



# DEFECTOS EN UN MATERIAL; ¿PORQUÉ SON IMPORTANTES PARA EL MAGNETISMO?

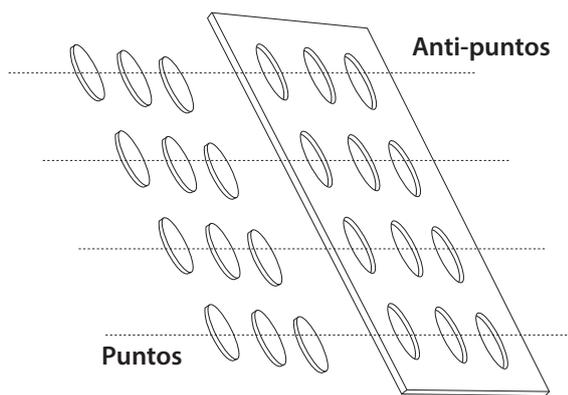
*Juan Luis Palma*

*Ingeniero Físico, Doctor en Ciencias con mención en Física*

Atrapar la magnetización resulta importante para la grabación magnética (discos duros, memorias RAM) para los procesadores, para medicina y para sensores. En un medio material, la magnetización siempre está presente, pero se hace más evidente y con una alta respuesta a bajos campos (campos magnéticos externos aplicados) en materiales ferromagnéticos. Comúnmente se hacen imanes con este tipo de materiales, y en la nanoescala, las propiedades magnéticas de los nanoimanes dependen de la forma que tenga el nanoimán. En el medio material, existen defectos (llámense defectos cristalinos o de otra índole) que atrapan (anclan o clavan) esta propagación de la magnetización, y quedan regiones apuntando en una dirección y otras regiones apuntando en otra dirección.

Para este trabajo en particular; se han sintetizado láminas delgadas, de un material magnético, con defectos controlados. Estas láminas usualmente se conocen como "antidots" (que viene de anti: "contrario" a la estructura de dots: "punto" (del inglés)).

Podemos imaginar un arreglo de puntos magnéticos (dots), como un arreglo de estructuras parecidas a una pastilla (aspirina) en donde la magnetización en cada dot no se puede trasladar hacia ningún lado, es decir, la magnetización se confina (se atrapa). La estructura de antidots es justo la complementaria a la anterior para formar una lámina continua, es decir es cómo una lámina con agujeros, aquí la reversión de la magnetización se puede trasladar por los laberintos que quedan entre los agujeros.

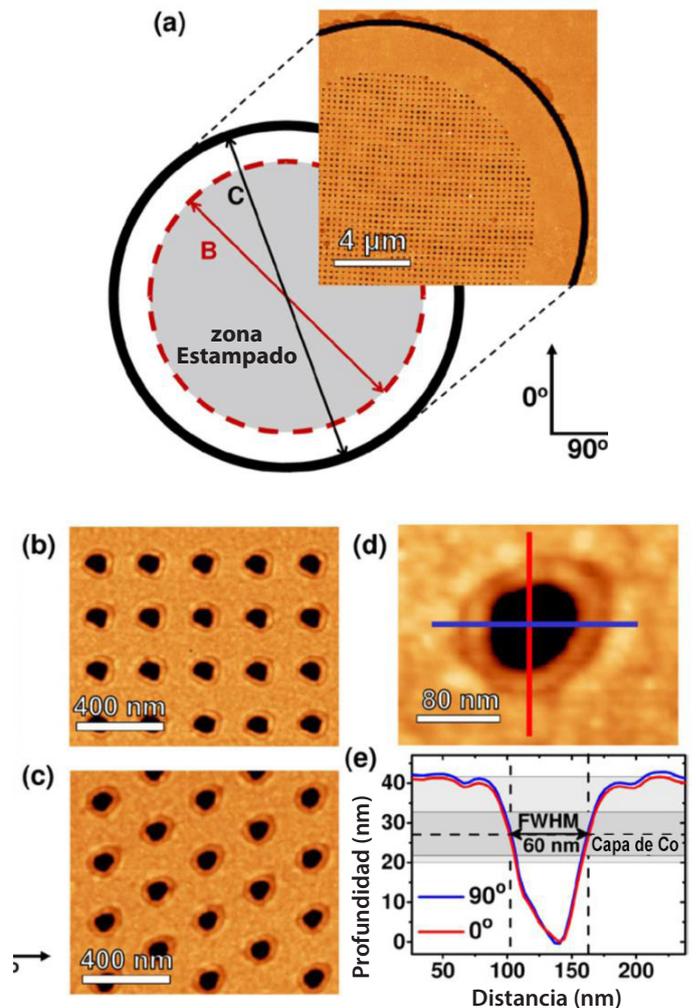


Las mediciones magnéticas de este tipo de láminas se realizaron en un magnetómetro del tipo MOKE (magnetómetro que utiliza el efecto Kerr Magneto-Óptico). Para observar directamente la forma de los agujeros en la lámina y además la configuración de la magnetización se han realizado mediciones AFM y MFM (del inglés, Atomic Force Microscopy and Magnetic Force Microscopy). Para entender el comportamiento de estos sistemas

### Fabricación (síntesis) de una lámina de antidots magnéticos

Este tipo de láminas con defectos controlados, se sintetizan por medio de una deposición de una lámina metálica. Esta lámina metálica se deposita evaporando el metal en una cámara de alto vacío. Al evaporarse el metal, este se deposita sobre un sustrato plano y se genera una lámina continua lisa de material magnético (es cómo fabricar un imán con forma de una hoja de papel, dónde el grosor de la hoja de 10 nanómetros). La lámina que se depositó consiste en tres capas, la primera de dos nanómetros de titanio, y sobre esta lámina de titanio se depositaron diez nanómetros de cobalto (que es magnético) y sobre el cobalto se depositaron diez nanómetros de oro, para así evitar la oxidación de la superficie de cobalto Ti(2nm)/Co(10nm)/Au(10nm). Luego de realizar la deposición, por medio de un haz de electrones se puede perforar esta lámina, para esto se utiliza un haz de iones enfocado (Focused Ion Beam, FIB). De esta manera se pueden dibujar agujeros

ordenados en arreglos cuadrados, o hexagonales, que son los que nos interesa estudiar.



**FIGURA 2**

(a) arreglo de antidots en una lámina delgada de cobalto (Co) con 10 nm de grosor (e), dónde el círculo exterior es una zanja que separa al arreglo de antidots del resto de la lámina continua, el diámetro de esta región es de 20 micrómetros, y la región circular que contiene los antidots es de 15 micrómetros. Los arreglos se hicieron en redes cuadradas (b) y en arreglos hexagonales (c) de antidots con diámetro de 60 nm (d).

Los agujeros creados por Ion-Line FIB, en los arreglos cuadrados y hexagonales, tienen una separación de 150, 200, 250 y 300 nanómetros entre centro y centro de cada antidot.

### Descripción de la geometría

Desde un punto de vista magnético, cada agujero representa un defecto en el material, ya que cada agujero es una discontinuidad del material. En la orilla de este agujero nanométrico, se genera una concentración de campo desmagnetizante, lo que hace que la propagación de la magnetización se estanque. Entonces podemos caracterizar la muestra por una cantidad que relacione la cantidad de defectos que se encuentren en ella, a esto lo llamamos la "densidad de defectos en el volumen" (DVD). Para encontrar este número que nos va a decir cuántos defectos hay en la muestra lo hacemos dividiendo el área de los defectos por el área de la muestra total. Esto se hace en una celda unidad (que es una celda que se puede repetir varias veces para formar una estructura cristalina). Si a es la constante de red (distancia entre dos centros de agujeros más cercanos) y d es el diámetro del agujero, entonces para la red cuadrada se tiene que:

$$DVD_{Sq} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{a}\right)^2$$

y para la red hexagonal se tiene que:

$$DVD_{Hex} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left(\frac{d}{a}\right)^2$$

Entonces la cantidad de defectos que se encuentren en la muestra están relacionados por un parámetro adimensional que consta de la división entre el diámetro del agujero y la separación entre centros de agujeros. La constante de proporcionalidad indicará que tan densa es la matriz de agujeros.

### Revertir la magnetización

Invertir la dirección en la que apunta la magnetización neta de un material, significa invertir la mayoría de los momentos magnéticos de los átomos. Para hacer esto es necesario meter energía externa al material, esto se logra por medio de un campo magnético externo, y se conoce como la contribución de Zeeman. Entonces el proceso consta en aplicar campo en una dirección de la muestra, esto lleva a que todos los momentos magnéticos apunten en una dirección, luego si se aplica el campo magnético externo en una dirección contraria entonces la magnetización se invierte, y en el proceso la inversión de la magnetización se encuentra con defectos que dificultan su paso.

Las propiedades magnéticas se miden a través de una curva característica que se llama ciclo de histéresis magnético, que corresponde a ciclo de memoria. Si las curvas son más anchas, requieren de más energía para invertir su magnetización, si son más delgadas requieren de menos energía para invertir su magnetización. Si la curva es más cuadrada tiene una dirección de fácil magnetización, si se parece más a una "S" entonces en esta dirección la magnetización es más difícil. Mediante este tipo de análisis, que fue explicado de manera muy simplista, se pueden diseñar sistemas magnéticos.

Dentro de un mismo material, podemos encontrar todos los parámetros expuestos anteriormente, si se maneja la geometría del material. En nuestro caso, si el campo se aplica en dirección de los primeros vecinos (el agujero más próximo en la red) o si se aplica en dirección de los segundos vecinos de la red (segundo grupo de agujeros más próximo a un agujero cualquiera) se obtienen distintas curvas de histéresis magnética, que representa distintas propiedades magnéticas, así se observa en la figura 3.

El ancho de la curva de histéresis nos dice cuán intenso debe ser el campo magnético que apliquemos a la muestra para que su magnetización revierta. Esto está linealmente relacionado con la densidad de defectos, para cada una de las muestras, considerando si aplicamos el campo magnético a primero vecinos de la red o a segundos vecinos. Es decir, dependiendo de la dirección en la que apliquemos el campo externo tendremos distintas propiedades magnéticas.

El magnetómetro que utilizamos en esta ocasión no es un magnetómetro común. Por lo general si se genera un campo magnético entre dos bobinas, lo que se hace es agita la muestra dentro de este campo constante, y cómo la muestra es magnética produce variaciones en el flujo de campo que se traducen a un voltaje que podemos medir. Este voltaje se colecta por bobinas más pequeñas y sensibles que captan la variación de campo (magnetómetro de muestra vibrante VSM), o por un cerámico conocido como piezoeléctrico que genera un voltaje al doblarse (magnetómetro de gradiente de fuerza alternado AGFM). EL magnetómetro MOKE utiliza el efecto Kerr magneto-óptico, un haz de luz polarizado incide (a lo más unas decenas de nanómetros al interior de la superficie de la muestra) y al interactuar con la magnetización de los átomos este haz cambia su polarización. Nosotros tomamos esa polarización y la relacionamos con la magnetización de la muestra para poder obtener las propiedades magnéticas.

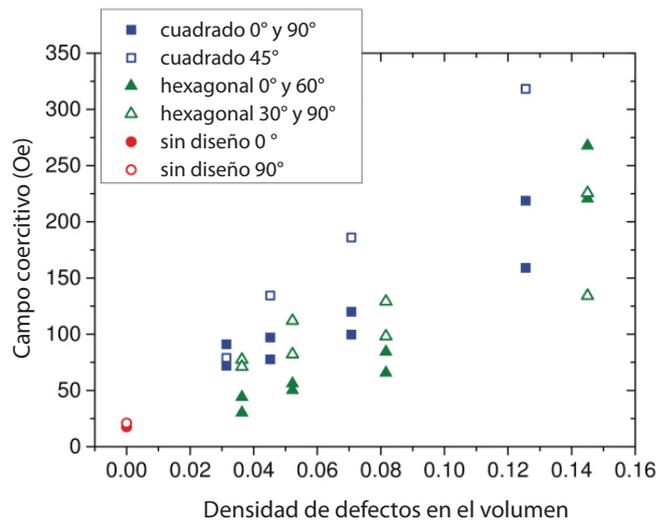


FIGURA 3

variación del campo coercitivo con respecto a la densidad volumétrica de defectos. Para el caso del arreglo cuadrados se aplicó el campo en dirección de los primeros vecinos (cuadrados azules sólidos) y de los segundos vecinos (cuadrados vacíos), al igual que para el caso de los arreglos hexagonales, en la dirección de primeros vecinos (triángulos verdes sólidos) y segundos vecinos (triángulos verdes vacíos).

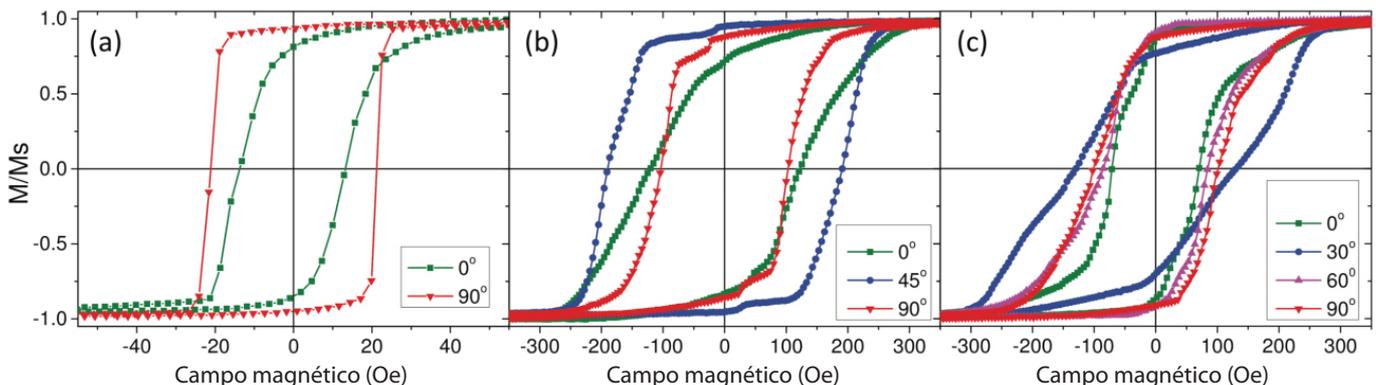


FIGURA 3

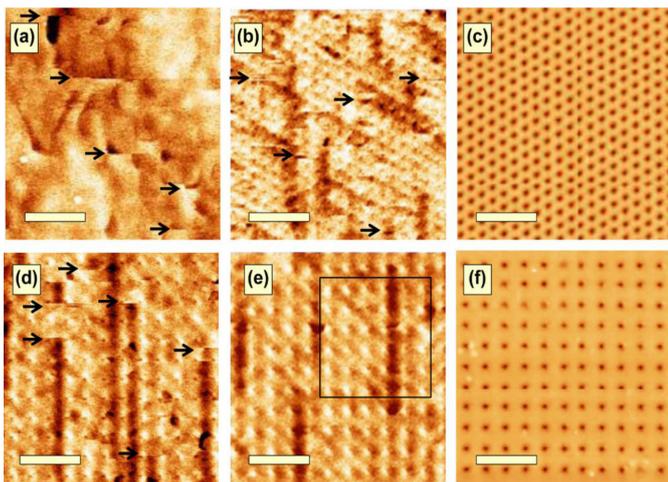
Curvas de histéresis obtenidas mediante un magnetómetro de efecto Kerr magneto-óptico para diferentes direcciones. (a) Lámina continua de cobalto (sin agujeros), (b) arreglo cuadrado y (c) arreglo hexagonal. En ambos casos la distancia de separación entre agujeros es de 250 nanómetros.

Figura 4: variación del campo coercitivo con respecto a la densidad volumétrica de defectos. Para el caso del arreglo cuadrados se aplicó el campo en dirección de los primeros vecinos (cuadrados azules sólidos) y de los segundos vecinos (cuadrados vacíos), al igual que para el caso de los arreglos hexagonales, en la dirección de primeros vecinos (triángulos verdes sólidos) y segundos vecinos (triángulos verdes vacíos).

### Observando los dominios magnéticos

Una de las mediciones que se pueden encontrar en la publicación original corresponde a una medición de microscopía de fuerza atómica (AFM) y una microscopía de fuerza magnética. En este tipo de microscopía, una punta, con un radio de curvatura de unas decenas de nanómetros va intentando tocar la muestra en su superficie y se acerca hasta sentir una interacción que se conoce como Van der Waals, esta punta está sostenida a un soporte plano, este soporte sufre una deflexión cada vez que la punta se acerca a la muestra (acorde a la ley de Hooke), esta deflexión se puede medir por varios métodos, uno es hacer incidir un láser sobre el soporte. Finalmente, se puede construir un mapa de la superficie de la muestra y podemos conocer su morfología. Esta fue la técnica que se utilizó en la figura 2.

Además, si la punta es magnética, y se levanta unas decenas de nanómetros sobre la superficie de la muestra, entonces la imagen que se construirá corresponderá a la magnetización en la superficie de la muestra. Así podemos observar cómo se distribuye la magnetización de la muestra debido a los defectos que hemos introducido. En la figura 5, se puede ver en (e) cómo es que se distribuye la magnetización, lo que en realidad observamos es la fuerza entre la punta magnética del microscopio y el campo magnético que emana de la muestra, esta fuerza es la divergencia de la magnetización. Si la magnetización diverge, entonces nos dice que está cambiando de sentido, por lo tanto, lo que observamos con gran contraste en la figura 5 (e) es una región en donde la magnetización apunta en dos direcciones opuestas, a esto se le llama: **una pared de dominio magnético**. Para realizar esta imagen, la punta magnética estaba levantada a una altura de 40 nanómetros desde la superficie de la muestra.



**FIGURA 5**

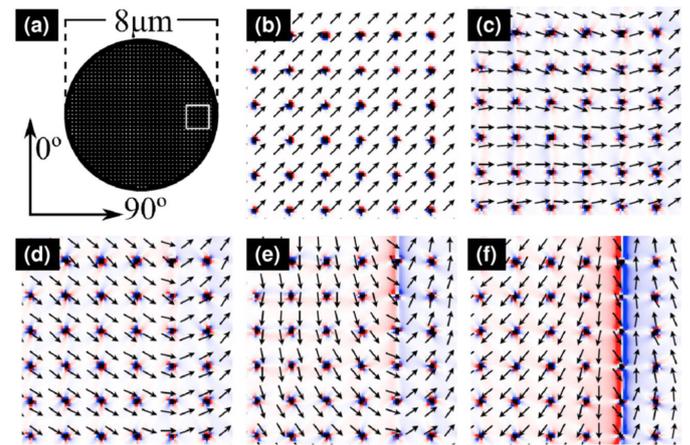
Imágenes de Microscopía de Fuerza Atómica (AFM) de un arreglo de antidots cuadrado (f) y hexagonal (c). Además, se realizó una medición de Microscopía de Fuerza Magnética, donde se observan paredes de dominio en la lámina continua (a), en un arreglo hexagonal con 200 nm de periodo y el campo aplicado a segundos vecinos (b), en un arreglo cuadrado de 300 nm de periodo con el campo aplicado a segundos vecinos (d) y a primeros vecinos (e).

Para entender como es la formación de estos dominios magnéticos, y cómo funcionan los agujeros (antidots) anclando la magnetización, y elevando la energía en su vecindad, hemos realizado simulaciones micromagnéticas. Para esto, resolveremos una ecuación conocida como la ecuación de Landau Lifschitz Gilbert, la cual no se puede resolver analíticamente (utilizando solo un lápiz y un papel, una manera coloquial de decirlo) para este tipo de geometría, si no que se debe resolver por medio de análisis numérico. Para esto utilizaremos un software llamado GPMagnet.

La ecuación que intentamos resolver es la siguiente:

$$\frac{\partial \mathbf{M}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = -\gamma \mathbf{M}(\mathbf{r}, t) \times \mathbf{H}_{eff}(\mathbf{r}, t) + \frac{\alpha}{M_s} \mathbf{M}(\mathbf{r}, t) \times \frac{\partial \mathbf{M}(\mathbf{r}, t)}{\partial t}$$

Esta ecuación determina la dinámica de la magnetización en un material. Donde  $M(\mathbf{r}, t)$  es la magnetización de cada átomo. La aproximación al continuo de la teoría micromagnética, nos permite tomar una región (supongamos cúbica, de un par de nanómetros de arista) donde la magnetización es constante y el cálculo se hace más rápido, o permite simular estructuras más grandes.  $H_{eff}$  es el campo efectivo, que es la suma de los campos que afectan al material (campo externo aplicado, campo desmagnetizante...),  $\gamma$  es el factor giromagnético de Einstein - de Hass, y  $\alpha$  es el amortiguamiento. Veamos un poco lo que significa este último término; Cuando a un momento magnético se le aplica un campo, este se intenta alinear en la dirección del campo aplicado, la rapidez con la que se alinee dependerá de una "viscosidad" de medio, por así decirlo, y se produce un amortiguamiento, que es característico de cada material.



**FIGURA 6**

Simulación micromagnética de un arreglo de antidots donde se puede observar en (a) la muestra completa, y luego un recuadro donde vemos la configuración de espines en el proceso de inversión magnética hasta formar una pared de dominio den (f). Los colores rojo y azul representan la divergencia de la magnetización.

Resolver esta ecuación nos permite construir imágenes de la magnetización del material como se observa en la figura 6. Hemos simulado una muestra de ocho mil nanómetros (ocho micrómetros) de ancho que contiene antidots como los que hemos sintetizado experimentalmente. En la figura 6 (f) podemos observar cómo se configura la magnetización cuando hay una pared de dominio, hemos simulado exactamente lo que hemos observado en la figura 5 (e). Los colores azul y rojo de las simulaciones en la figura 6 (f) corresponden a la divergencia de la magnetización, lo que representa la fuerza que siente la punta en el microscopio MFM.

Las paredes de dominio magnético son más importantes de lo que creemos, y las usamos más seguido de lo que imaginamos; éstas permiten la grabación magnética en antiguos cassettes, en actuales Compact Disks, DVD, Discos Duros he incluso sirven para procesar y almacenar datos en memorias MRAM.