

DIBUJANDO CON METALES A ESCALA NANOMÉTRICA

Atrapando la magnetización en sistemas de geometría pentagonal creados por la técnica de litografía de haz de electrones sobre un sustrato plano (Del artículo original de E.

Saavedra, J. Escrig, J. L. Palma; J. Magn. Mag. Mat 490 (2019) 165522)

Juan Luis Palma

Doctor en Ciencias con mención en Física

La tecnología avanza a pasos agigantados, tan grandes que las capacidades de procesamiento de información no serán suficientes el año 2035, y nos enfrentaremos al problema de cómo procesar la información que estamos generando y que estamos almacenando. Estos problemas los estamos dejando en manos de la computación neuromórfica o, por otro lado, lo dejamos en manos de la computación cuántica. Sólo el tiempo nos dirá cuál de estas metodologías será la correcta para el procesamiento, o quizás nos quedemos con la que primero aparezca. La computación neuromórfica se basa en hacer un procesador que sea tan parecido como un cerebro humano: que consuma poca energía, que tenga procesamientos del tipo neuronal, que tenga capacidad de autoaprendizaje (y no solo soluciones de programación como hasta ahora lo hacemos con los computadores). Pero esto, es tema para otro artículo. Hoy nos embarcamos en un viaje un poco más enfocado a como está funcionando nuestra tecnología y cómo podemos mejorarla explorando el mundo de la nanotecnología. Veremos como la técnica de la litografía nos acerca más, en cuanto a lo que se refiere a la técnica de síntesis de sistemas nanométricos, a la computación neuromórfica que

basa sus principios en los sistemas con memoria natural; como lo son los sistemas magnéticos.

Dentro de los sistemas magnéticos que se pueden estudiar, uno de los más llamativos son los hielos artificiales de espín. ¿Pero que significa este conjunto de palabras que parecen ser conocidos y que suena desconocido? Primero comencemos describiendo el “espín”, que es una cantidad física intrínseca del electrón, o por así decirlo, una cantidad intrínseca del átomo. Esta cantidad indica una dirección, algo así como una polaridad positiva y negativa: imaginemos una pila para llevarlo a un ejemplo más gráfico. Ahora pensemos en la palabra “hielo” que es un ordenamiento de moléculas de agua en una matriz rígida. (Al parecer estamos armando ya la frase completa: hielos artificiales de espín). Específicamente, en el hielo de agua la frustración del espín proviene del hecho de que un par de hidrógenos está más cerca un oxígeno que otro par de hidrógenos, obteniéndose una configuración de baja energía como un tetraedro. El término frustración, en física se refiere a la inhabilidad de satisfacer todas las interacciones en un sistema en particular, lo que nos lleva a encontrar es-

tados degenerados (varios estados con un mismo nivel de energía) para el punto de mínima energía del sistema, he incluso estados no nulos de entropía en el cero absoluto. Las propiedades del volumen macroscópico en cristales de hielos de espín muestran un comportamiento fascinante dependiente del campo magnético he incluso del comportamiento térmico. Estos efectos están relacionados con la frustración del espín [1-2]. El término de hielo de espín, aparece del descubrimiento de una frustración geométrica en la red cristalina de una tierra rara (policloruro) [1]. Pero estos sistemas presentan un inconveniente; no hay control sobre la red y la geometría del espín. Por esto, en el año 2006 nació la idea de replicar el comportamiento de las tierras raras por medio de la síntesis de sistemas artificiales de espín en arreglos bidimensionales [3]. Estos sistemas artificiales se crean dibujándolos a escala nanométrica, por medio de la técnica de litografía electrónica. Donde un nano-imán representa cada espín en el arreglo, y cada nano-imán corresponde a un elemento con una magnetización bien definida. Estos imanes actúan como un espín de Ising. La característica de cada nano-imán puede ser diseñada mediante la deposición del metal o mediante la forma usando las técnicas de litografía. Entonces, es posible diseñar la magnetización.

Un sistema artificial de espines corresponde a un metamaterial que consiste en un arreglo particular de nano-imanes. Estos sistemas se pueden obtener por medio de la técnica de litografía por haz de electrones, o también conocida como litografía electrónica.

Se nos viene entonces la pregunta a la cabeza: ¿Qué es la litografía?



Figura 1

Geometrías de Cairo, encontradas también en la cultura Árabe, Islámica.

La litografía es un proceso de impresión que consiste en trazar un dibujo en una piedra o plancha metálica, este dibujo una vez grabado en esta matriz dura, es posible estamparlo sobre un papel o telar. Hoy las técnicas de impresión han dejado casi en desuso esta técnica, salvo por la reproducción de obras artísticas. La palabra litografía proviene del griego 'lithos', piedra y 'graphe', dibujo.

Para este tipo de impresión se utiliza una piedra caliza pulimentada sobre la que se dibuja la imagen a imprimir (de forma invertida) con una materia grasa, bien sea mediante lápiz o pincel. Este proceso se basa en la incompatibilidad de la grasa y el agua. Una vez la piedra humedecida, la tinta de impresión solo queda retenida en las zonas dibujadas previamente.

Aunque este procedimiento fue extensamente usado con fines comerciales, la mayor parte de los grandes pintores de los siglos XIX y XX también lo emplearon ya que facilitaba obtener un cierto número de copias de un mismo trabajo: Picasso, Toulouse-Lautrec, Joan Miró, Piet Mondrian, Ramón Casas, Antoni Tàpies, Alphonse Mucha, Goya, Andy Warhol, etc.

Y, ¿Que ganamos si hacemos una plancha de litografía a escala nanométrica?

Como ya hemos comentado en números anteriores, pero nunca está de más recordarlo, la nanotecnología se basa en hacer que los elementos que forman una estructura, sean tan pequeños que se comparen con las longitudes características de algún efecto físico o químico, y así aparecen nuevos efectos que buscamos controlar. El efecto físico que se quiere presentar en este artículo es el magnetismo en la escala nanométrica. Lo que se nos viene a la cabeza cuando pensamos en material magnético es un imán, y este es un tipo de material magnético conocido como "ferromagnetos". Pero, todos los materiales son magnéticos (sí, todos), los ferromagnetos solo tienen una respuesta mayor cuando se les aplica un campo magnético. Podemos pensar en la materia como un todo compuesto por átomos, cada átomo se puede modelar como un pequeño imán que debe su magnetización al momento angular (sea orbital o de espín) de los electrones que contiene, y bueno... toda la materia tiene átomos. Existen materiales que tienen una res-

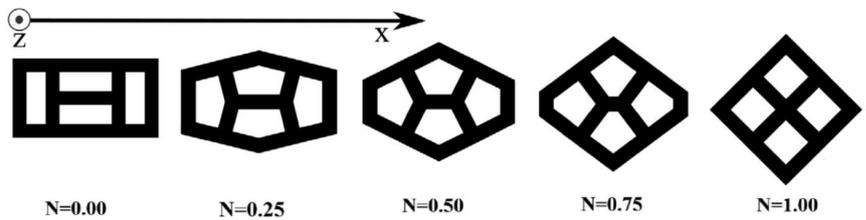


Figura 2

Celda unitaria para hielos de espín artificial. Llamamos $N=0$ a la celda del tipo shakti, y al introducir una deformación obtenemos arreglos pentagonales del tipo P4G ($N=0.25, 0.5, 0.75$) hasta llegar a una celda cuadrada $N=1$.

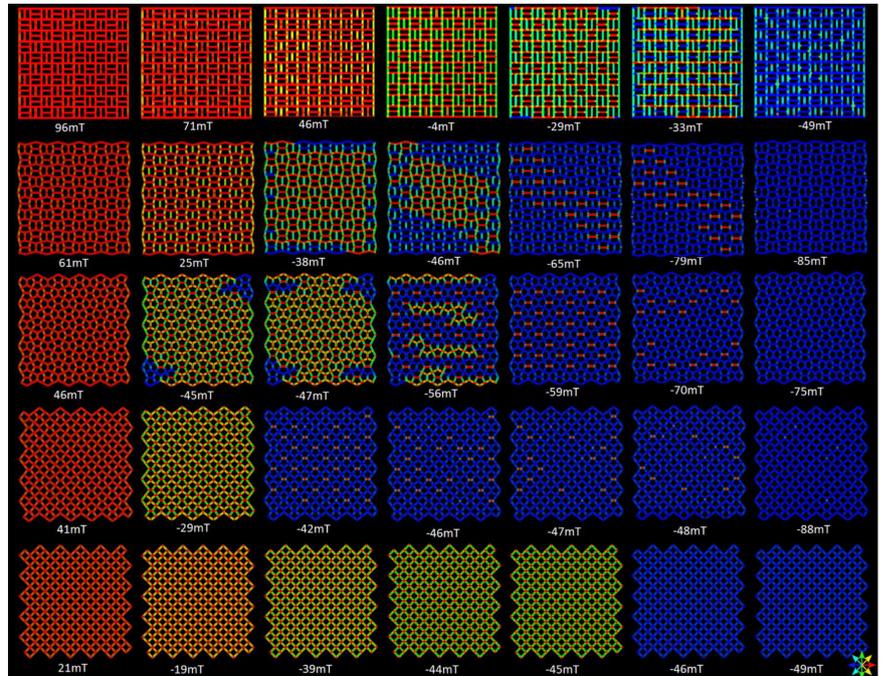


Figura 3

Capturas de pantalla para las distintas magnetizaciones de los arreglos.

puesta mucho menor y positiva frente a la aplicación de un campo magnético, estos materiales se conocen como paramagnéticos. Y existen materiales que tienen una respuesta muy débil y negativa frente a la aplicación de un campo magnético, y estos materiales se conocen como diamagnéticos. No queremos profundizar tanto, solo necesitamos saber que los materiales ferromagnéticos, que son simples imanes son los que nos sirven para las tecnologías que usamos día a día: como memo-

rias RAM, procesadores, CD's, cassettes, alarmas de supermercados, entre otras cosas...

Dentro de los materiales ferromagnéticos existen regiones donde todos los momentos magnéticos (pequeños imanes de los que se compone la materia) apuntan en la misma dirección, estas regiones se conocen como "dominios ferromagnéticos", entre estos dominios ferromagnéticos, existen zonas donde la magnetización cambia de una dirección a otra; y estas se conocen como "paredes de dominio". Estas regiones miden centenas de nanómetros, por lo que, si construimos algo que mida menos que este largo, la física de la magnetización en los materiales tendrá efectos mayores que podemos controlar.

En esta ocasión en particular se mostrará un sistema interconectado de elementos de ancho de 100 nm, los que están ordenados en una red pentagonal, conocida como red "Cairo" (sí, debido a que es el mismo ordenamiento que tienen las veredas en la ciudad del Cairo, como se ve en la figura 1). La red pentagonal de Cairo es interesante debido a que muestra una

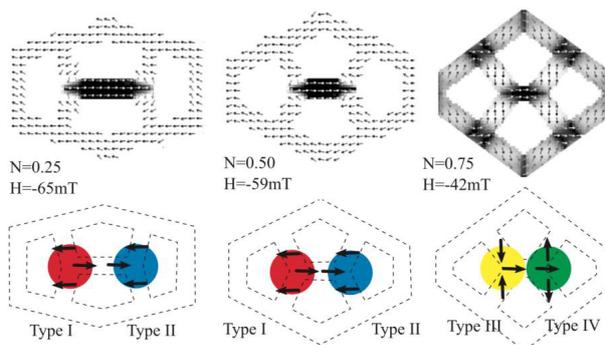


Figura 4

Configuración de la magnetización en cada celda unitaria que atrapa un dominio ferromagnético, para las redes pentagonales estudiadas.

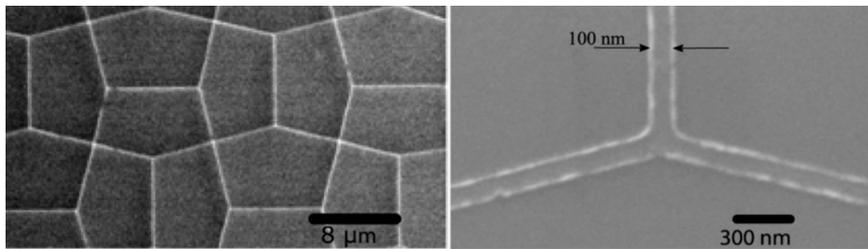


Figura 5

Sistema pentagonal Cairo creado por litografía de haz de electrones con 100 nm de ancho de línea.

fuerte frustración geométrica, que es posible observar en el compuesto $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_2$ [3]. El profesor Shechtman, premio Nobel de Química por descubrir los quasicristales (a quién tuve el agrado de conocer y de participar en una mesa de motivación para una decena de científicos jóvenes) pensaba que era imposible ordenar un arreglo de átomos y obedecer al mismo tiempo la simetría pentagonal. Hoy en día conocemos que existen ciertos grupos o familias de pentágonos que nos permiten llenar el espacio plano. Y además este tipo de simetría se puede encontrar en la naturaleza, por ejemplo, en la icosahedrita ($\text{Al}_{63}\text{Cu}_{24}\text{Fe}_{13}$) y en algunos complejos, además de ciertos modelos magnéticos (Ising) que ofrecen interesantes resultados [4,5].

En base a estos argumentos, quiero mostrar uno de los últimos estudios que se publicaron en la Escuela de Ingeniería de la Universidad Central de Chile, que se basa en los sistemas pentagonales obtenidos desde una red llamada Shakti interconectada, y se deforma de manera de obtener una red cuadrada (un interesante problema matemático que llevaremos al ámbito de la física experimental). Para entender estas redes mejor, observemos la figura 2 que muestra los arreglos que estudiaremos. Para ver el estudio original acudir a la referencia [6].

Se simuló numéricamente el comportamiento magnético en un arreglo matricial que contiene 10×10 elementos de los mostrados en la figura 2. Uno de los resultados más interesantes que se obtuvo es que cuando el sistema empezaba a revertir su magnetización de derecha a izquierda, existían ciertos puntos de equilibrio metaestable en donde los dominios ferromagnéticos quedaban atrapados, lo cual es un hecho muy importante para ser utilizado en nuevas tecnologías. Esto lo podemos ver en la figura 3, que muestra los sistemas simulados a distintos campos magnéticos externos aplicados. En el rincón derecho de abajo, se observa un mapa de colores de la dirección en la que apuntan los espines en el arreglo; por lo que cuando el arreglo muestra un color azul; los espines apuntan a la izquierda, y cuando el arreglo muestra un color rojo; los espines en esa zona apuntan a la de-

recha. Entonces, aquí si podemos ver que los arreglos pentagonales muestran cómo se atrapan dominios ferromagnéticos (en rojo) dentro de la red.

Los dominios quedan bien definidos, y se observa como apunta la magnetización en cada uno de los elementos que quedan atrapados. Podemos distinguir una red que tiene dominios antiferromagnéticos y otra que tiene configuración de dominios más perpendiculares entre sí, lo que, en conclusión, definiría la energía del arreglo. Esto se puede observar en la figura 4. El dominio ferromagnético queda atrapado en la red porque existe una configuración de energía igual y opuesta en cada uno de sus extremos.

La cantidad de dominios ferromagnéticos que se forman en cada red, depende únicamente del grado de deformación que le demos a la red, como se muestra en la figura 3. Además, los dominios anclados no aparecen de manera solitaria, ni desaparecen de manera solitaria, por lo que nos lleva a pensar que existe un comportamiento colectivo de la magnetización. Estos comportamientos colectivos son muy importantes para los dispositivos neuromórficos.

Estos sistemas fueron sintetizados para ser estudiados desde un punto de vista experimental. El método de síntesis corresponde a la litografía por haz de electrones, y el sistema se midió experimentalmente en un magnetómetro de efecto Kerr magneto-óptico (nanoMOKE). Los

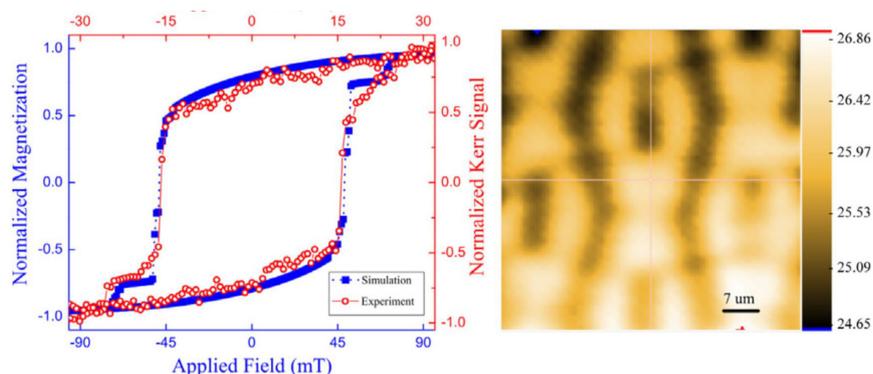


Figura 6

Comportamiento de la magnetización en el sistema experimental (curva roja) y en las simulaciones (curva azul). A la derecha se observa la señal óptica captada en el nanoMOKE.

resultados muestran que el comportamiento magnético observado en las simulaciones es el mismo que pudimos medir experimentalmente, por lo que este tipo de sistemas queda muy bien descrito por el micromagnetismo utilizado.

Más que una conclusión, los quiero dejar con una reflexión técnica, que nos muestra que los procesos litográficos, la arquitectura de películas delgadas y los sistemas magnéticos auto-ensamblados continúan avanzando por su interés en ciencias básicas y en nuevas tecnologías. Hoy en día se pueden crear arreglos de elementos magnéticos, en donde cada componente puede ser diseñado y sintetizado con una alta definición, en escalas micro y submicrométricas, llegando incluso a decenas de nanómetros. Una de las más fascinantes características de estos sistemas en particular, es tomar ventaja de la interacción entre elementos para crear nuevas funcionalidades para el arreglo completo. Las propiedades físicas de estos sistemas magnéticos difieren de las propiedades observadas para cada elemento aislado, ya que una dinámica colectiva aparece en el sistema. Este comportamiento colectivo juega un rol importante para gobernar las nuevas propiedades del arreglo, las cuales pueden ser determinadas por el diseño y se pueden activar mediante la aplicación de campos eléctricos y magnéticos.

Bibliografía

- [1] H.M. Harris. Phys. Rev. Lett., 1997. 79(2554).
- [2] Wang, R.F., et al., Nature, 2006. 439(7074): p. 303-6.
- [3] Z.V. Pchelkina, Phys. Rev. B 88 (2013) 054424.
- [4] V. Urummov, J. Phys. A: Math. Gen. 35 (2002) 7317–7321.
- [5] M. Rojas, Phys. Rev. E 86 (2012) 051116.
- [6] E. Saavedra, J. Magn. Mag. Mat 490 (2019) 165522