

## LÁMINAS DELGADAS MAGNETO-ÓPTICAS.

Domínguez-de-la-Vega. M., Aguinaco-Martín. A., Bakkali. H., Blanco-Oller. E., García-Domínguez. RP, González-Leal. JM, Litrán-Ramos. R., Manuel-Delgado. JM, Márquez-Navarro. EJ, Ramírez-del-Solar. M.  
Equipo de investigación Magnetismo y Óptica Aplicados Instituto IMEYMAT, Universidad de Cádiz.

El objetivo del proyecto es el desarrollo de un método de fabricación de láminas delgadas que presenten efecto magneto-óptico Faraday, basado en trabajos previos en los que se obtuvieron materiales masivos magneto-ópticos compuestos por matrices de sílice con nanopartículas (NPs) de maghemita embebidas. La principal dificultad al escalar la fabricación de estos materiales a las láminas delgadas radica en la limitación de la temperatura de tratamiento térmico que imponen los substratos de vidrio sobre los que las láminas se depositan ( $500^{\circ}\text{C}$ ), muy inferior a la que la síntesis de las NPs de maghemita requieren ( $700^{\circ}\text{C}$ ).

El Efecto Magneto-Óptico o rotación Faraday es un fenómeno descubierto en 1845 por Michael Faraday, que resulta de la interacción entre la luz y el campo magnético en un medio material. En concreto, el efecto Faraday provoca una rotación del plano de polarización de la luz proporcional a la componente del campo magnético en la dirección de propagación de la luz. El fenómeno aparece en la mayoría de los materiales dieléctricos transparentes, incluyendo vidrios e incluso líquidos. La relación entre el ángulo de rotación del plano de polarización de la luz ( $\beta$ ) y el campo magnético ( $B$ ) aplicado al material transparente (Fig. 1) es:

$$\beta = V \cdot d \cdot B \quad (1)$$

Siendo  $d$  el espesor del material atravesado por la luz polarizada y  $V$  una constante de proporcionalidad denominada constante de Verdet, característica de cada material.

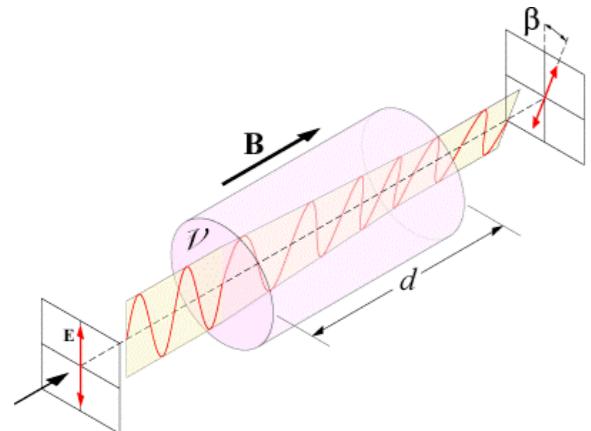


Figura 1. Esquema del Efecto Magneto-Óptico Faraday (MOFE).

La mayoría de los materiales magneto-ópticos existentes en el mercado son vidrios dopados o cristales como el Granate de Galio-Terbio (TGG), que presenta una constante de Verdet de unos  $134 \text{ rad/T}\cdot\text{m}$  a  $632 \text{ nm}$  y un buen comportamiento en las aplicaciones habituales de este tipo de materiales. No obstante, se siguen desarrollando nuevos materiales magneto-ópticos buscando mayores constantes de Verdet. Una de las líneas de investigación más activas en este sentido son los materiales compuestos con una matriz amorfa y transparente que contienen nanopartículas magnéticas em-

bebidas. En este caso, la matriz amorfa aporta la suficiente transparencia para permitir el paso de la luz, mientras que las NPs magnéticas son las que, al orientarse su momento magnético con el campo externo aplicado, interactúan con la luz polarizada, produciendo el efecto Faraday. En principio, la rotación Faraday en este caso no es proporcional al campo sino a la magnetización de las NPs. Sin embargo, al ser las NPs de pequeño tamaño ( $5-15 \text{ nm}$ ), son superparamagnéticas a temperatura ambiente, por lo que presentan coercitividad y remanencia magnéticas prácticamente nulas y una magnetización que varía linealmente con el campo, al menos a campos bajos. Así, para campos aplicados relativamente pequeños ( $<0.3 \text{ T}$ ), se puede considerar que la ecuación (1) sigue siendo válida.

Los materiales masivos compuestos por una matriz de sílice amorfa y NPs de maghemita, obtenidos con anterioridad, presentan constantes de Verdet entre  $1760$  y  $1950 \text{ rad/T}\cdot\text{m}$  a  $780 \text{ nm}$ , es decir, más de un orden de magnitud por encima de las presentadas por los cristales comerciales de TGG, con la ventaja de un coste de fabricación menor. El hecho de que, mediante técnicas sencillas de deposición, como la de inmersión (dip-coating), se puedan preparar láminas delgadas de estos materiales a partir de la vía sol-gel, los hace especialmente atractivos para la integración de los mismos en dispositivos miniaturizados para aplicaciones fotónicas. La imposibilidad de sintetizar las NPs *in situ* por la limitación de la temperatura de tratamiento impuesta por el substrato de vidrio, ha obligado a desarrollar un método de fabricación de láminas delgadas magneto-ópticas basado en el uso de NPs de magnetita previamente sintetizadas por un método clásico de co-precipitación, a partir de sales de  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{Fe}^{3+}$ , seguido de un recubrimiento con polietilenimina (PEI) para minimizar su aglomeración. Las NPs de magnetita así obtenidas tienen un tamaño medio de  $5 \text{ nm}$ . Para obtener las láminas magneto-ópticas se preparó un sol de sílice que se utiliza para, mediante recubrimiento por inmersión, obtener una capa de sílice sobre el substrato de vidrio de partida. Tras el secado de esta capa a  $150^{\circ}\text{C}$ , se realizaron varios recubrimientos también por inmersión en una suspensión acuosa ( $5 \text{ mg/ml}$ ) de NPs de magnetita con PEI, que quedaron depositadas sobre la lámina de sílice, como puede observarse en las imágenes de microscopía de fuerza atómica (AFM) de la Fig. 2. Tras cada inmersión en la suspensión de NPs, la lámina se trató a  $150^{\circ}\text{C}$  durante 10 min para eliminar el agua adsorbida. Se obtuvieron láminas con 2, 4 y 6 inmersiones en la suspensión de NPs, puesto que un mayor número de inmersiones deterioraba la calidad óptica de las láminas. Una vez realizada la deposición de éstas, se procedió a recubrir la lámina con una nueva capa de gel de sílice para sellar su superficie, y se trató finalmente a  $150^{\circ}\text{C}$  durante 2 h. Los espesores de las láminas se midieron mediante elipsometría, obteniendo valores que oscilan entre  $195$  y  $203 \text{ nm}$  (Tabla I).

Mediante un sistema de medida construido en nuestro laboratorio, se determinó la rotación Faraday en función del campo magnético aplicado de las diversas láminas prepara-

*“mediante un sistema de medida construido en nuestro laboratorio, se determinó la rotación Faraday en función del campo magnético aplicado de las diversas láminas preparadas”*

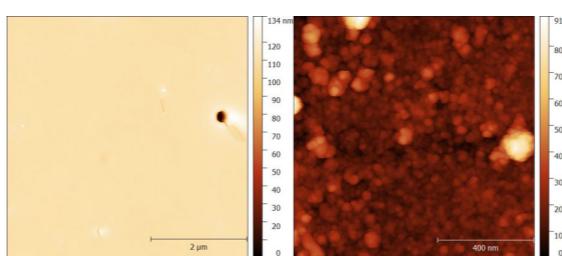


Figura 2. Imágenes de AFM de una lámina delgada de sílice obtenida por recubrimiento por inmersión (izquierda) y de la misma lámina después de haberse recubierto con NPs de magnetita/PEI (derecha).

Tabla I. Espesor de las láminas delgadas fabricadas (obtenido por elipsometría) y constantes de Verdet deducidas de los experimentos de rotación Faraday en función del campo magnético aplicado.

Muestra	Espesor	$V_v$ (rad/T·m)
$\text{SiO}_2 + 2$ inmersiones NPs	201nm	343,9
$\text{SiO}_2 + 4$ inmersiones NPs	203nm	356,1
$\text{SiO}_2 + 6$ inmersiones NPs	195nm	810,0

siendo el cociente  $\beta m/B$  la pendiente de la recta de ajuste de la rotación Faraday en función del campo magnético. A modo de ejemplo, en la Fig. 3 se presenta la respuesta magneto-óptica (lineal) de la lámina obtenida con 6 inmersiones en la suspensión de NPs, en el intervalo  $\pm 50 \text{ mT}$ . Como era de esperar la constante de Verdet aumenta al hacerlo el número de inmersiones en la suspensión de NPs, como se observa en la Tabla I, ya que el número de NPs depositadas aumenta con el número de inmersiones realizadas.

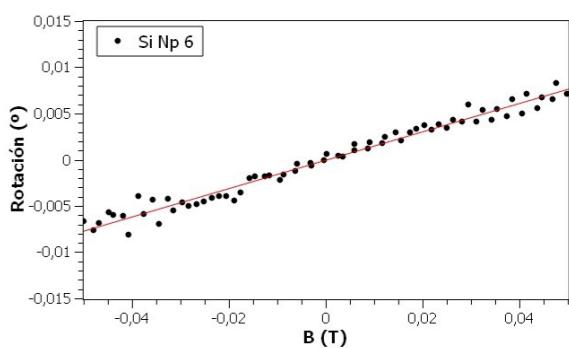


Figura 3. Respuesta magneto-óptica de una lámina delgada de sílice fabricada con 6 inmersiones en la suspensión de NPs de magnetita recubiertas de PEI.

En conclusión, se ha desarrollado un método de fabricación de láminas delgadas magneto-ópticas con estructura de tipo sandwich, empleando la vía sol-gel y la técnica de recubrimiento por inmersión. Estas láminas delgadas se componen de una capa de sílice que se recubre con NPs de magnetita/PEI y se sella con otra lámina de sílice. Se obtienen así láminas delgadas que muestran constantes de Verdet netamente superiores a las mostradas por los cristales comerciales de TGG. De esta manera, el efecto Faraday mejorado que presentan puede emplearse para construir dispositivos sensores del campo magnético y de la corriente eléctrica, así como dispositivos moduladores de la amplitud de la luz, como diodos y circuladores ópticos para sistemas fotónicos.



El Dr. Manuel Domínguez de la Vega se licenció en Química en 1985 por la Universidad de Cádiz. Tras este periodo trabajó en Saginaw/Delco y Tioxide en el departamento de I+D. A finales de 1991 regresó a la Universidad de Cádiz para retomar una Tesis Doctoral que defendió en 1993. En 1995 formó parte de Departamento del Física de la Universidad de Maryland donde se familiarizó con las técnicas y materiales que más usa en la actualidad. En 1997 tomó posesión como Profesor Titular de Universidad en la UCA, donde es responsable del grupo “Magnetismo y Óptica Aplicados”.