de las estructuras compuestas medidas a temperatura ambiente.

## 2. MATERIALES Y MÉTODO

### 2.1 MATERIALES

Como reactivos precursores se usaron: bismuto pentahidratado [ $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ], nitrato de hierro nonahidratado [ $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ] y nitrato de cobalto hexahidrato [ $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ], todos adquiridos de Sigma-Aldrich; y como solvente se usó 2-methoxyethanol (Sigma-Aldrich). Pt ( $\text{Pt/TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ ) fueron empleados como sustratos para la deposición de las películas. Para la limpieza de los sustratos se utilizó ácido clorhídrico (HCL- 0,1M) y acetona.

### 2.2 Síntesis de películas de $(1-x)\text{BiFeO}_3-(x)\text{CoFe}_2\text{O}_4$

Para la síntesis de las películas se prepararon dos soluciones precursoras: (1)  $\text{BiFeO}_3$  (BFO) se preparó disolviendo nitrato de bismuto pentahidratado [ $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ] y nitrato de hierro nonahidratado [ $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ] con la relación molar 1:1 en 2-methoxyethanol y un 10 mol% de exceso de nitrato de bismuto para compensar la pérdida volátil del Bi durante el proceso de recocido. Para preparar la solución precursora del CFO se utilizó nitrato de cobalto hexahidratado [ $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ] y nitrato de hierro nonahidratado [ $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ] en 2-methoxyethanol en una relación molar de 1:2. Estas dos soluciones se mezclaron juntas con una relación de volumen de  $(1-x)\text{BiFeO}_3 - (x)\text{CoFe}_2\text{O}_4$  y se agitaron magnéticamente durante dos 2 h a  $60^\circ\text{C}$ . La solución de  $(1-x)\text{BiFeO}_3-(x)\text{CoFe}_2\text{O}_4$  fue depositada sobre sustratos de Pt ( $\text{Pt/TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ ) por el método de spin coating a 5000 rpm por 30s, cada capa fue secada sobre un plato caliente a  $300^\circ\text{C}$  por 10 min. Después la película fue rápidamente recocida a  $700^\circ\text{C}$  por 30 min este proceso se repitió por 10 veces para cada muestra.

### 2.3 Caracterización

El grosor de las películas depositadas fue medido mediante un perfilómetro (KLA-Tencor Alpha-Step D-100) dando un rango de 177 a 186 nm para las muestras obtenidas. El análisis estructural de las películas fue obtenido a temperatura ambiente mediante un difractómetro Rigaku Ultima III X-ray empleando radiación  $\text{Cu K}\alpha = 0.15405\text{nm}$ , el paso fue de 0.02 con un rango  $2\theta$  de 20-60. Las mediciones eléctricas fueron realizadas utilizando una configuración de capacitores de Pt-película-Pt (figura 1). Los capacitores fueron fabricados, depositando electrodos de Pt (Platino) en la superficie de la película delgada, utilizando una máscara con un área de  $4.9 \times 10^{-4}\text{cm}^2$  por la técnica de Sputtering dc. Todos los capacitores fueron medidos a temperatura ambiente en un rango de voltaje de 0.2 V a 10 V por un tiempo de 10 s. La corriente de fuga fue obtenida

mediante un medidor de fuente (Keithley 2401). La curva de histéresis ferroeléctrico fue medida mediante un probador ferroeléctrico de sonda HVS RT 6000 (tecnología Radiant). Las propiedades magnéticas se caracterizaron usando un magnetómetro de muestra vibrante (Lake Shore's 7400-S).

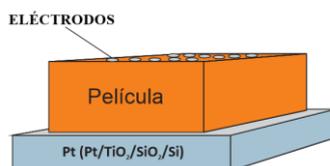


Figura 1: Esquema vertical de la estructura del capacitor.

### 3. RESULTADOS

En la figura 2 se muestran los patrones de difracción de rayos X de las películas de  $(1-x)$  BiFeO<sub>3</sub> - $(x)$  CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> variando la concentración ( $x = 0, 0.1, 0.2$  y  $0.3$ ) depositadas sobre sustrato de Pt (Pt/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si) con recocido a 700 °C. Los distintos picos de difracción están indexados a dos conjuntos de picos, el BFO que posee una estructura de perovskita (grupo espacial R3c) y el CFO una estructura de espinela inversa (grupo espacial Fd3m); no se detectaron impurezas o fases secundarias.

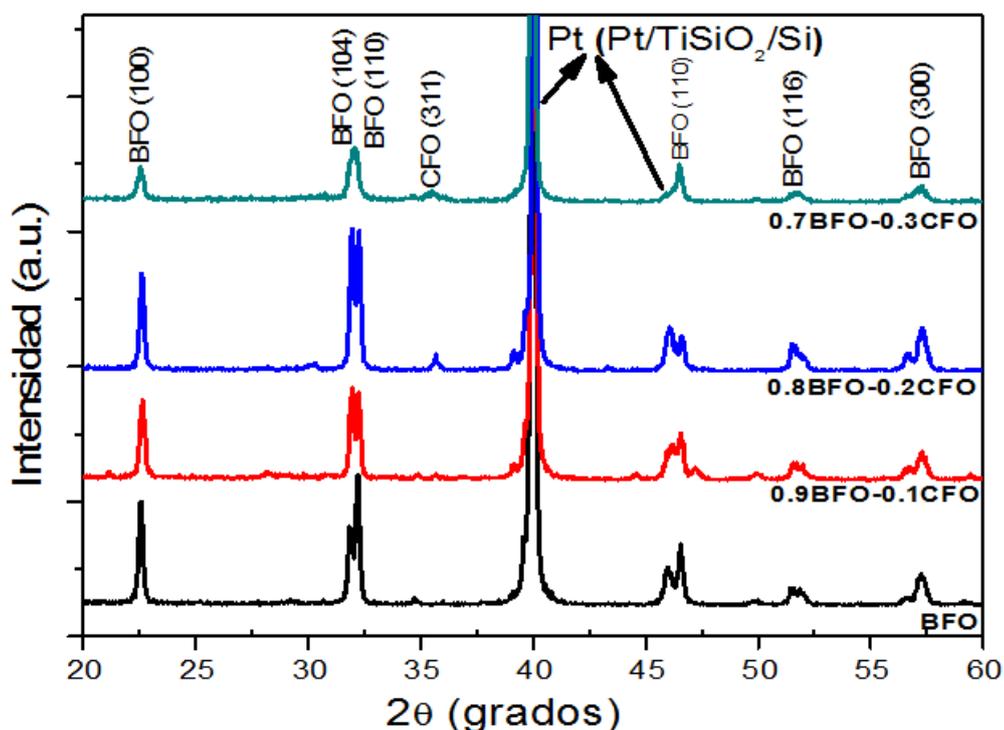
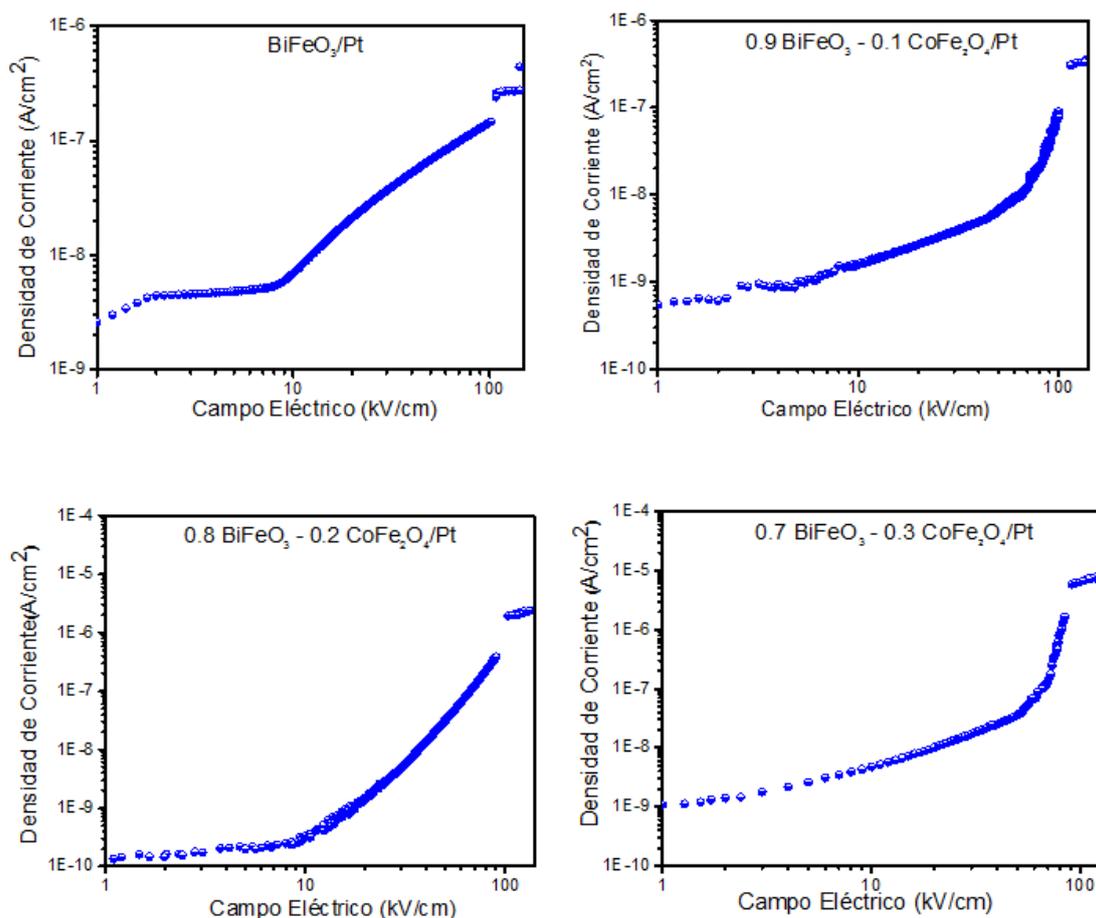


Figura 2: Patrón de difracción de rayos X de las películas delgadas de  $(1-x)$  BiFeO<sub>3</sub> y  $(x)$  CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>.

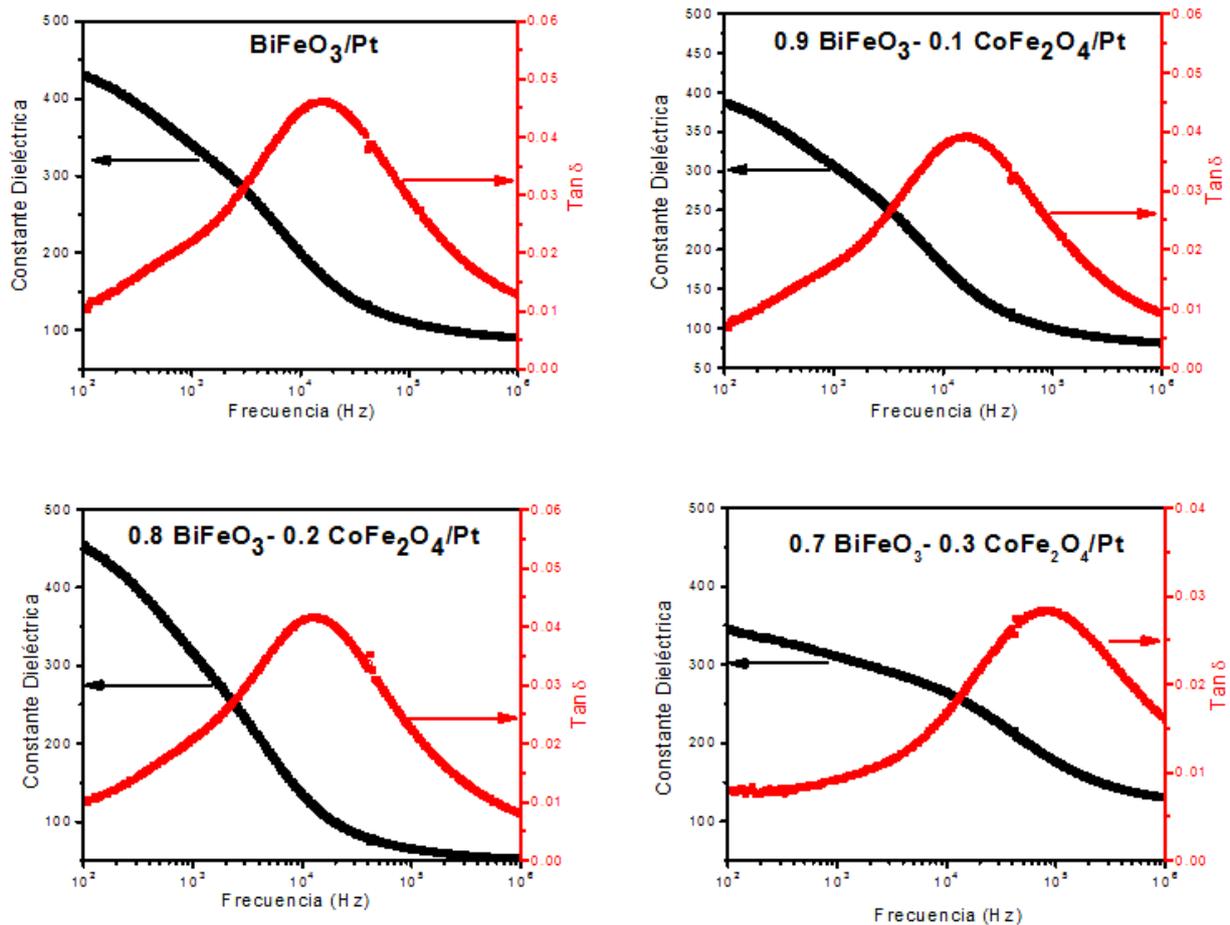
Como se muestra en la figura 1, el patrón correspondiente a la película de BiFeO<sub>3</sub> ( $x=0$ ) presenta picos pertenecientes a la fase perovskita solamente, y para  $x = 0.1, 0.2$  y  $0.3$  se puede apreciar la aparición del pico (311) característico de la estructura espinela (perteneciente al CFO), lo que nos llevan a inducir que la estructura espinela se está formando debido a la inclusión de cobalto en la solución precursora. La orientación preferencial a lo largo del eje (311) y el incremento de los picos de difracción son observables a medida que aumenta la concentración de cobalto, también se puede observar los picos característicos de la ferrita de bismuto (104) y (110) pertenecientes a la estructura perovskita. Se observa que para una concentración mayor de  $x = 0.2$ , los picos comienzan a disminuir tanto el BFO como del CFO, esto puede ser debido a la saturación de la solución precursora. El tamaño medio de los cristalitas del BFO respecto al aumento de "x" se calculó a partir del ensanchamiento del pico (110) del difractograma de rayos x usando la fórmula de Scherrer encontrando que eran 39.62, 32.35, 26.55 y 17.45 nm respectivamente.

En la figura 3 se muestra la densidad de corriente de fuga frente a las propiedades del campo eléctrico J-E de los capacitores Pt / (1-x) BiFeO<sub>3</sub>- (x) CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/ Pt / TiO<sub>2</sub> / SiO<sub>2</sub> / Si recocidos a 700 °C. Las películas compuestas Pt / (1-x) BiFeO<sub>3</sub>- (x) CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/ Pt / TiO<sub>2</sub> / SiO<sub>2</sub> / Si, muestran baja corriente de fuga para regiones con campos eléctricos bajos (<100 kV / cm). La menor corriente de fuga fue encontrada alrededor de 10<sup>-10</sup> A / cm<sup>2</sup> para (0.8) BiFeO<sub>3</sub>- (0.2) CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. Esta corriente de fuga puede provenir de las fluctuaciones de valencia Fe<sup>2+</sup>/Fe<sup>3+</sup>, vacancias de oxígeno y la estructura polarizada [7]. Para campos altos la densidad corriente aumenta rápidamente, esto se debería según la literatura a que el capacitor (Pt / (1-x) BiFeO<sub>3</sub>- (x) CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/ Pt / TiO<sub>2</sub> / SiO<sub>2</sub> / Si) se acerca al voltaje de ruptura [14]. Los cambios de la densidad de corriente pueden atribuirse también a los cambios de mecanismos posibles para la conducción de corriente (conducción óhmica, emisión Schottky de interfaz limitada y conducción con carga limitada de espacio limitado) para el BiFeO<sub>3</sub> y otros óxidos similares de perovskita ferroeléctrica [17].



**Figura 3:** Corriente de fuga versus campo eléctrico de Pt/(1-x)BiFeO<sub>3</sub>-(x)CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/Pt/TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>/Si de las películas a diferentes concentraciones, recocidas a 700°C.

En la figura 4 se muestra la dependencia de la constante dieléctrica y la tangente de pérdida (Tan  $\delta$ ) respecto a las frecuencias en el rango de 10<sup>2</sup> Hz - 10<sup>6</sup> Hz para las muestras, se observa que para x =0 (BiFeO<sub>3</sub>) la constante dieléctrica es mayor (440) a baja frecuencia (10<sup>2</sup> Hz) y con un rango de frecuencia alrededor de 10<sup>5</sup>Hz la disminución es abrupta, esto es característico debido a la relajación dieléctrica. La mínima constante dieléctrica se encontró para el compuesto (0.7) BiFeO<sub>3</sub>- (0.3) CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> que disminuye de 344 a 75 en el rango de frecuencia (10<sup>2</sup>Hz - 10<sup>6</sup>Hz) exhibiendo una típica relajación de la carga. Por otro lado, la pérdida dieléctrica (tan  $\delta$ ) es inferior al 4% para todas las muestras.

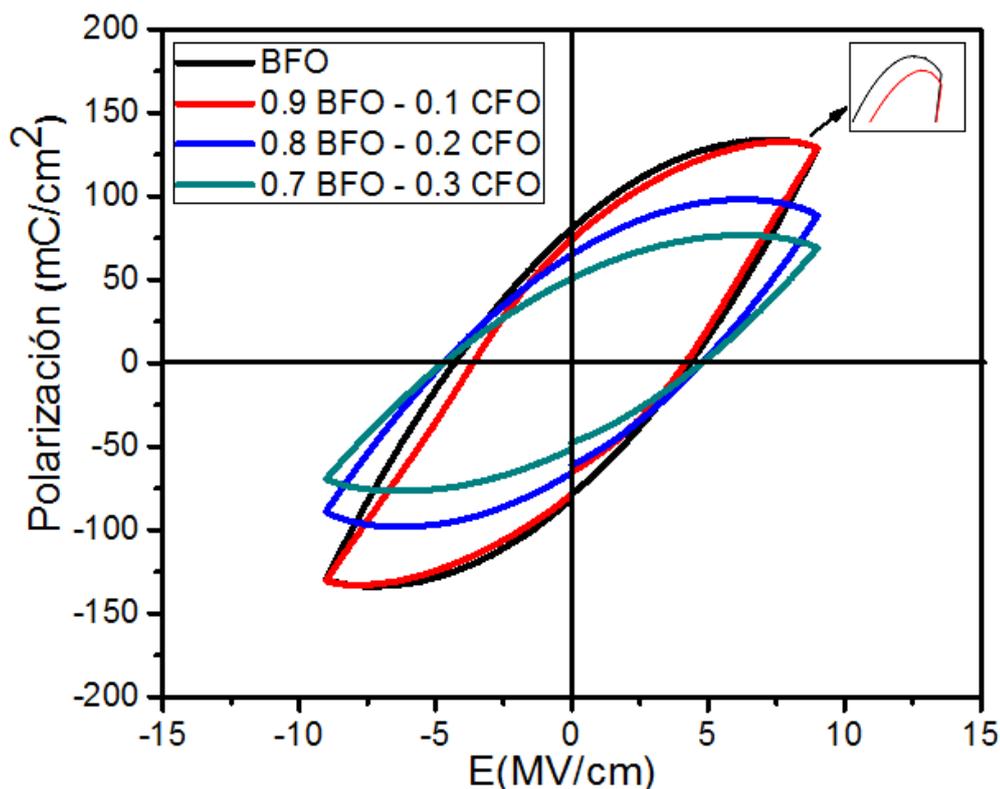


**Figura 4:** Constantes dieléctricas frente a la respuesta de frecuencia de  $(1-x)\text{BiFeO}_3-(x)\text{CoFe}_2\text{O}_4$  con  $x = 0, 0.1, 0.2$  y  $0.3$ .

**Tabla 1:** Valores de polarización remanente y polarización de saturación de las películas de  $(1-x)\text{BiFeO}_3-(x)\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{Pt}$  donde  $x = 0, 0.1, 0.2$  y  $0.3$ .

Compuesto	Polarización Remanente $P_r$ ( $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ )	Polarización de Saturación $P_s$ ( $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ )
$\text{BiFeO}_3$	84	129
$(0.9)\text{BiFeO}_3-(0.1)\text{CoFe}_2\text{O}_4$	75	127
$(0.8)\text{BiFeO}_3-(0.2)\text{CoFe}_2\text{O}_4$	65	90
$(0.7)\text{BiFeO}_3-(0.3)\text{CoFe}_2\text{O}_4$	60	72

La figura 5 muestra las curvas de histéresis del campo eléctrico de polarización (P-E). La muestra de  $\text{BiFeO}_3$  ( $x=0$ ) manifiesta una gran polarización remanente y de saturación como se muestran en la Tabla 1, como se observa en la tabla 1 los valores remanentes de polarización disminuyen al aumentar la cantidad de cobalto. La curva de histéresis para  $x = 0, 0.1, 0.2$  y  $0.3$  muestran gran polarización espontánea y saturación.



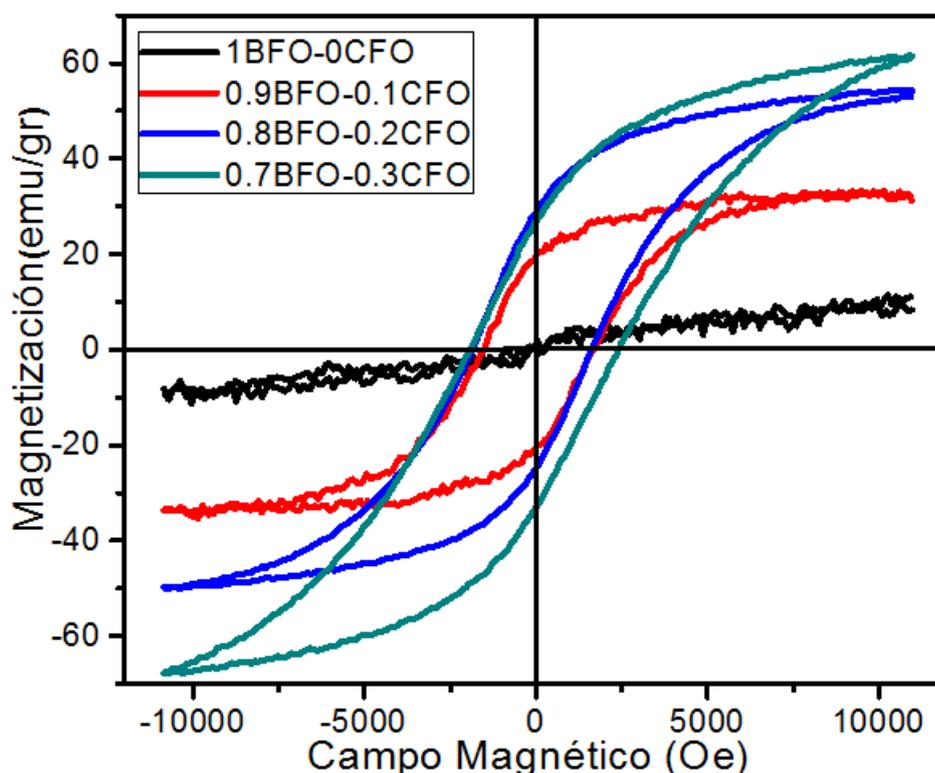
**Figura 5:** Curvas de histéresis ferroeléctrica de las películas de Pt/(1-x) BiFeO<sub>3</sub>- (x) CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/ Pt donde x =0, 0.1, 0.2 y 0.3.

La figura 6 muestra las curvas de histéresis de las muestras ferromagnéticas, donde todas las películas evidenciaron un comportamiento ferromagnético con curvas de histéresis bien formadas. Los valores correspondientes de magnetización saturada y magnetización remanente se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2:** Propiedades ferromagnéticas de las películas (1-x) BiFeO<sub>3</sub>- (x) CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (donde x = 0.1, 0.2 y 0.3).

Compuesto	Magnetización remanente Mr (emu/gr)	Magnetización de Saturación Ms(emu/gr)	Campo coercitivo Hc (kG)
BiFeO <sub>3</sub>	1	9	0.029
(0.9)BiFeO <sub>3</sub> - (0.1)CoFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	21	32	1.58
(0.8)BiFeO <sub>3</sub> - (0.2)CoFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	30	54	1.765
(0.7)BiFeO <sub>3</sub> - (0.3)CoFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	27	62	1.8

En la tabla 2 se pueden comparar los valores de los compuestos; La película BiFeO<sub>3</sub> presenta una magnetización remanente inferior en comparación con la película (0.7) BiFeO<sub>3</sub>- (0.3) CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, el aumento de la magnetización se debe principalmente a dos fenómenos: (a) la sustitución de iones de Fe por Co en la estructura de BiFeO<sub>3</sub> y (b) por la formación de CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (estructura espinela). Según otros investigadores esto se podría atribuir al acoplamiento magnetoelástico entre la fase antiferromagnético del BFO y fase ferromagnética del CFO, pero aún la razón de esto es desconocida [18-20].



**Figura 6:** Curva de histéresis de las películas ferromagnéticas  $(1-x) \text{BiFeO}_3 - (x) \text{CoFe}_2\text{O}_4$  (donde  $x = 0.1, 0.2$  y  $0.3$ ).

#### 4. CONCLUSIONES

Los patrones de difracción de rayos x revelaron la presencia de BFO y CFO en el compuesto con crecimiento preferencial orientados en los picos 110 y 311 respectivamente. Todas las películas muestran una relajación dieléctrica para frecuencias mayores a  $10^3$  Hz. La pérdida dieléctrica,  $\tan(\delta)$ , es inferior al 4% de todas las muestras. Se observó que con el aumento de “x” las curvas histéresis magnéticas aumentan y las de histéresis ferroeléctricas disminuyen, todas las películas muestran polarización y magnetización remanentes mayores a  $60 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  y  $30 \text{ emu}/\text{gr}$  respectivamente. Se demostró la coexistencia de parámetros de orden de acoplamiento ferroeléctrico y ferromagnético en las películas  $(1-x) \text{BiFeO}_3 - (x) \text{CoFe}_2\text{O}_4$  ( $x = 0, 0.1, 0.2$  y  $0.3$ ) con grandes valores de magnetización y polarización espontánea.

Los resultados obtenidos nos indican un acoplamiento ferroeléctrico y ferromagnético en películas compuestas a temperatura ambiente, el cual tiene un gran potencial en la fabricación de memorias de acceso aleatorio ferroeléctrico.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Dr. Katiyar de la Universidad de Puerto Rico- Estados Unidos, por las pruebas ferroeléctricas y ferromagnéticas.

#### 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] FIEBIG, “Revival of the magnetoelectric effect”, *Journal of Physics D.*, v. 38, n. 8, pp. 123–152, April 2005.
- [2] SCOTT, J.F., “Data Storage: Multiferroic Memories”, *Nature Materials*, v. 6, n. 4, pp. 256-257, April (2007).
- [3] NAN, C.W., BICHURIN, M. I., DONG, S., *et al.*, “Multiferroic Magnetoelectric Composites: Historical Perspective, Status and Future Directions”, *Journal of Applied Physics*, v. 103, n. 103, pp. 1-36, February 2008.
- [4] SOSNOWSKA, I., NEUMAIER, T., STEICHELE, E., “Spiral magnetic ordering in bismuth ferrite”, *Journal of Physics C: Solid State Phys*, v. 15, n. 23, pp. 4835-4846, January 1982.

- [5] GUYONNET, J., *Ferroelectric Domain Walls*, 1 ed., Switzerland, Springer-Nature, 2014.
- [6] WANG, Y., LI, J., VIEHLAND, D., “Magnetolectrics for magnetic sensor applications: status, challenges and perspectives”, *Materials Today*, v. 17, n. 6, pp. 269-275, August 2014.
- [7] DONG, G., TAN, G., LUO, Y., *et al.*, “Investigation of Tb-doping on structural transition and multiferroic properties of BiFeO<sub>3</sub> thin films”, *Ceramics International*, v. 40, n. 5, pp. 6413-6419, June 2014.
- [8] YANG, H., JAIN, M., ZHOU, *et al.*, “Temperature-dependent leakage mechanics of Pt/BiFeO<sub>3</sub>/SrRuO<sub>3</sub> thin film capacitors”, *Applied Physics Letters*, v. 91, n. 7, pp. 1-3, July 2007.
- [9] CHU, Y., HOLCOMB, M., RAMESH, R., *et al.*, “Multiferroic and magnetolectrics: thin films and nanostructures”, *Journal of Physics: Condensed Matter*, v. 20, n. 43, pp. 1-13, October 2008.
- [10] KUBEL, F., SCHMID, H., “Structure of a Ferroelectric and ferroelastic monodomain crystal of the perovskite BiFeO<sub>3</sub>”, *Acta Crystallographica Section B*, v. 46, n. 6, pp. 698-702, December 1990.
- [11] CATALAN, G., SCOTT, J., “Physics and Applications of Bismuth Ferrite”, *Advanced Materials*, v. 21, n. 24, pp. 2463–2485, May 2009.
- [12] SEUNGBUM, H., AUCIELLO, O., WOUTERS D., *Emerging Non-Volatile Memories*, 1 ed., New York, Springer Science; 2014.
- [13] SEVA KHIKHOVSKYI, V.V., The renaissance of multiferroics: bismuth ferrite (BiFeO<sub>3</sub>) – a candidate multiferroic material in nanoscience, Top Master in Nanoscience, Zernike Institute for Advanced Materials, Groningen, GH, Netherlands, 2010.
- [14] MURARI, N., KUMAR, A., KATTIYAR, R., *et al.*, “Reduced leakage current in chemical solution deposited multiferroic BiFeO<sub>3</sub>/Ba<sub>0.25</sub>Sr<sub>0.75</sub>TiO<sub>3</sub> heterostructure thin films on platinized silicon substrates”, *Applied Physics Letters*, v. 92, n. 13, pp. 1-3, February 2008.
- [15] LIN, J., HE, Y., WANG, J., *et al.*, “The structural and magnetic properties of gadolinium doped CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoferrites”, *Journal of Nanomaterials*, v. 2015, n.1, pp. 1-6, January 2015.
- [16] KHORRAMI, S.A., MANUCHEHRI, Q. S., “Magnetic Properties of Cobalt Ferrite synthesized by Hydrothermal and Co precipitation Methods: A Comparative Study”, *Journal of Applied Chemical Research*, v.7, n. 3, pp. 15-23, July 2013.
- [17] WENYU, X., YININA, M., ZHEN, M., *et al.*, “Improved ferroelectric and leakage current properties of Er-doped BiFeO<sub>3</sub> thin films derived from structural transformation”, *Smart Materials and Structures*, v. 23, n. 085030, pp. 1-9, July 2014.
- [18] CHANGRONG, Z., ZHENYONG, C., HUABIN, Y., *et al.*, “Structure, electrical properties of Bi(Fe,Co)O<sub>3</sub>–BaTiO<sub>3</sub> piezoelectric ceramics with improved Curie temperature”, *Physica B: Condensed Matter*, v. 410, n. 1, pp.13–16, February 2013.
- [19] QINGYU, X., ZHENG, W., JINLONG, G., *et al.*, “Multiferroic properties of Bi(Fe<sub>0.95</sub>Co<sub>0.05</sub>) O<sub>3</sub> films”, *Physica B: Condensed Matter*, v. 406, n. 10, pp. 2025-2027, May 2011.
- [20] MINTU, T., MUKESH, K., RATNAMALA, C., *et al.*, “Electrical and magnetic properties of multiferroic (1-x) BiFeO<sub>3</sub> – (x) CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanocomposite thin films derived by sol-gel process”, *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 50, n. 1, pp. 1-4, January 2014.

#### ORCID

Segundo Jonathan Rojas Flores	<a href="https://orcid.org/0000-0002-1972-8902">https://orcid.org/0000-0002-1972-8902</a>
Moises Miguel Gallozzo Cardenas	<a href="https://orcid.org/0000-0002-5247-8968">https://orcid.org/0000-0002-5247-8968</a>
Renny Randy Nazario Naveda	<a href="https://orcid.org/0000-0002-5339-2744">https://orcid.org/0000-0002-5339-2744</a>
Luisa Amparo Juárez Cortijo	<a href="https://orcid.org/0000-0002-2468-3550">https://orcid.org/0000-0002-2468-3550</a>
Magda Rubi Rodriguez Yupanqui	<a href="https://orcid.org/0000-0002-9354-2786">https://orcid.org/0000-0002-9354-2786</a>
Luis Manuel Angelats Silva	<a href="https://orcid.org/0000-0002-0989-9249">https://orcid.org/0000-0002-0989-9249</a>
Fenando Enrique Ugaz Odar	<a href="https://orcid.org/0000-0002-1324-0551">https://orcid.org/0000-0002-1324-0551</a>