

## Texturas magnéticas en sistemas nanoestructurados

Contacto: Dr. Javier Curiale ([curiale@cab.cnea.gov.ar](mailto:curiale@cab.cnea.gov.ar)) / [Laboratorio Resonancias Magnéticas](#)  
 Dr. Luis Avilés Félix ([lavilesf@cab.cnea.gov.ar](mailto:lavilesf@cab.cnea.gov.ar)) / [Laboratorio Resonancias Magnéticas](#)  
 Dr. Sebastian Bustingorry ([sbusting@cab.cnea.gov.ar](mailto:sbusting@cab.cnea.gov.ar)) / [Teoría de la Materia Condensada](#)  
 Dr. Emilio De Biasi ([debiasi@cab.cnea.gov.ar](mailto:debiasi@cab.cnea.gov.ar)) / [Laboratorio Resonancias Magnéticas](#)

Los materiales ferromagnéticos se caracterizan por tener una transición desde una fase paramagnética de alta temperatura hacia una fase de baja temperatura llamada ferromagnética. En esa transición se pasa del estado desordenado de alta temperatura a un estado de baja temperatura donde existe un orden de largo alcance de los momentos magnéticos elementales. En su versión más simple, la fase ferromagnética tiene dos estados posibles en los que los momentos magnéticos apuntan en una dirección o en la dirección opuesta. Como resultado de la competencia entre los diferentes actores involucrados en la energía libre asociada al sistema, surge la posibilidad de coexistencia entre los distintos estados posibles de la fase ordenada. A cada una de las regiones espaciales caracterizada por una magnetización homogénea se la denomina dominio magnético y a la región en la cual la magnetización local cambia su orientación se la denomina pared de dominio.

Desde un punto de vista tecnológico, son muchos los materiales magnéticos en los cuales la presencia y control de dominios y paredes de dominio es de crucial importancia. En este tipo de sistemas existen distintos parámetros que uno puede modificar para alterar la estructura de dominios magnéticos y las propiedades dinámicas de las paredes de dominios. Algunos de estos parámetros como la composición química, el espesor y la cristalinidad están asociados intrínsecamente a cada sistema. Sin embargo, otros parámetros como el campo magnético aplicado, la temperatura y las tensiones aplicadas, nos permiten estudiar en forma continua la evolución de las propiedades de un sistema determinado. En la actualidad está claro que el control de la formación (escritura y borrado) y estabilidad de dominios magnéticos es fundamental para el desarrollo de memorias magnéticas y dispositivo espintrónicos. En este sentido, y dada la necesidad de desarrollar dispositivos a escalas cada vez más pequeñas, es que el estudio de las propiedades magnéticas en materiales ferro- y ferri-magnéticos se ha vuelto esencial.

En este contexto, lo que buscamos investigar son las propiedades y características estáticas y dinámicas de las paredes de dominio en distintos tipos de sistemas y cómo estas son afectadas por los parámetros de control externos. En los últimos años hemos enfocado el esfuerzo en estudiar la dependencia con el campo magnético y la temperatura en películas delgadas de Pt/Co/Pt, Pt/[CoNi]<sub>3</sub>/Ta, Ta/GdFeCo/Pt. Por el momento nos enfocamos principalmente en el régimen térmicamente activado de bajas velocidades ( $10^{-9}$  m/s a 1 m/s), pero cuando el sistema y las condiciones experimentales lo permitieron hemos alcanzado velocidades superiores a los 300 m/s. En el futuro estamos interesados en incorporar otros parámetros de control y otros tipos de muestras. En relación a los parámetros de control, por un lado, estamos interesados en realizar experimentos inyectando corrientes eléctricas polarizadas en espín en la película magnética y por el otro, en estudiar los efectos que tiene la aplicación controlada de tensiones utilizando sustratos piezoeléctricos. En relación al estudio de distintos tipos de muestras, trabajar con semiconductores magnéticos diluidos como el GaMnAs nos dará la posibilidad de explorar sistemas monocristalinos, donde gracias a la baja densidad de defectos podremos desplazar paredes de dominio con bajas densidades de corriente, pero a cambio tendremos que poner operativo un criostato que estamos desarrollando, ya que este material hay que estudiarlo a temperaturas inferiores a 120K.

Con el objetivo de aportar a la formación de recursos humanos, buscamos incorporar jóvenes motivados a nuestro grupo de investigación. Buscamos estudiantes interesados en realizar maestrías y/o



doctorados, como así también a jóvenes investigadores/as interesados/as en realizar un postdoctorado. Naturalmente la propuesta de trabajo concreta se adaptará al candidato/a y al tipo de formación o trabajo que se quiera abordar. El grupo de trabajo está compuesto por investigadores/as con perfiles y *expertise* muy variadas. Esto nos permite abordar los diferentes proyectos de investigación desde diversos ángulos. Desde la realización de distintos tipos de experimentos (microscopia de efecto Kerr, resonancia ferromagnética, magnetometría DC) hasta simulaciones micromagnéticas y con modelos efectivos en procesadores gráficos de alta performance, pasando por el desarrollo y/o adaptación de modelos estadísticos minimales para la interpretación de los resultados.

Algunos casos específicos que proponemos abordar son los siguientes:

1. **Estructura de dominios magnéticos** Estudiar cómo se ven afectadas las propiedades magnéticas de una serie de películas ferrimagnéticas de GdFeCo en función del espesor de la capa de Pt (*capping layer*) con la cual se cubren. En este caso se busca específicamente estudiar el impacto en las propiedades magnéticas DC, la resonancia ferromagnética y la dinámica de las paredes de dominios cuando varía el espesor de Pt en una serie de películas delgadas de Ta(5 nm)/ Gd<sub>30</sub>Fe<sub>63</sub>Co<sub>7</sub>(30 nm)/Pt(x)

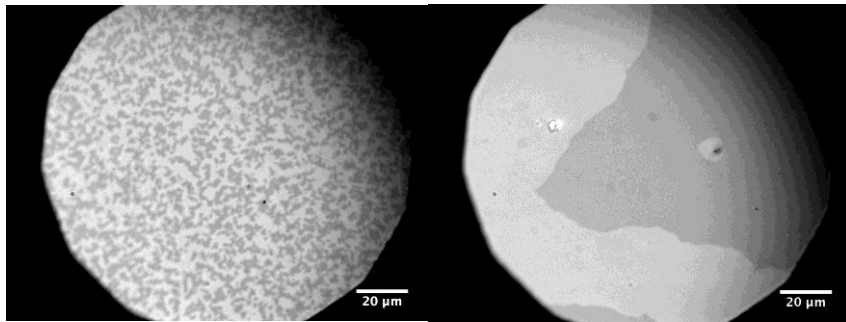


Fig. 1 Micrografías magneto-ópticas de la estructura de dominios magnéticos en películas delgadas de 30 nm de espesor de Gd<sub>30</sub>Fe<sub>63</sub>Co<sub>7</sub>. La región gris clara (oscura) corresponde al dominio magnético cuya magnetización apunta hacia afuera (adentro) de la imagen.

con  $x = 1.5 \text{ nm}, 3 \text{ nm}, 5 \text{ nm}, 8 \text{ nm}$  y  $10 \text{ nm}$ . Estas muestras ferrimagnéticas tienen una temperatura de orden mayor a los 350 K, poseen una marcada anisotropía perpendicular y una temperatura de compensación magnética cercana a los 200 K. Ya hemos comenzado a estudiarlas a temperatura ambiente y estamos interesados en ver cómo evolucionan sus propiedades al disminuir la temperatura.

En la Figura 1 se puede ver cómo cambia la estructura de dominios, a temperatura ambiente, cuando se compara una muestra con 3 nm de Pt (izquierda) con una que tiene 8 nm de Pt (derecha). Para llevar adelante el trabajo utilizaremos distintas técnicas experimentales disponibles en el Laboratorio de Resonancias Magnéticas, en particular microscopia magneto-óptica perpendicular y magnetización DC. Parte del trabajo consistirá en poner operativo un criostato especialmente desarrollado y construido, en colaboración con investigadores y tecnólogos del Conicet y la UTN regional La Plata, para el microscopio PMOKE que tenemos funcionando en el laboratorio Resonancias Magnéticas del CAB.



## 2. Control eléctrico de la dinámica de las paredes de dominio

Estudiar el impacto en las propiedades magnéticas de una heteroestructura ferromagnética al realizar una deformación mecánica controlada. Se estudiará un sistema multicapa  $[\text{Co}/\text{Pt}]_3$  el cual ha sido crecido sobre un sustrato piezoeléctrico de PMN-PT ( $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ ) y según evolucione la investigación y estén dadas las condiciones que permitan el acceso a la sala limpia del CAB, también se propone crecer nuevas muestras. Los sustratos de PMN-PT usados para el crecimiento de las multicapas  $[\text{Co}/\text{Pt}]_3$  son sustratos cristalinos orientados en las direcciones (100) y (110) lo que permitirá estudiar las propiedades magnéticas para distintas direcciones de deformación del piezoeléctrico. Específicamente se busca estudiar el impacto en las propiedades magnéticas DC y la dinámica de las paredes de dominios cuando el sistema  $[\text{Co}/\text{Pt}]_3$  sufre una deformación mecánica. Una caracterización preliminar como la que se muestra en la Figura 1 deja ver que la magnetización del sistema se encuentra fuera del plano lo cual permite avanzar con el estudio de la dinámica de paredes de dominio. Para llevar adelante el trabajo utilizaremos distintas técnicas experimentales disponibles en el Laboratorio Resonancias Magnéticas, en particular microscopía magneto-óptica perpendicular y magnetización DC.

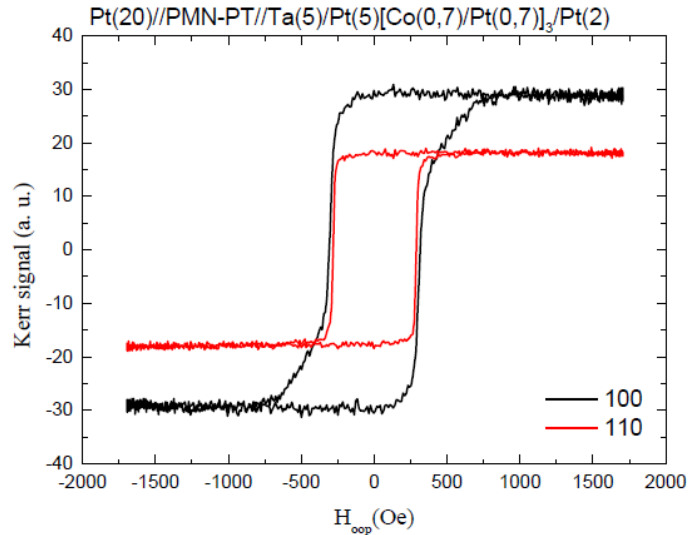


Fig. 2 Ciclo de histéresis de multicapas  $[\text{Co}(0.7 \text{ nm})/\text{Pt}(0.7 \text{ nm})] \times 3$  crecidas sobre sustratos de PMN-PT con distintas orientaciones cristalográficas (110) y (100). El campo aplicado está en la dirección normal al plano de la multicapa.

3. **Magnetismo ultrarápido** Se propone estudiar a través de magnetometría por efecto Kerr resuelta en tiempo (TR-MOKE) cómo evoluciona temporalmente la magnetización de una película delgada ferrimagnética de  $\text{GdFeCo}$  en la escala de tiempo de los pico segundos ( $10^{-12}\text{s}$ ). Para este estudio contamos con una serie de películas delgadas de  $\text{Ta}(5 \text{ nm})/\text{Gd}_{30}\text{Fe}_{63}\text{Co}_7(30 \text{ nm})/\text{Pt}(x)$  con  $x = 1.5 \text{ nm}$ ,  $3 \text{ nm}$ ,  $5 \text{ nm}$ ,  $8 \text{ nm}$  y  $10 \text{ nm}$ . Según vayamos avanzando decidiremos si es más relevante realizar un estudio de la evolución con la temperatura o el espesor de la capa de Pt. Algunas de estas muestras ya hemos comenzado a estudiarlas con otras técnicas a temperatura ambiente y estamos interesados en ver la información que nos pueda aportar las mediciones de TR-MOKE. Parte del trabajo consistirá en realizar el montaje y la calibración de la línea experimental de TR-MOKE lo cual se realizará en el laboratorio de Fotónica y Optoelectrónica. Otras técnicas que eventualmente utilizaremos son la microscopía magneto-óptica polar y magnetización DC.



4. **Solitones Quirales** Estudiar la respuesta dinámica ante la aplicación de corriente de las distintas texturas magnéticas que se observan en materiales helimagnéticos uniaxiales. Estos materiales están caracterizados por una interacción del tipo Dzyaloshinskii–Moriya con una orientación preferencial, lo que le da carácter uniaxial. Esta interacción promueve la aparición de texturas magnéticas con orden quiral que dependen de la intensidad y orientación del campo magnético externo. Puede aparecer orden helicoidal, redes de solitones quirales, orden cónico, o un único solitón quiral (como el que se observa en la figura). El objetivo es estudiar realizando simulaciones numéricas de modelos micromagnéticos como responden este tipo de texturas magnéticas a corrientes eléctricas aplicadas. Estas simulaciones permiten evaluar cómo se desplazan o deforman las texturas magnéticas y comparar con experimentos realizados en sistemas como  $\text{CrNb}_3\text{S}_6$  y  $\text{MnNb}_3\text{S}_6$ .

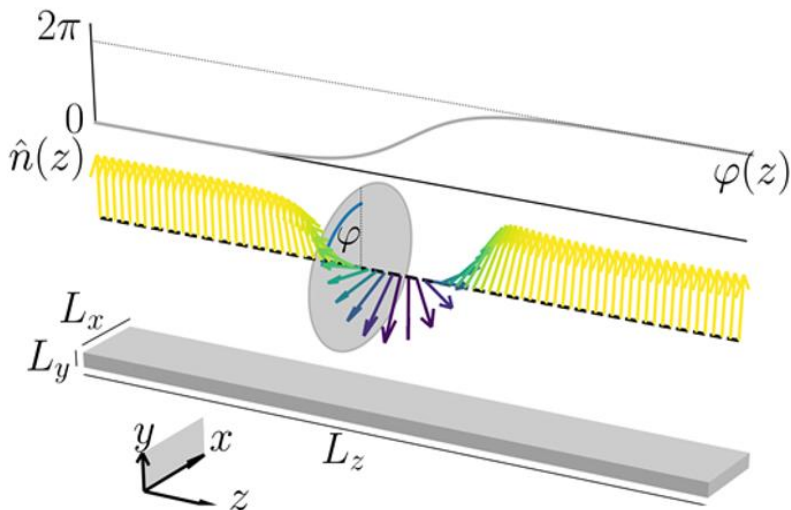


Fig. 3 Distribución espacial de la magnetización en un estado de un único solitón quiral. La magnetización hace una rotación de  $360^\circ$  a medida que cambia la coordenada  $z$  (eje uniaxial).

5. **Micromagnetismo** Como herramientas para el estudio y análisis de sistemas magnéticos queremos mencionar las facilidades de cálculos micromagnéticos. Combinando códigos propios como

también así otros de uso común (mumag3 o OOMF) desarrollamos modelos para explicar comportamientos magnéticos de sistemas de interés. En este sentido el detalle de las características micromagnéticas de paredes de dominio y su evolución temporal pueden ser abordadas. Un ejemplo de estas herramientas, aunque fuera de la temática de paredes de dominio propiamente dicha, es el que desarrollamos en la referencia 11. El trabajo

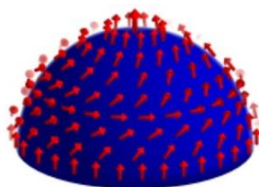


FIG. 14. (Color online) Sketch of the magnetic moment configuration for large spheres (500 and 1000 nm).

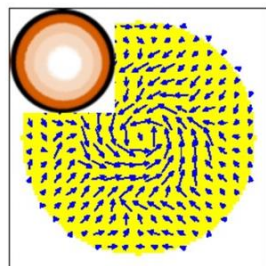


FIG. 12. (Color online) Magnetic domain configuration of a single sphere with a diameter of 500 nm and the corresponding MFM contrast (inset) obtained by simulation.

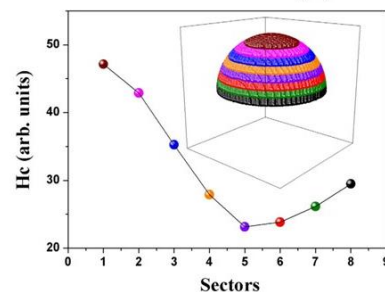
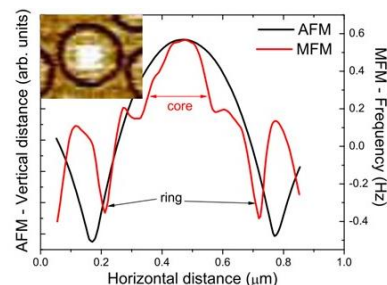


FIG. 13. (Color online) Coercive field for different slabs of the 500 nm cap obtained from the micromagnetic simulations.

Fig. 4 Simulaciones micromagnéticas de sistemas magnéticos y mediciones de AFM de microestructuras magnéticas



se centró en el estudio de sistemas de capas magnéticas de Pd/Co depositadas sobre nanoesferas de poliestileno. Estudios de microscopía AFM y MFM, juntos con medidas de magnetización DC daban indicios de interesantes comportamientos magnéticos que pudieron ser explicados y entendidos con técnicas de simulación micromagnéticas.

## Referencias:

1. P. C. Guruciaga, N. Caballero, V. Jeudy, J. Curiale, y S. Bustingorry, *Tuning Ginzburg-Landau theory to quantitatively study thin ferromagnetic materials*, Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 033211, 2021.
2. V. Laliena, S. Bustingorry, y J. Campo, *Dynamics of chiral solitons driven by polarized currents in monoaxial helimagnets*, Scientific Reports **10**, 20430, 2020.
3. C. P. Quinteros, M. J. Cortés Burgos, L. J. Albornoz, J. E. Gómez, P. Granell, F. Golmar, M. L. Ibarra, S. Bustingorry, J. Curiale, y M. Granada, *Impact of growth conditions on the domain nucleation and domain wall propagation in Pt/Co/Pt stacks*, Journal of Physics D: Applied Physics, **54**, 015002, 2020.
4. D. Jordán, L. J. Albornoz, J. Gorchon, C. H. Lambert, S. Salahuddin, J. Bokor, J. Curiale, y S. Bustingorry, *Statistically meaningful measure of domain-wall roughness in magnetic thin films*, Physical Review B, **101**, 184431, 2020.
5. R. Díaz Pardo, N. Moisan, L. J. Albornoz, A. Lemaître, J. Curiale, y V. Jeudy, *Common universal behavior of magnetic domain walls driven by spin-polarized electrical current and magnetic field*, Physical Review B, **100**, 184420, 2019.
6. P. Domenichini, C. P. Quinteros, M. Granada, S. Collin, J.-M. George, J. Curiale, S. Bustingorry, M. G. Capeluto, y G. Pasquini, *Transient magnetic-domain-wall ac dynamics by means of magneto-optical kerr effect microscopy*, Physical Review B, **99**, 214401, 2019.
7. M. P. Grassi, A. B. Kolton, V. Jeudy, A. Mougín, S. Bustingorry, y J. Curiale, *Intermittent collective dynamics of domain walls in the creep regime*, Physical Review B, **98**, 224201, 2018.
8. N. B. Caballero, E. E. Ferrero, A. B. Kolton, J. Curiale, V. Jeudy, y S. Bustingorry, *Magnetic domain wall creep and depinning: A scalar field model approach*, Physical Review E, **97**, 062122, 2018.
9. C. P. Quinteros, S. Bustingorry, J. Curiale, y M. Granada, *Correlation between domain wall creep parameters of thin ferromagnetic films*, Applied Physics Letters, **112**, 262402, 2018.
10. N. B. Caballero, I. Fernández Aguirre, L. J. Albornoz, A. B. Kolton, J. C. Rojas-Sánchez, S. Collin, J. M. George, R. Diaz Pardo, V. Jeudy, S. Bustingorry, y J. Curiale, *Excess velocity of magnetic domain walls close to the depinning field*, Physical Review B, **96**, 224422, 2017.
11. Márcio M. Soares, Emilio de Biasi, Letícia N. Coelho, Maurício C. dos Santos, Fortunato S. de Menezes, Marcelo Knobel, Luiz C. Sampaio, and Flávio Garcia, *Magnetic vortices in tridimensional nanomagnetic caps observed using transmission electron microscopy and magnetic force microscopy*, Physical Review B, **77**, 224405, 2008.

