

## MOLDEANDO METALES A ESCALA NANOMÉTRICA

Utilizando un molde a escala nanométrica se pueden moldear metales para que adopten una forma en particular. En este estudio se presenta una nueva técnica para obtener películas metálicas ultra-delgadas mediante la técnica de pulverización física de un metal (pulverización catódica en alto vacío o del inglés sputtering) y utilizando como molde el remanente de aluminio de membranas nano-porosas de aluminio anodizado. Utilizando una tasa de deposición alta del metal evaporado sobre el sustrato de aluminio anodizado, se puede crear una película delgada con baja adherencia, la cual se puede despegar para así obtener una lámina delgada con modulaciones como nanocolinas. La morfología de las películas con nanocolinas fue analizada por medio de microscopía de barrido de electrones (SEM – Scanning Electron Microscopy), confirmando así que la forma y ordenamiento del molde obtenido de la anodización de aluminio se traspassa a la película metálica. Adicionalmente, y como un ejemplo del uso de este tipo de sustrato, se ha depositado una película de metal magnético (Supermalloy) sobre el sustrato, para que adopte la forma de estas nanocolinas. Un resultado interesante que se encontró, es que cuando se aplica un campo magnético en la dirección perpendicular al plano, la película presenta un campo coercitivo (campo necesario para que la magnetización se anule) que crece proporcionalmente con el radio de curvatura de las nanocolinas. Este tipo de película magnéticamente blanda y con deformaciones, ofrece una nueva oportunidad para aplicaciones en sensores de campo magnético.

**M**oldear metales es una tarea que se ha practicado durante siglos, hoy en día las nuevas tecnologías nos permiten aplicar este principio para generar estructuras en la escala de los nanómetros. Estas estructuras las utilizamos como sustrato para generar películas muy delgadas fabricadas de material magnético y así otorgarles nuevas propiedades físicas.

Las películas delgadas de material metálico participan en un rango de aplicaciones muy amplio, ya sea en microelectrónica, dispositivos, maquinarias, herramientas, instrumentación médica y técnica, etc. Dentro de estas, se destacan las películas delgadas de plata (Ag) y cobre (Cu) por sus propiedades bactericidas y/o antibacterianas. Un forma de mejorar este tipo de películas, es modulándolas, ya que la superficie activa del metal se ve incrementada. Para esto se han utilizado diferentes técnicas para modular patrones en la superficie, las cuales han sido presentadas en este último tiempo. A pesar de que las películas continuas lisas han sido utilizadas para muchas aplicaciones [Elshabini, et. al. 1997], existen muchas ventajas en utilizar superficies curvas como sustrato [M. Albretch, et. al. 2005]. Por ejemplo, cuando hablamos de materiales magnéticos, las superficies curvas alteran las propiedades magnéticas de los siste-

mas depositados sobre estos, la propiedad más notable que se altera es: la anisotropía magnética, la cual es un factor importante al momento de determinar los procesos de reversión magnética. Además, los materiales auto-ensamblados o auto-organizados, representan una ruta económicamente más conveniente y más efectiva al momento de generar grandes áreas, comparados con los procesos de litografía óptica ó electrónica. Debido a que es más barato, escalable y se pueden fabricar en grandes áreas (del orden de centímetros cuadrados) este tipo de materiales ha sido intensamente estudiado para la industria de sensores, y dispositivos de grabación magnética de alta densidad.

Por una parte, se utilizan arreglos bidimensionales de partículas esféricas monodispersas de poliestireno como un sustrato para depositar películas de multicapas compuestas por una capa de Cobalto y una capa de Paladio Co/Pd [Albretch et. al. 2005 y Ulbricht et. al (2006)] y una capa de Cobalto y una capa de Platino Co/Pt [Eimuller et. al. 2008], además se han utilizado nanoesferas de sílica (óxido de silicio SiO<sub>2</sub>) para depositar películas de multicapas compues-

tas de Hierro y Gadolinio Fe/Gd [Amaladass et. al. 2007, 2010]. Las nanoestructuras, para estos casos, están magnéticamente aisladas, son monodominios magnéticos, son monodispersas, y muestran una anisotropía magnética inducida por la forma esférica del sustrato. Por otro lado, Briones et. al. [Briones et. al. 2013] han estudiado películas delgadas de Cobalto Co depositadas sobre un sustrato polimérico (PDMS - polydimethylsiloxano) arrugado. Esta lámina elástica exhibe una modulación lateral del orden

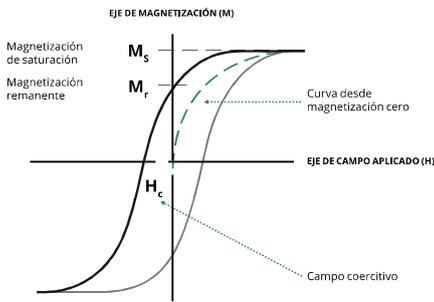
de los submicrómetros. Ellos observaron un mecanismo de magnetización más complejo que el mecanismo de magnetización coherente que presenta una película continua, además de una anisotropía uniaxial (con dirección preferencial en

una única dirección) natural en este tipo de sistemas.

Utilizando membranas nanoporosas de aluminio anodizado (AAO) se puede encontrar otra alternativa para obtener un medio con nanopatrones. Zhao et. al. prepararon arreglos de nanodots a partir de una membrana de AAO utilizada como sustrato [Zhao et. al. 2006]. En este caso el

### Anodización de aluminio:

Se denomina anodización al proceso electro-lítico que hace crecer la capa de óxido natural en la superficie de una pieza metálica. Si este proceso se hace en un ácido que disuelva parcialmente al óxido de aluminio, la forma del óxido de aluminio que se obtiene es como la de un panal de abejas: con agujeros (poros) ordenados hexagonalmente.



**Curva de histéresis:** Si se aplica un campo externo a un material magnético, todos los momentos magnéticos estarán forzados a ir en la dirección del campo. Si se retira ese campo, queda una magnetización remanente, incluso sin campo externo aplicado. Para llevar la magnetización a cero nuevamente, se debe aplicar un campo magnético en la dirección opuesta a la dirección en la que se aplicó el campo magnético inicial. El campo magnético necesario para llevar la magnetización remanente a cero, se llama campo coercitivo. Los materiales que son muy duros magnéticamente hablando (con gran intensidad de momento magnético), tienen un campo coercitivo muy grande.

material se deposita directamente sobre los poros de la AAO por medio de evaporación de metales (sputtering o evaporación por e-beam (haz de electrones)).

En otro estudio, Rosa et. al. [Rosa et. al. 2009] utilizaron membranas de alúmina (con geometría controlada) como molde para poder replicar el orden de la alúmina en una superficie polimérica (PMMA - polimetilmetacrilato) por medio de litografía suave. El método se basa en aplicar un polímero en el aluminio remanente de una anodización; este aluminio contiene una estructura de nanovalles ordenados de forma hexagonal. Una vez que el polímero se ha curado se vuelve duro y permanece rígido. El siguiente paso, consta en sumergir todo el sistema en una solución química (0.10 M CuCl<sub>2</sub>, 20% v/v HCl) que solo disuelve al aluminio, y así el polímero remanente queda con la impresión de nanocolinas por toda su superficie. Si se utiliza el mismo procedimiento pero se reemplaza el polímero por metal, como Plata Ag, por ejemplo, entonces se obtienen dos metales pegados (plata y aluminio), los

cuales no pueden ser despegados por el método descrito, ya que el ataque químico disolvería tanto al aluminio como a la plata.

Entonces, se requiere un método alternativo para modular metales. Adicionalmente, Rosa et. al. Depositaron una película de Cobalto Co en la superficie polimérica para obtener un compuesto de nanocolinas de PMMA/Co. Además depositaron multicapas de Cobalto y Cromo Co/Cr sobre la película de Cobalto Co. En ese trabajo, ellos encontraron que las propiedades magnéticas cambian en función de la periodicidad de los nanovalles en el aluminio.

Todos estos estudios consideran estructuras de Co, las cuales son interesantes debido a la larga anisotropía magnetocristalina que posee este material, la cual favorece en la mayoría de los casos la magnetización con dirección perpendicular (fase HCP) al plano de la película [Cho et. al. 2006, Ivanov et. al. 2013]. Hasta ahora no existe un reporte que investigue un material magnético blando sobre sustratos de nanocolinas, el cual entregue información solo de la contribución a la anisotropía debido a la forma (o a la deformación) impuesta por el sustrato sobre la película. Por ejemplo, un material magnéticamente blando, como lo es el Permalloy (una aleación de Níquel y Hierro Ni-Fe) que ha sido utilizada por décadas por la industria de la microelectrónica. Si se adhiere molibdeno Mo, cobre Cu o cromo Cr a esta aleación, y además se le realiza un tratamiento térmico (cercano a los 500°C), se produce un material llamado Supermalloy [English et. al. 1967, Ma et. al. 2014], un material que exhibe un bajo campo magnético coercitivo y una alta permeabilidad (120.000) [Neamtu

et. al. 2014]. Es decir, prácticamente no tiene una anisotropía.

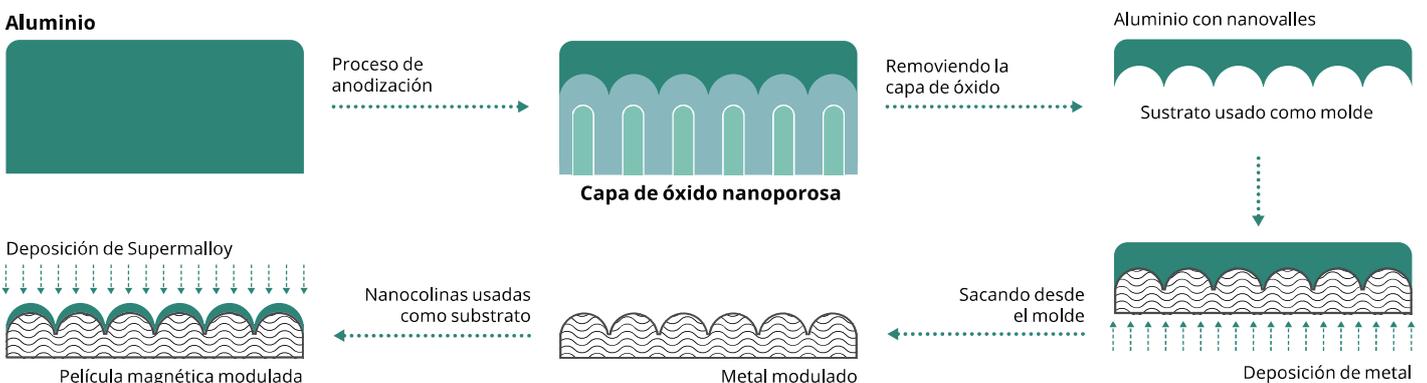
Siguiendo estas ideas, en este trabajo hemos introducido un método nuevo para la modulación de películas metálicas delgadas. Utilizando una alta tasa de deposición durante la deposición del metal no-magnético sobre el molde de aluminio (con esto se produce una baja adhesión), se pueden separar

las dos superficies metálicas y con esto se puede imprimir el patrón del aluminio sobre el metal no-magnético, como oro Au, Plata Ag ó Cobre Cu, replicando así la simetría del aluminio anodizado (ver la figura 1 y 2). El sustrato de aluminio no sufre daños, así que puede volver a ser reutilizado si es necesario. Adicionalmente, se ha depositado Supermalloy sobre la estructura de nanocolinas obtenidas, y así se puede obtener una película con deformaciones impuestas por las nanocolinas del sustrato. Las propiedades magnéticas se investigaron por medio de magnetometría tipo magnetómetro de muestra vibrante (VSM

– Vibrating Sample Magnetometer) a temperatura ambiente y la morfología de las muestras fue estudiada por medio de un microscopio de barrido electrónico (SEM – scanning electron microscopy). Como el Supermalloy tiene

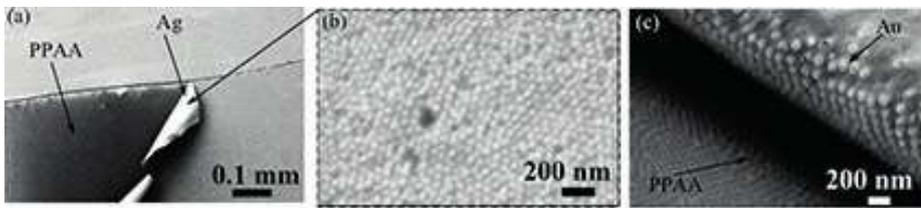
una alta permeabilidad, material a lo que pasa con el cobalto, este material tiene una muy baja anisotropía cristalina, entonces la anisotropía de forma será la responsable por los cambios en las propiedades magnéticas que se observen en los experimentos. Estos sustratos con nanopatrones ofrecen un grado de libertad extra al sistema el cual ofrece nuevas oportunidades al momento de hacer la ingeniería en la funcionalización de nano estructuras magnéticas.

### Aluminio



**FIGURA1**

Esquema de proceso de obtención de un sustrato metálico con modulación de nanocolinas y posterior depósito de un material magnético (Supermalloy). Desde arriba a la izquierda y siguiendo las flechas: (1) lámina de aluminio de alta pureza, (2) mediante el proceso de anodización se obtiene una membrana de alúmina porosa, (3) se remueve la membrana de alúmina porosa y se obtiene un aluminio con un patrón de nanovalles, (4) se deposita un material metálico y (6) se remueve de la superficie de aluminio para finalmente (6) depositarle una película magnética la cual tiene deformaciones como colinas.



**FIGURA 2**

(a) Momento del despegado de una lámina metálica de plata Ag del sustrato con nanovalles del aluminio. (b) Se observan los elementos de nanocolinas de plata de la cara que estaba en contacto con el aluminio con nanovalles. (c) nanocolinas de oro despegándose del sustrato de aluminio nanoestructurado.

## 2. Preparación de muestras y caracterización morfológica.

La manufactura de las muestras incluye los siguientes pasos:

**2.1 Obteniendo un sustrato de aluminio con nanovalles:** Este primer paso consiste en la anodización de aluminio, por un periodo de 6 horas con diferentes voltajes, de una lámina de aluminio bajo diferentes soluciones ácidas (ácido fosfórico, ácido oxálico y ácido sulfúrico). Los detalles acerca de este método pueden ser encontrados en variadas publicaciones [Escríg et. al, 2008, Cortés et. al, 2009, Palma et. al. 2013]. Luego la alúmina se remueve selectivamente [Escríg et. al. 2008] para así obtener una muestra de aluminio con nanovalles ordenados hexagonalmente. Los parámetros geométricos de la membrana de alúmina quedan definidos por los parámetros utilizados en la anodización (solución ácida, voltaje, temperatura, tiempo).

**Anisotropía magnetocristalina:** (en palabras simples) existe una dirección cristalográfica preferencial donde todos los momentos magnéticos de la muestra quieren estar en esa dirección.

**2.2 Nano modulación de un material no-magnético:** El aluminio nanoestructurado se utiliza como un molde para imprimir el patrón hacia una superficie metálica. Para esto se han depositado metales como Oro Au, Plata Ag y Cobre Cu en el aluminio. Todos los materiales tienen una alta pureza (99.99% de la compañía Kurt J. Lesker). Para obtener una baja adhesión entre los metales no-magnéticos depositados (debido a la diferencia de temperatura y diferente constricción entre ambos metales), hemos utilizado una alta tasa de deposición (entre 59 y 127 nm por minuto, la cual es diferente para cada metal depositado). Esta tasa se obtiene colocando la muestra muy cercana a la fuente de evaporación de metales. Además, el hecho de que el sustrato esté tan cerca de la fuente de evaporación metálica, produce un calentamiento local que ayuda a la baja adhesión entre los metales.

**2.2.1 Lámina de Oro nanoestructurada:** Los parámetros utilizados para la deposición de oro sobre aluminio con nanovalles son: presión base de  $0.15 \times 10^{-6}$  mbar, un flujo de Ar de 15 sccm, una presión de trabajo de  $6.67 \times 10^{-3}$  mbar y una potencia de 50 W. Para una tasa de deposición de 59 nm/min se obtiene un espesor de  $885 \pm 35$  nm depositando por un tiempo de 900 s.

**2.2.2 Lámina de Cobre nanoestructurada:** Los parámetros utilizados para la deposición de cobre sobre aluminio con nanovalles son: presión base de  $0.15 \times 10^{-6}$  mbar, un flujo de Ar de 20 sccm, una presión de trabajo

de  $6.67 \times 10^{-3}$  mbar y una potencia de 50 W. Para una tasa de deposición de 91 nm/min se obtiene un espesor de  $912 \pm 12$  nm depositando por un tiempo de 600 s.

**2.2.3 Lámina de plata nanoestructurada:** Los parámetros utilizados para la deposición de plata sobre aluminio con nanovalles son: presión base de  $6.67 \times 10^{-6}$  mbar, un flujo de Ar de 15 sccm, una presión de trabajo de  $6.67 \times 10^{-3}$  mbar y una potencia de 50 W. Para una tasa de deposición de 127 nm/min se obtiene un espesor de  $633 \pm 21$  nm depositando por un tiempo de 300 s.

## 2.3 REMOVIENDO EL MATERIAL METÁLICO DEL SUBSTRATO

Se puede remover el sustrato metálico del aluminio fácilmente, solo pelando el material metálico de la superficie del aluminio. En nuestro caso utilizamos una cinta adhesiva sobre el material metálico y así el sustrato metálico que se despega queda inmediatamente soportado sobre otra estructura. Entonces la lámina metálica presenta sobre su superficie una suave estructura de nanocolinas, con diferentes

r(nm)	D(nm)	t(nm)
25	55	60
25	73	60
55	135	60
60	150	60
155	321	60

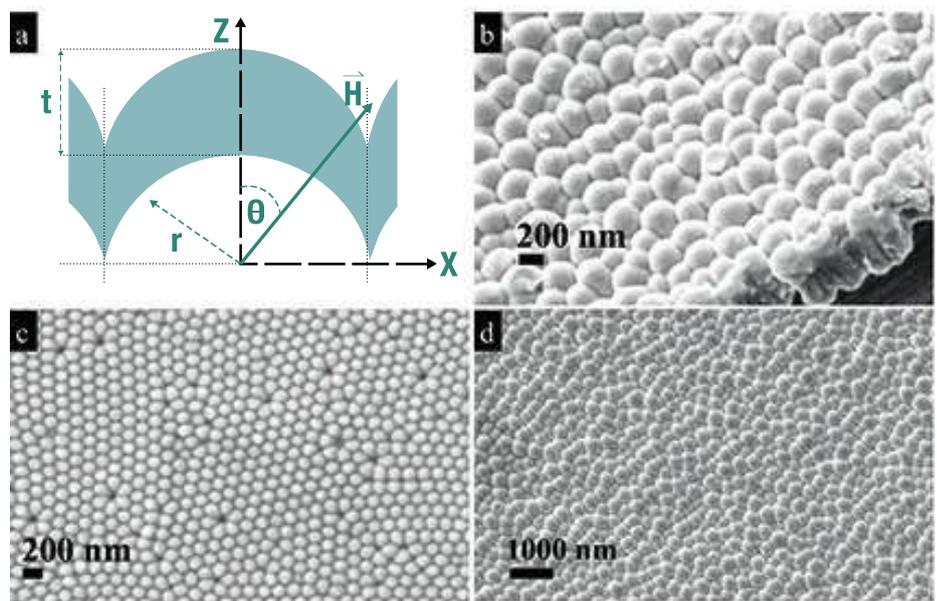
**TABLA 1**

Parámetros geométricos para películas nanoestructuradas de supermalloy sobre nanoestructuras de colinas metálicas. Los datos muestran el radio  $r$ , de las nanocolinas metálicas de plata, la distancia entre las nanocolinas,  $D$ , y el espesor,  $t$ , del material magnético depositado.

parámetros geométricos (ver tabla 1).

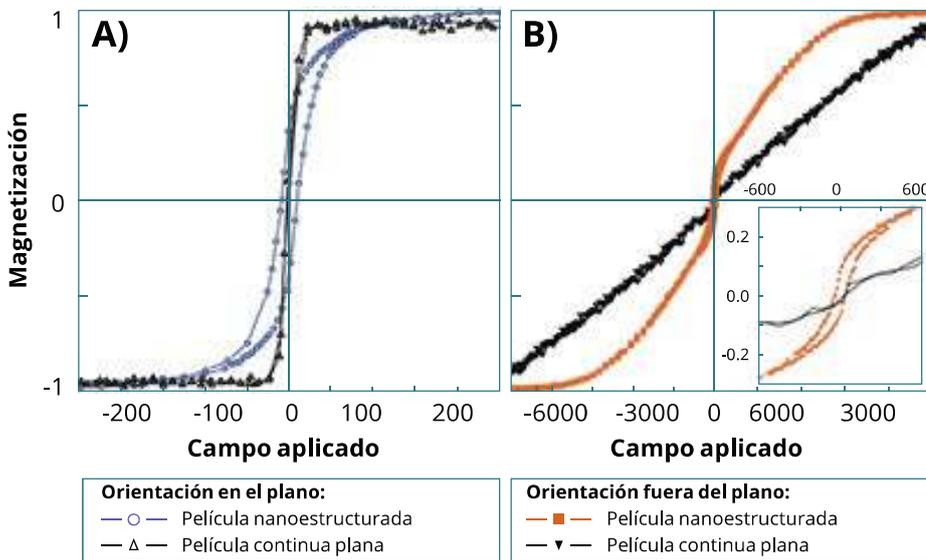
La morfología de estos patrones impresos en la superficie metálica, se estudió por medio de microscopía de barrido de electrones, utilizando un microscopio MA10, la figura 2 muestra la morfología de una superficie de plata con nanocolinas de radio 155 nm y 321 nm de distancia entre centros de elementos, aquí se puede ver con claridad como la estructura metálica adopta la forma del sustrato.

El material nanoestructurado se utiliza como sustrato para depositar una lámina magnética continua de Supermalloy (con una composición de 80% de Níquel Ni, 5% de Molibdeno Mo y balanceada con Manganese Mn y Hierro Fe (HYMU 80) con 99% de pureza de la compañía Kurt J. Lesker). En todos los sustratos, con diferentes geometrías, se depositó el material magnético al mismo tiempo por medio de un sputtering asistido por un magnetrón, utilizando una presión base de  $9.6 \times 10^{-6}$  mbar y una presión de argón  $Ar^+$  de  $4.0 \times 10^{-3}$  mbar. El espesor depositado de la lámina es de  $t=60$  nm, y además, para proteger al material magnético de la oxidación se depositaron 5 nm de espesor de Tántalo Ta.



**FIGURA 3**

(a) Descripción geométrica de una vista lateral de una deformación en la lámina magnética. (b) imagen SEM de una estructura de plata con nanocolinas de 155 nm de radio y distancia entre elementos de 321 nm. (c) Imagen SEM de un film nanoestructurado de supermalloy con radio de 60 nm y distancia entre centros de 150 nm y (d) 155 nm de radio y distancia entre centros de 321 nm.



$r(\text{nm})$	$H_c^{\text{para}}(\text{Oe})$	$H_c^{\text{perp}}(\text{Oe})$
0	0,017	2,5
25	0,37	4,3
25	9,14	35,75
55	10,96	40,42
60	7,16	59,76
155	4,210	124,75

**TABLA 2**

Campos coercitivos para la película nanoestructurada de Supermalloy. Los datos muestran el radio  $r$  de la deformación, el campo coercitivo paralelo al plano de la película ( $H_c^{\text{para}}$ ) y perpendicular a la película ( $H_c^{\text{perp}}$ ).

plano de la película continua ( $90^\circ$ ). La figura 3 muestra las curvas de magnetización para una película nanoestructurada de Supermalloy, con radio de las nanocolinas de 55 nm, y distancia entre centros de elementos de 135 nm. De la figura 3 (a) se puede observar que cuando el campo magnético se aplica en el plano del sustrato ( $90^\circ$ ), la muestra exhibe un incremento en el campo coercitivo comparado con el sustrato liso (sin nanoestructuras) (ver tabla 2).

Además, cuando el campo magnético se aplica perpendicular al plano de la película ( $0^\circ$ ), la curva de histéresis satura sus momentos magnéticos en la dirección del campo, así cuando la intensidad de campo magnético alcanza los 7 kOe y exhibe una forma tipo "S", con un campo coercitivo grande, comparado al caso cuando el campo magnético se aplica en el plano de la película. Esto puede ser atribuido a la existencia de una componente fuera del plano de la película.

Para investigar el efecto de la anisotropía de forma en las propiedades magnéticas de películas de Supermalloy en sustratos de plata Ag con nanocolinas, hemos resumido los resultados mostrando la variación del campo coercitivo y de la remanencia de la magnetización, en función del radio de las nanocolinas. Como el espesor de la película magnética es constante para todas las muestras, la variación en las propiedades magnéticas que se observa corresponde principalmente a la variación de la geometría impuesta por el sustrato de nanocolinas. Se observa que cuando el campo magnético se aplica en la dirección paralela al plano ( $90^\circ$ ), la coercividad permanece constante, independiente de el radio de las nanocolinas. Esto indica que si aplicamos un campo magnético externo en el plano de la muestra, el campo coercitivo de la muestra no varía con la existencia de las modulaciones. Este punto es importante ya que las películas preparadas por evaporación de metales, no son homogéneas y siempre presentan irregularidades e imperfecciones en la película. Concluimos entonces, que independientemente de las irregularidades el campo coercitivo de la muestra es similar al de una película magnética plana. Además la magnetización remanente exhibe un comportamiento no-monotónico, que alcanza un máximo cerca de los 60 nm. Este comportamiento se puede explicar desde el punto de vista de la interacción magnetostática entre las nanocolinas y de

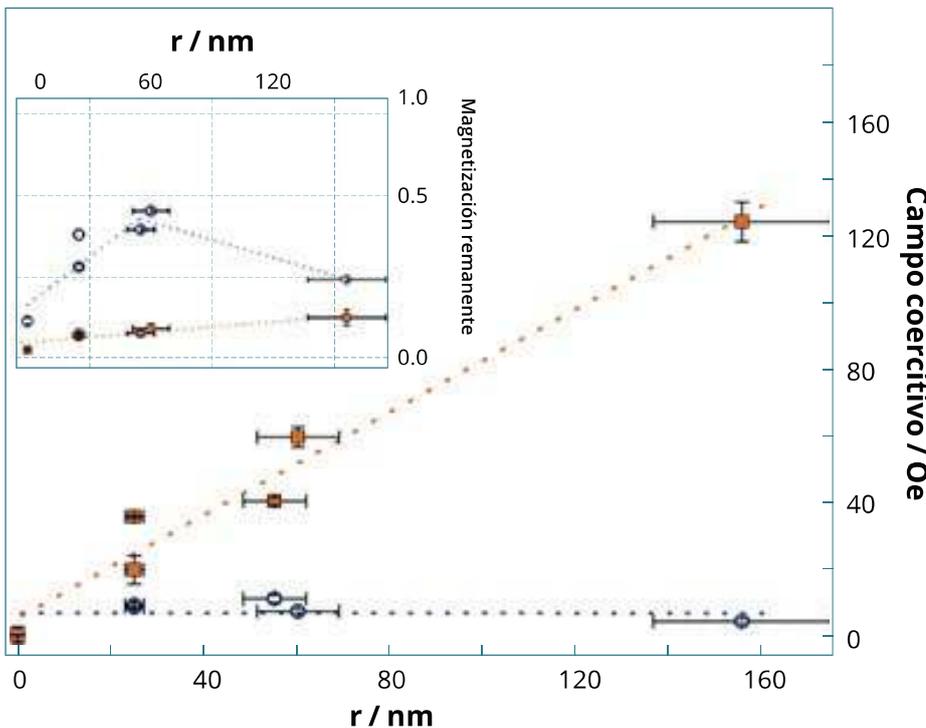
**FIGURA 4**

Propiedades magnéticas de una película nanoestructurada de Supermalloy con radio de 55 nm y distancia entre centros de 135 nm. (a) Curvas de histéresis cuando el campo magnético externo se aplica en el plano de la película continua (triángulos negros) y en el plano de la película nanoestructurada (círculos azules). (b) Curvas de histéresis magnética cuando el campo magnético se aplica perpendicular al plano de la película continua (triángulos negros) y perpendicular al plano de la película nanoestructurada (cuadrados naranjos). La imagen que está insertada en la figura (b) corresponde a un acercamiento para observar la diferencia en las propiedades magnéticas de a película continua y la nanoestructurada.

Las figuras 2c y 2d muestran imágenes de un microscopio de barrido electrónico (SEM) para una película de Supermalloy sobre nanocolinas con radios de 60 y 155 nm respectivamente. Como se observa las imágenes revelan un ordenamiento hexagonal regular en el rango de los 2 micrómetros para las nanocolinas de 60 nm y el orden desaparece para las nanocolinas con diámetros de 155 nm. Estas diferencias se deben al proceso de anodización de cada muestra. Sin

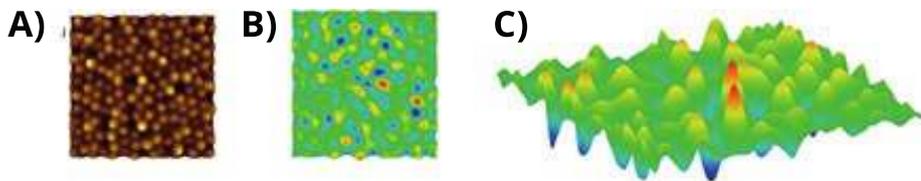
embargo, se ve como la película de material magnético adopta la forma impuesta por el sustrato. Entonces el orden obtenido para  $r=60\text{nm}$  permanece después de depositar la película magnética continua.

**3. Caracterización magnética:** Las curvas de magnetización se midieron utilizando un magnetómetro de gradiente de fuerza alternado (AGFM), donde el campo magnético externo aplicado para magnetizar la película se aplicó fuera del plano ( $0^\circ$ ) y en el



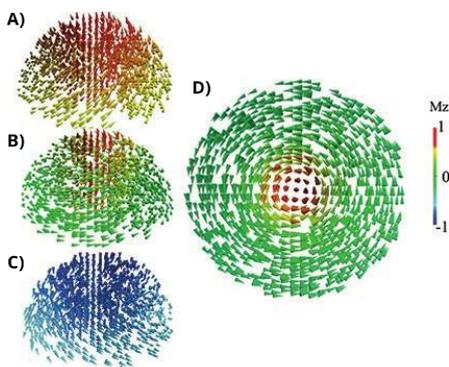
**FIGURA 5**

Campo coercitivo para películas magnéticas de Supermalloy en función del radio  $r$  de la deformación. La figura inserta en el gráfico mayor, corresponde al comportamiento de la magnetización remanente en función del radio de las nanocolinas. El campo magnético externo se aplicó en dirección perpendicular (cuadrados naranjos) y paralelo (círculos azules) al plano de la película. La línea punteada es solo una guía y no representa un ajuste matemático del comportamiento.



**FIGURA 6**

(a) Imagen de microscopía de fuerza atómica (AFM – Atomic Force microscopy) de una muestra de nanocolinas. (b) Microscopía de fuerza magnética (MFM – Magnetic Force Microscopy) de una muestra con nanocolinas; las zonas rojas indican a la magnetización apuntando fuera de la página, las zonas azules muestran la magnetización de la muestra apuntando dentro de la página. (c) Vista en proyección de la imagen mostrada en (b).



**FIGURA 7**

Simulaciones micromagnéticas de un elemento individual de nanocolina, donde cada vector con forma de cono representa un momento magnético en la muestra. El código de colores representa la dirección en la que apunta cada elemento. El color rojo representa un elemento apuntando en la dirección +Z, el color azul representa a un elemento apuntando en la dirección -Z. Desde (a) hasta (c) el elemento está en el proceso de invertir su magnetización, cuando el campo está siendo aplicado perpendicular al plano del elemento de nanocolina. (c) Vista superior de (b).

el desorden presente en la muestra [Palma et al., patent application CL201503277].

Por otra parte, cuando el campo magnético se aplica en la dirección perpendicular a la muestra ( $0^\circ$ ). El campo coercitivo incrementa linealmente con el radio  $r$  de las nanocolinas. Este comportamiento no ha sido observado previamente debido al hecho de que en los estudios realizados en este tipo de estructura encontrado en la literatura [Rosa, et al. 2009, Cho et. al. 2006] se ha utilizado solo cobalto Co, el cual presenta una fuerte anisotropía cristalina, y se pierde el efecto de la anisotropía de forma de la muestra. En nuestro caso, el campo coercitivo puede ser manejado hasta 120 Oe eligiendo apropiadamente la geometría de la muestra. Es importante mencionar que  $r=0$  nm corresponde a una película continua. La variación del campo coercitivo ocurre debido a que se varía el diámetro de las nanocolinas, y esto varía la altura de la deformación en la película magnética continua, lo cual contribuye al crecimiento perpendicular de la película, y a su vez contribuye a la anisotropía perpendicular al plano. Además es importante observar, que la magnetización remanente permanece constante cuando el campo magnético se aplica en la dirección perpendicular al plano.

#### 4. CONCLUSIONES

En conclusión, hemos introducido un método para la modulación de películas metálicas por medio de evaporación de metales en alto vacío y utilizando un sustrato de alúmina porosa como sustrato [Palma et. al. patent application CL201503277]. Utilizando una alta tasa de deposición durante la deposición del metal no magnético en el patrón de aluminio, fue posible separar ambas superficies metálicas, y así imprimir un patrón a escala nanométrica en las películas metálicas (como oro Au, plata Ag, y cobre Cu). Hasta ahora la literatura solo ha mostrado la técnica con polímeros, PMMA, [Rosa et. al. 2009, Cho et. al. 2006], siendo esta a primera vez que se logra imprimir un patrón metálico directo desde la superficie de aluminio nanoestructurado. Además, fue estudiado por primera vez un material magnéticamente blando para conocer como afecta la deformación de nanocolinas a una película magnética, debido solamente a la anisotropía de forma. Por medio de microscopía de barrido electrónico SEM, fue posible confirmar que la película magnética continua adopta la forma de las nanocolinas. De las curvas de magnetización se observó que si el campo externo se aplica en dirección perpendicular al plano de la película magnética con nanocolinas, el campo coercitivo de la película incrementa linealmente con el radio. Con esto, la habilidad de poder manejar el campo coercitivo ajustando el radio de las nanocolinas, permite abrir nuevas oportunidades que pueden ser útiles para nuevas aplicaciones.

#### BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Elshabini, F.D. Barlow, *Thin-film technology handbook*, McGraw-Hill, New York, 1997.
- [2] M. Albrecht, G. Hu, I.L. Guhr, T.C. Ulbrich, J. Boneberg, P. Leiderer, G. Schatz, *Nat. Mater.* 4 (2005) 203.
- [3] T.C. Ulbrich, D. Makarov, G. Hu, I.L. Guhr, D. Suess, T. Schrefl, M. Albrecht, *Phys. Rev. Lett.* 96 (2006) 077202.
- [4] T. Eimuller, T.C. Ulbrich, E. Amaladass, I.L. Guhr, T. Tyliczszak, M. Albrecht, *Phys. Rev. B* 77 (2008) 134415.
- [5] J. Briones, P. Toro, A. Encinas, L. Caballero, J.C. Denardin, F. Melo, E. Cerda, S. Robert, D. Lacour, F. Montaigne, *Appl. Phys. Lett.* 103 (2013) 072404.
- [6] S. Zhao, H. Roberge, A. Yelon, T. Veres, *J. Am. Chem. Soc.* 128 (2006) 12352.
- [7] E. Amaladass, B. Ludescher, G. Schutz, T. Tyliczszak, T. Eimuller, *Appl. Phys. Lett.* 91 (2007) 172514.
- [8] E. Amaladass, B. Ludescher, G. Schutz, T. Tyliczszak, M.-S. Lee, T. Eimuller, *J. Appl. Phys.* 107 (2010) 053911.
- [9] W.O. Rosa, M. Jaafar, A. Asenjo, M. Vazquez, *Nanotechnology* 20 (2009) 075301.

[10] W.O. Rosa, M. Jaafar, A. Asenjo, M. Vazquez, *J. Appl. Phys.* 105 (2009) 07C108.

[11] W.O. Rosa, L. Martinez, M. Jaafar, A. Asenjo, M. Vazquez, *J. Appl. Phys.* 106 (2009) 103906.

[12] J. Cho, J. Hyun, J.H. Wu, S.P. Min, J.Y. Ko, Q.X. Soh, Y.K. Kim, *J. Magn. Magn. Mater.* 303 (2006) e281.

[13] Y.P. Ivanov, L.G. Vivas, A. Asenjo, A. Chuvillan, O. Chubykalo-Fesenko, M. Vazquez, *Europhys. Lett.* 102 (2013) 17009.

[14] A.T. English, G.Y. Chin, *J. Appl. Phys.* 38 (1967) 1183.

[15] F. Pfeifer, C. Radeloff, *J. Magn. Magn. Mater.* 19 (1980) 190.

[16] J. Ma, M. Qin, X. Wang, L. Zhang, L. Tian, X. Zhang, X. Li, X. Qu, *Powder Technol.* 253 (2014) 158–162.

[17] B.V. Neamtu, I. Chicinas, O. Isnard, I. Ciascai, F. Popa, T.F. Marinca, *J. Magn. Magn. Mater.* 353 (2014) 6.

[18] J. Escrib, R. Lavin, J.L. Palma, J.C. Denardin, D. Altbir, A. Cortes, H. Gomez, *Nanotechnology* 19 (2008) 075713.

[19] A. Cortes, G. Riveros, J.L. Palma, J.C. Denardin, R.E. Marotti, E.A. Dalchiele, Humberto Gomez, *J. Nanosci. Nanotechnol.* 9 (2009) 3.

[20] J.L. Palma, C. Gallardo, L. Spinu, J.M. Vargas, L.S. Dorneles, J.C. Denardin, J. Escrib, *J. Magn. Magn. Mater.* 344 (2013) 8–13.

[21] J.L. Palma, J.C. Denardin, J. Escrib, *Chile patent application No. CL201503277*

#### AUTORES:

J. L. Palma<sup>a,c</sup>, J. C. Denardin<sup>b,c</sup>, J. Escrib<sup>b,c</sup>.

<sup>a</sup> Departamento de Ciencias Básicas, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Chile, Santa Isabel 1186, 8330601 Santiago, Chile.

<sup>b</sup> Departamento de Física, Universidad de Santiago de Chile (USACH), Avda. Ecuador 3493, 9170124 Santiago, Chile.

<sup>c</sup> Center for the Development of Nanoscience and Nanotechnology (CEDENNA), 9170124 Santiago, Chile.

#### TEXTO ORIGINAL:

La mayor parte de este artículo está publicado en *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* de la editorial Elsevier, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.10.121>.

#### AGRADECIMIENTOS.

Los autores agradecen el soporte del programa FONDECYT bajo los proyectos 1150952, 1140195 y 11150671, y el proyecto Basal FB0807.