

DEPOSICIÓN POR LÁSER PULSADO: DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE LA TÉCNICA DE CRECIMIENTO DE MULTICAPAS DELGADAS

PULSED LASER DEPOSITION: DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF THE TECHNIQUE OF GROWTH OF MULTILAYERS

C. I. Zandalazini ^{a,*}, M. I. Oliva ^b, J. C. Ferrero ^a

^a Instituto de Investigaciones Físico-Química de Córdoba (INFIQC) – CONICET.
Haya de la Torre esq. Medina Allende – (5000) Ciudad Universitaria, Córdoba – Argentina

^b Instituto de Física Enrique Gaviola (IFEG) – CONICET
Medina Allende s/n, Ciudad Universitaria – (5000) Córdoba – Argentina

Recibido: 21/02/15; aceptado: 26/03/16

La deposición por láser pulsado (PLD por sus siglas en inglés) es una de las técnicas más poderosas para el crecimiento de multicapas delgadas, capaz de conseguir la reproducción estequiométrica de óxidos complejos, además de metales, y polímeros. En este trabajo se presentarán las características principales de un equipo de PLD, diseñado y desarrollado, para la producción de óxidos multicapas de alta calidad, a un costo significativamente inferior a los equipos comerciales actuales. Además, se presentarán algunos de los resultados de los crecimientos de capas de ZnO, y bicapas de BaFe₁₂O₁₉/BaTiO₃, estudiados a partir de difracción por rayos X (XRD), microscopía de barrido de electrones (SEM), espectroscopía Raman, y magnetometría SQUID.

Palabras clave: deposición por láser pulsado, láminas delgadas, óxidos magnéticos.

Pulsed laser deposition (PLD) technique is one of the most powerful for the growth of thin multilayers, able to get the stoichiometric reproduction of complex oxides, metals, and polymers. In this paper the main characteristics of a PLD system, designed and developed for the production of high quality oxide multilayers at a significantly lower cost than current commercial systems will be presented. Furthermore, we present some results of ZnO layers, and bilayers BaFe₁₂O₁₉/BaTiO₃ growth and studied by x-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), Raman spectroscopy and SQUID magnetometry.

Keywords: pulsed laser deposition, thin films, magnetic oxides.

I. INTRODUCCIÓN

Los materiales conformados en láminas delgadas ocupan, desde hace ya algunas décadas, un lugar fundamental en los avances de la tecnología de materiales; su empleo en áreas como la magneto-electrónica, magneto-óptica, y ciencia de la salud, entre otras¹, indican su amplio interés tecnológico actual. Si bien el interés por este tipo de materiales surgió a principios del siglo 20, no fue sino hasta hace algunas décadas que los avances tecnológicos permitieron optimizar las técnicas de producción, consiguiendo así controlar el crecimiento de láminas de espesores nanométricos de alta calidad. Además del interés tecnológico, este tipo de materiales ofrece la posibilidad

de comprender ciertos fenómenos físicos propios de sistemas de espesores reducidos.

La técnica de deposición por láser pulsado (PLD por sus siglas en inglés), es capaz de reproducir casi cualquier tipo de material (óxidos, metales, polímeros)¹. Su alta reproducibilidad estequiométrica, y versatilidad, la ubican entre las más poderosas técnicas para la producción de óxidos complejos, materiales multiferróicos magnetoeléctricos (ME), y semiconductores magneto-diluidos, entre otros^{1,2}.

En este trabajo se presentaran las principales características de un equipo de PLD, diseñado y desarrollado para la producción de óxidos laminares. Además, se presentarán los principales resultados de los

* e-mail: zc@famaf.unc.edu.ar

estudios realizados en láminas de ZnO, BaTiO₃-BaFe₁₂O₁₉, a partir de la optimización de los parámetros de crecimiento según su caracterización morfológica, estructural, y magnética.

La motivación principal para el presente trabajo fue la producción, y el estudio de materiales laminados de alto impacto tecnológico, principalmente óxidos magnetoeléctricos, y semiconductores magneto-diluidos. Por lo cual, se consideró promisorio la implementación de la técnica de PLD, diseñando y desarrollando el sistema completo, sin precedentes en la provincia de Córdoba.

II. DISEÑO Y DESARROLLO DEL EQUIPO PLD

El proceso de PLD, en contraste con la complejidad de los fenómenos físicos intervinientes, es un proceso conceptualmente simple; consiste en focalizar un haz láser pulsado en un material (blanco) para conseguir así su remoción (ablación). El material removido es eyectado en dirección perpendicular a la superficie del blanco, formando un plasma o “pluma” de ablación. De esta manera, pulso a pulso, el material del blanco es depositado en el sustrato ubicado justo enfrente, consiguiendo así el crecimiento de la lámina^{1,2}. Las características del láser (fluencia, longitud de onda, frecuencia de pulsos), la temperatura del sustrato, la atmósfera de crecimiento, la distancia blanco-sustrato, entre otros¹⁻³, son los parámetros a optimizar para lograr el crecimiento del material de interés.

En nuestro caso, en el diseño del equipo de PLD se consideraron las características que le dieran a éste la mayor versatilidad en lo que respecta a los materiales capaces de reproducir. En la figura 1 se muestran esquemáticamente las principales componentes del equipo de PLD desarrollado (vista superior y corte transversal). Consta de una cámara de reacciones, con su acceso principal por la parte superior (ventana de acrílico desmontable), y 8 accesos laterales. Éstos son ocupados por la entrada del haz láser (1), sensor de presión (2), entrada de gas (3), refrigeración del sistema de rotación (4), sistema de adquisición de espectros de emisión óptica^{2,3,5}, incorporado a fin de obtener un mayor control en la deposición (5), sistema de evacuación de gases (6). Los restantes aportan mayor flexibilidad al equipo considerando la posibilidad de incorporar distintos accesorios para control, como por ejemplo crecimientos en presencia de campo eléctrico, entre otros^{2,3}. En la parte inferior de la misma figura se indican las posiciones de los motores de control de movimiento de blancos y sustrato (8), los 5 porta-blancos (9), el porta-sustrato calentador (10), acceso a la corriente eléctrica que será utilizada por el calentador resistivo (11), y el anillo “gaseador” (12) que proporciona un flujo direccionado del gas para la atmósfera de crecimiento. El diseño del porta-blanco

múltiple²⁻⁴, permite no sólo posicionar el blanco de interés frente al sustrato, sino que es posible mantenerlo con giro axial durante todo el crecimiento de la lámina, disminuyendo así considerablemente la rugosidad de la lámina. El sistema porta-sustrato tiene incorporado un calentador resistivo capaz de controlar temperaturas entre 50-750°C, y que al igual que los porta-blancos, permite mantener el giro axial de sustrato durante el crecimiento. El sistema admite también la programación de diferentes velocidades de rotación así como el sentido de giro, lo cual, junto con la tasa de repetición del láser utilizada, permite un mayor control sobre el crecimiento de la película. Gracias al diseño elaborado para la disposición de blancos y sustratos, no sólo puede cambiarse la distancia entre éstos (2.5-8.0 cm), sino que también es posible modificar su orientación relativa, permitiendo realizar crecimientos con la pluma perpendicular (*on-axis*), o pluma paralela a la superficie del sustrato (*off-axis*)¹. Además, por medio del sistema de inyección de gas mencionado anteriormente (12), puede controlarse la velocidad de enfriado de las muestras crecidas (tasas de enfriado entre 8°C/min hasta 65°C/min).

Todos los dispositivos están ubicados sobre una plataforma desmontable (13), lo que facilita su manipulación, además de ofrecer la posibilidad de cambiar el ángulo de incidencia del haz láser sobre la superficie del blanco.

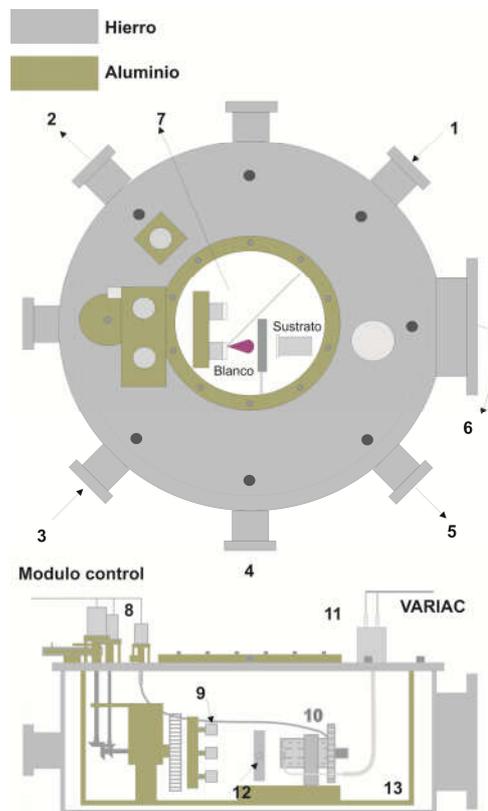


Figura 1. Esquema del equipo de PLD desarrollado.

Completan el sistema, un láser Nd-YAG (Spectra Physics Quanta Ray INDI-HG) que permite operar con 1064 nm y sus armónicos (532 nm, 355 nm, 266 nm) y tasas de repetición de pulso (10 ns) entre 1-25 Hz. El sistema de vacío (6) está conformado por una bomba mecánica (Cindelvac ISOLAB-700-2) incorporada a una bomba difusora de aceite con trampa criogénica capaz de reducir la presión en la cámara hasta 10^{-7} Torr. Los espectrómetros incorporados (5) son Ocean-Optics con redes para trabajar en el rango de 200-600 nm^{2,3}.

Luego de la puesta a punto del equipo, se obtuvieron laminados de diferentes materiales, que a partir de las caracterizaciones por técnicas de alto nivel de precisión, se pudo determinar la eficacia de producción del equipo, totalmente comparables a sus pares industriales, pero a un costo significativamente inferior a los equipos comerciales.

III. DEPOSICIÓN DE PELÍCULAS DELGADAS

En lo que sigue, se presentan los principales resultados de crecimientos de capas de ZnO puro, así como los correspondientes a las capas y bicapas de BaM-BTO, utilizando el equipo desarrollado^{2,6-8}, y un láser de Nd-YAG operando en 532 nm y 10 Hz de longitud de onda y de tasa de deposición, respectivamente. Los difractogramas fueron obtenidos con un tubo de RX utilizando radiación $\text{Cu}_{K\alpha}$, los espectros Raman mediante un láser de +Ar ($\lambda=514.5$ nm), las imágenes con un microscopio de barrido de electrones (FE-SEM Sigma), y las mediciones magnéticas a través de magnetómetro SQUID (Quantum Desing), con campo máximo 7.0 T, y temperatura 2-380 K.

Láminas de ZnO.

Es bien conocido que una de las ventajas de la técnica de PLD es que, en general, permite crecer materiales para diferentes grupos de parámetros de crecimiento (temperatura sustrato, presión de crecimiento, fluencia y tasa de repetición del láser, etc.), por ejemplo, es posible reducir la temperatura de crecimiento (T_s) convencional para un dado material a cambio de que se incremente la fluencia del láser, aportando así la energía superficial necesaria para su crecimiento. Bajo esta consideración, se realizó un detallado estudio para optimizar el crecimiento de láminas de ZnO a bajas temperaturas. Se obtuvieron exitosamente las condiciones para lograr el crecimiento cristalográfico preferencial del ZnO puro sobre sustratos amorfos (vidrio) a 350°C. Esto posibilitó no sólo desligar la orientación cristalográfica preferencial de las láminas a un sustrato particular^{2,3}, sino que la reducción de T_s evita perder el comportamiento magnético en láminas de ZnO dopadas con Al/Mn, ya que éste se

reduce drásticamente a temperaturas superiores a 550°C^{2,9}.

En la figura 2 se muestran los difractogramas correspondientes a laminas de ZnO para las diferentes fluencias consideradas ($3.2-0.4 \text{ J/cm}^2$), siendo idénticos el resto de los parámetros de crecimiento (para más detalles ver Ref. [2]). 0.4 J/cm^2 no es suficiente para la réplica estequiométrica del blanco, producto de no alcanzar el umbral de ablación^{1,2}, mientras que con el resto de las fluencias se consigue un crecimiento sin fases espurias (PDF-Chart:790207(ZnO)), y además, con orientación cristalográfica preferencial en los planos $\{0002\}$, aún siendo el sustrato amorfo.

Las imágenes SEM (ver Fig.3), muestran que en todos los casos, los crecimientos presentan superficies suaves, con escasos particulados aislados no mayores a 200 nm.

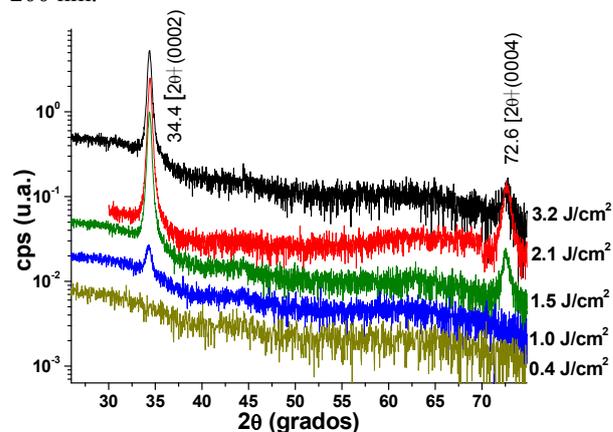
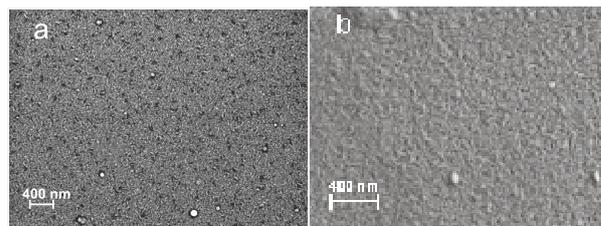


Figura 2. Difractogramas según la fluencia del láser utilizada en el crecimiento. Se observa un crecimiento preferencial en los planos $\{0002\}$ ZnO para fluencias mayores que 0.4 J/cm^2 .

El aumento de la fluencia, como consecuencia del aumento en la interacción del pulso láser con las especies de ablación (pluma), reduce notablemente el tamaño de estos particulados, como puede verse en las Fig.3a y 3b. Se observa también de estas imágenes SEM que, para fluencias excesivamente altas, aparecen regiones del sustrato sin cubrir (islotos oscuros en Fig.3a), provocando así una disminución en el empaquetamiento del material que se consigue para fluencia menores². En todos los casos, los recubrimientos mantienen su homogeneidad en áreas de 5 mm de diámetro aproximadamente.



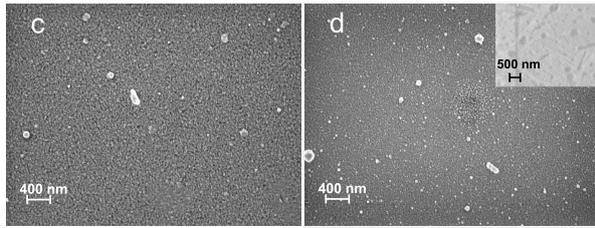


Figura 3. Imágenes SEM de las láminas crecidas con diferentes fluencias del láser; 3.2 J/cm² (a), 2.1 J/cm² (mayor magnificación) (b), 1.5 J/cm² (c), 1.0 J/cm² (d). Inserto en (d) se muestra una imagen del sustrato (vidrio) correspondiente.

Los estudios de transmitancia (ver Fig. 4) indicaron una transparencia de hasta el 95% en la región visible (transmitancia relativa al sustrato de vidrio), con una fuerte dependencia de la fluencia del láser utilizada durante el crecimiento. Inserto en dicha figura se presenta el comportamiento exponencial decreciente ($T(\psi) = A \cdot \exp(-\psi/\psi_c)$) del valor mínimo de transmitancia (378 nm) según la fluencia, siendo la fluencia característica del ajuste (ψ_c) 1.2 ± 0.2 J/cm². Esta dependencia podría estar indicando una desviación de la relación lineal entre espesor de la lámina y fluencia, comúnmente aceptada. Esto es, siendo S el área del spot de focalización del láser, el espesor del material depositado es proporcional a $S^2 \cdot \psi^{1,2}$. Cabe mencionar que esta observación está actualmente bajo estudio, y que la medición directa de los espesores de estas láminas a través de las imágenes SEM, se vio frustrada por la pérdida de resolución que caracteriza al equipo en la observación de muestras no conductoras (espesores del orden de 50 nm para el tiempo de deposición utilizado (11 min.)).

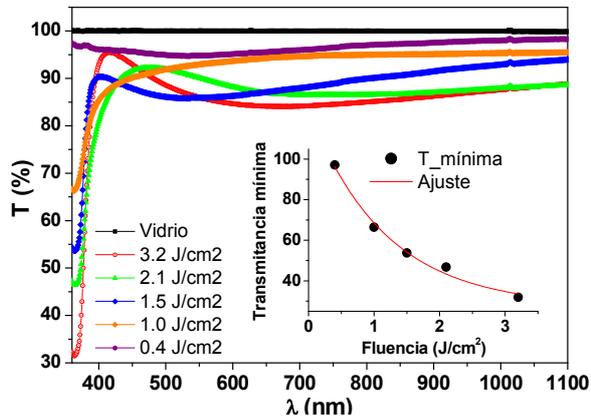


Figura 4. Transmitancia relativa para cada fluencia considerada en el crecimiento. Inserto se muestra la dependencia de la transmitancia mínima con la fluencia.

Los espectros Raman para cada lámina, incluido el blanco y sustrato utilizado, son presentados en la figura 5. En correspondencia con los resultados de XRD, 0.4 J/cm² no permite el crecimiento del ZnO, mientras que las demás presentan una clara correspondencia con las frecuencias de modos de activación típicos del ZnO (lo

indicado como SO corresponde a procesos multifotónicos de segundo orden). La Tabla 1 muestra el análisis de los corrimientos correspondiente al blanco, y a las láminas crecidas (ajustes vía función VoigtAmpl, software PeakFit®). En la misma tabla, se incluyen además resultados reportados en láminas de ZnO crecidas por *sol-gel*¹⁰, y *nanorods* de ZnO crecidos por PLD¹¹. Dentro de la resolución del instrumento, no se observan cambios significativos de los modos de activación para las diferentes fluencias de crecimiento, pero sí un notable corrimiento respecto al material en volumen (blanco), lo cual puede estar indicando la presencia de deformaciones en las láminas (en particular el modo E₂(high)). Mientras que el ensanchamiento pronunciado del modo E₂(low) podría estar indicando que los defectos intrínsecos se deben principalmente al Zn. Además, la presencia de E₁(LO) suele asociarse a vacancias de oxígeno¹².

Tabla 1. Frecuencias de modos de activación de láminas, sustrato y blanco. Se incluyen además los reportados por Yhia et al.¹⁰ y Gupta et al.¹¹

	Blanco	3.2 J/cm ²	1.5 J/cm ²	1.0 J/cm ²	ZnO ¹⁰	ZnO ¹¹
E ₂ (low)	101	83	80	81	---	98
A ₁ (TO)	383	389	376	385	380	---
E ₁ (TO)	410	---	---	---	414	---
E ₂ (high)	439	433	431	431	444	438
LM	---	473	471	472	---	475
UM	---	565	563	563	---	572
E ₂ (low)	586	596	596	596	583	

En las láminas se observan también dos picos bien marcados (LM y UM), que pueden ser atribuidos a frecuencias vibracionales superficiales, observadas para tamaños de dominio cristalino (cristalitos) menores a la longitud de onda de la radiación². Estos modos de activación superficiales, típicos en sistemas nanoestructurados, presentan un aumento de intensidad a medida que se incrementa la fluencia del láser utilizada para el crecimiento. Sumado a las imágenes de microscopía electrónica obtenidas, es posible que bajo estas condiciones de crecimiento, para altas fluencias se obtengan láminas compuestas por nano-pilares (actualmente bajo estudio⁶).

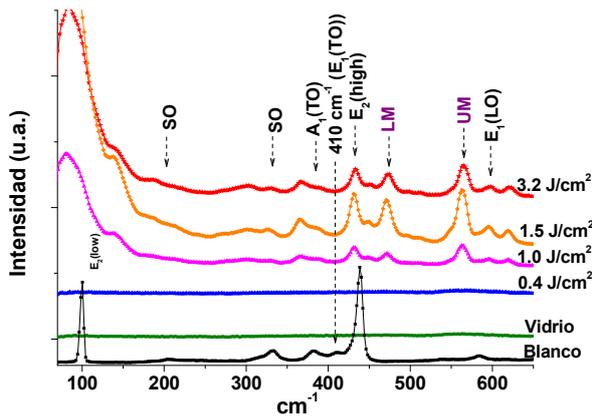


Figura 5. Espectros Raman de blancos, sustrato y láminas de ZnO crecidas para diferentes fluencias del láser.

Láminas de BaFe₁₂O₁₉ y BaTiO₃

También se abordó el estudio de crecimiento de materiales con potenciales propiedades magnetoelectricas, depositando fases magnetostrictivas (BaFe₁₂O₁₉, BaM) y piezoelectricas (BaTiO₃, BTO), Materiales que si bien fueron muy estudiados individualmente en las últimas décadas, no fue sino hasta hace unos pocos años que han despertado interés al considerarlos como compuestos (BTO-BaM, bulk), presentándose como potenciales magnetoelectricos artificiales¹³, sin precedentes en sistemas laminares.

Inicialmente, se realizó un exhaustivo estudio tanto de BaM como BTO en capa individual, a fin de optimizar sus parámetros de crecimiento, y conocer así sus características físicas individuales. Esto posibilita cotejarlas con las correspondientes características encontradas en el material compuesto (BTO-BaM)^{2,7}. Se consideraron sistemas bifásicos conformados tanto en bicapas, como en capas únicas variando el porcentaje de ferrita en el compuesto BaM-BTO, a fin de determinar efectos producidos por una interfaz bien definida, y la correspondiente a sistemas granulares interactuantes.^{8,13}

Los sistemas bicapas mostraron una dependencia crítica del sustrato elegido sobre las características físicas de cada material, orientación cristalográfica, y comportamiento magnético. En BaM/BTO/(100)LaAlO₃ (muestra B1) se consigue un crecimiento policristalino de BaM, mientras que BTO/BaM/(0001)Al₂O₃ (muestra B2) se observó un crecimiento preferencial de éste en la familia de planos {000l}^{2,8}. El BTO en estas bicapas presenta un crecimiento preferencial en los planos {00l} cuando éste se deposita sobre LaAlO₃, mientras que al crecerlo sobre BaM, presenta una estructura policristalina. La figura 6 muestra los espectros Raman de las muestras B1, B2, y los correspondientes blancos utilizados. Ambas bicapas muestran la presencia de BaM y BTO, sin diferencias significativas en lo que respecta a los modos de activación según sus blancos

(análisis de corrimientos vía Función VoigAmpl, PeakFit®).²

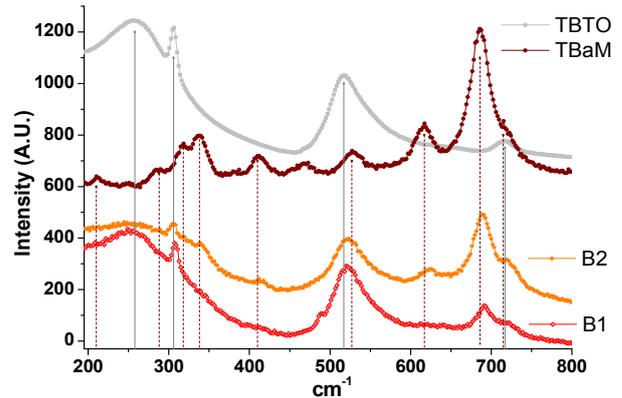


Figura 6. Espectros Raman correspondientes a las muestras B1 y B2, y a sus respectivos blancos utilizados. Las líneas verticales indican los modos vibracionales de cada bicapa y su correspondencia con los blancos.

Cabe mencionar que además se tomaron estos espectros manteniendo la muestra en presencia de un campo magnético externo (750 mT), a fin de detectar un posible acoplamiento ME, pero no se observaron cambios fuera del límite de precisión del equipo utilizado ($\pm 2 \text{ cm}^{-1}$).

Las figuras 7a y 7b muestran las imágenes SEM de las imágenes SEM de las bicapas B1 y B2, respectivamente. Se observa que

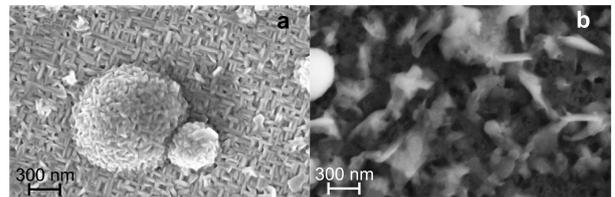


Figura 7. a y b, imágenes SEM de las muestras B1 y B2, respectivamente.

la capa de BaM sobre BTO ofrece una cobertura más compacta que la que se obtiene con BTO sobre BaM.

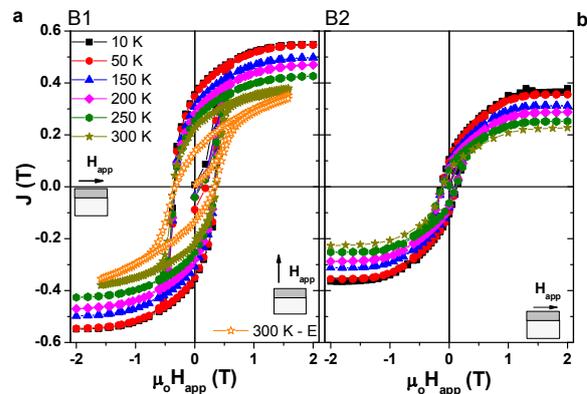


Figura 8. a y b, ciclos de histéresis muestras B1 y B2, respectivamente. Campo aplicado paralelo a la superficie de la lámina, salvo 300K-E en B1, que es perpendicular a ésta.

Respecto a las propiedades magnéticas, de las Figs.8a y 8b se observa que la ferrita policristalina (B1) duplica prácticamente los valores de campo coercitivo (H_C) y magnetización (M_S) en relación a la ferrita orientada (B2), y en ambas muestras no se observó dependencia del *squareness* (= remanencia/magnetización) con la temperatura², favorable para la construcción de ciertos dispositivos magnéticos.

Focalizando el estudio sobre el comportamiento magnético de BaM, la figura 9 muestra la dependencia de anisotropía de campo (H_A) con H_C para las muestras; BaM/(0001)Al₂O₃ (SF), BaM/(0001)Al₂O₃ sin tratamiento térmico (SFwa), B2 y B2 previo al tratamiento térmico (B2wa). El análisis mediante H_A vs H_C no sólo muestra una gran sensibilidad a fenómenos asociados a cambios debidos a los tratamientos térmicos (lo cual podría indicar la presencia de difusión de Ba/Fe en la interfaz BaM-BTO⁷), sino que también pone de manifiesto el efecto del BTO sobre las propiedades magnéticas de BaM (ver SFwa y B2wa). En las 4 muestras se mantuvieron idénticas las condiciones de crecimiento de BaM.

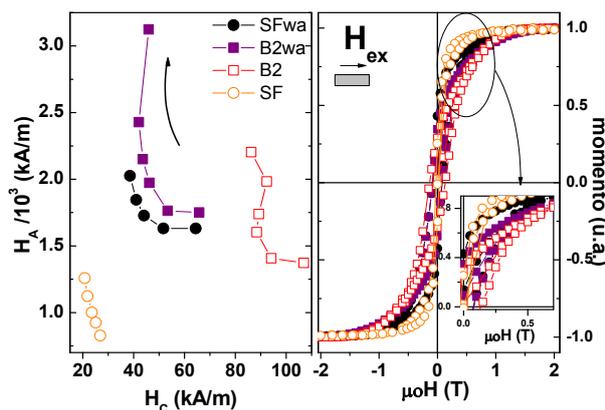


Figura 9. (Izq.) Correlación entre campo coercitivo y anisotropía de campo en función de la temperatura (las flechas indican un incremento T). (Der.) Los ciclos de histéresis correspondientes, obtenidos a 5 K.

En los sistemas conformados por capas únicas bifásicas, se observó una orientación preferencial en el compuesto mayoritario, es decir, más de un 50% de BaM provee una capa con orientación en los planos (000l) de BaM, mientras que un porcentaje menor, favorece la orientación preferencial (00l) del BTO.

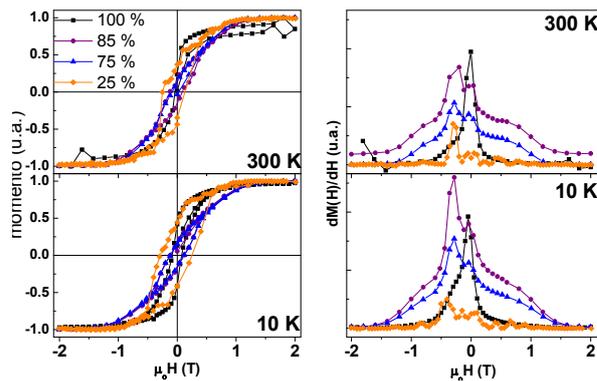


Figura 10. (Izq.) Ciclos de histéresis seleccionados según el porcentaje de BaM, (der.) susceptibilidad irreversible.

En la figura 10 (izq.) se muestran los ciclos de histéresis de láminas BaM-BTO para distintos porcentajes de BaM, obtenidos a 300 K y 10 K. A la derecha de dicha figura se presentan las susceptibilidades irreversibles correspondientes², indicando un comportamiento magnético bifásico en los porcentajes intermedios de BaM. Estos resultados conforman una etapa preliminar para el estudio de magnetoelectrónicos artificiales con BaM-BTO, de gran importancia tecnológica por su alto grado de acoplamiento magnetoelectrónico¹⁵, sin precedentes sobre laminados de BTO-BaM,

Cabe mencionar que el presente reporte forma parte del trabajo de tesis presentado en la Facultad de Matemática, Astronomía, y Física (UNC), para la obtención del grado de Doctor en Física de C. Zandalazini², el cual incluye además estudios del magnetismo en láminas de ZnO codopado con Al/Mn, y estudios del fenómeno de "Exchange bias" en sistemas bicapas de materiales multiferroicos (YMnO₃, La{Sr,Ca}MnO₃), y en Co/YMnO₃, utilizando mediciones magnéticas y de magnetotransporte^{2,14-17}.

IV. COLCLUSIONES

Se diseñó y desarrolló un sistema de PLD completo que permite crecer multicapas de hasta cinco materiales diferentes durante un mismo ciclo de vacío, y capaz de mantener el sustrato a temperaturas de hasta 750°C. La cámara de reacciones posee un diseño sumamente versátil, ofrece la posibilidad de modificar rápidamente la configuración del sistema (distancia blanco-sustrato, ángulo de incidencia del haz laser, y velocidades de rotación de blancos y sustrato), y además, controlar la velocidad de enfriado de las muestras crecidas. El equipo es totalmente comparable, en lo que respecta a la calidad de las láminas producidas, a los equipos comerciales actuales, pero a un costo significativamente inferior que éstos.

Se logro optimizar las condiciones de crecimiento para obtener ZnO puro con gran homogeneidad, y con una orientación cristalográfica independiente de la orientación del sustrato. La baja temperatura de crecimiento conseguida es crucial para la producción de semiconductores magneto-diluidos². Los resultados de los sistemas BaM-BTO mostraron que son completamente controlables, tanto sus características estructurales, como las magnéticas, a partir de los parámetros de crecimiento, proporcionando una base indispensable para abordar un posterior estudio de propiedades magnetoeléctricas.

Los resultados manifiestan que el equipo desarrollado permite producir multicapas de óxidos magnéticos, semiconductores magneto-diluidos, y además es posible el estudio de magnetismo en materiales no magnéticos². Cabe mencionar que aun siendo una de las técnicas más poderosas para la producción en láminas delgadas, existen actualmente sólo unos pocos equipos de PLD en el país.

Agradecimientos

Este trabajo fue parcialmente financiado por Foncyt y Conicet.

V. REFERENCIAS

- 1 - L. B. Freund, S. Suresh, *Thin Films Materials*, Cambridge University Press (2004). - D. Chrisey, G. Hubler, *Pulsed Laser Deposition of Thin Films*, J. Wiley&Sons (1994).
- 2 - C. I. Zandalazini "Generación de películas delgadas mediante ablación láser". Tesis Doctoral presentada en el 2012 en la FaMAF-UNC, Córdoba, Argentina. http://www2.famaf.unc.edu.ar/publicaciones/documents/serie_d/DFis155.pdf.
- 3 - M. I. Oliva, C. I. Zandalazini, J. C. Ferrero, H. R. Bertorello. *Mod. Instrum.* **1**, p41-48(2012).
- 4 - M. I. Oliva, C.I. Zandalazini, J. C. Ferrero. *Anales AFA* **20**, p200-204 (2008).
- 5 - M. I. Oliva, F. A. Soria, C.I. Zandalazini, C. A. Rinaldi y J. C. Ferrero. *Anales AFA* **19**, p79-82 (2007).
- 6 - Preparation and characterization of oriented zinc oxide thin films by PLD on glass substrate. C. I. Zandalazini, M. I. Oliva, J. C. Ferrero, (en redacción).
- 7 - C. I. Zandalazini, M. I. Oliva, J. C. Ferrero. *Rev. Mex. Fis. S* **58**, p266-269 (2012).
- 8 - Study of structural and magnetic properties of BaTiO₃-BaFe₁₂O₁₉ bilayers deposited by PLD. C. I. Zandalazini, M. I. Oliva, J. C. Ferrero. *Thin Solid Films* (enviado).
- 9 - P. Sharma, A. Gupta, K.V. Rao, F.J. Owens, R. Sharma, R. Ahuja, J. M. OsorioGuillen, B. Johansson, G. Gehring, *Nat. Mater.* **2**, 673 (2003).
- 10 - S. B. Yahia, L. Znaidi, A. Kanaev, J. P. Petitet, *Spectr. Acta Part A* **71**, p1234-1238 (2008).
- 11 - V. Gupta et al. *J. Cryst. Growth* **287**, p39-43 (2006).
- 12 - R. Menon, V. Gupta, H. H. Tan, K. Sreenivas, C. Jagadish, *J. Appl. Phys.* **109**, p064905 (2011).
- 13 - A. Srinivas, R. Gopalan, V. Chandrasekharan, *Solid State Comm.* **149**, p367-370 (2009).
- 14- C. Zandalazini, P. Esquinazi, G. Bridoux, and J. Barzola-Quiquia, H. Ohldag, E. Arenholz. *J. Mag. Mag. Mat.* **323**, p2892 (2011).
- 15 - J. Barzola-Quiquia, A. Lessig, A. Ballestar, C. Zandalazini, G. Bridoux, F. Bern, P. Esquinazi. *J. Phys.: Cond. Mat.* **24**, p366006 (2012).
- 16 - M. Ziese, A. Setzer, R. Wunderlich, C. Zandalazini, P. Esquinazi. *Phys. Rev. B* **84**, p214424 (2011).
- 17 - A. Paul, C. Zandalazini, P. Esquinazi, C. Autieri, B. Sanyal, P. Korelis, P. Böni. *J. Appl. Cryst.* **47**, p1054 (2014).