

# Resumen

Las películas delgadas de  $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$ <sup>1</sup> fabricadas por métodos de *sputtering* a temperatura ambiente se forman en una fase magnética relativamente blanda y químicamente desordenada. En esta fase, denominada A1, los átomos se encuentran distribuidos al azar en una estructura cristalina de simetría fcc. Este sistema presenta algunas características en su comportamiento magnético que lo hacen altamente interesante para un estudio de sus propiedades físicas básicas. Nuestras películas en particular presentan un espesor crítico por encima del cual la estructura de dominios magnéticos cambia de planar a un arreglo periódico de bandas o tiras, conocidas como "*stripes*", en las que existe una componente de la magnetización en la dirección normal al plano de la película que va alternando el sentido en distancias típicas de algunas decenas de nanómetros. Esta componente perpendicular es inducida por un término de la anisotropía magnética normal al plano la cual se debe a las contribuciones de efectos magnetoelásticos y magnetocristalinos.

En la primera parte de este trabajo presentamos los resultados obtenidos en una serie de películas delgadas de FePt con diferentes espesores ( $9 \leq d \leq 94$  nm) en las que se mantienen las mismas condiciones de fabricación. La transición en la estructura de dominios magnéticos es acompañada por cambios notables en la respuesta magnética de las películas. El espesor crítico en el cual se produce esta transición (en esta serie encontramos  $d_{\text{cr}} \sim 30$  nm) está dado principalmente por el cociente entre la anisotropía magnética perpendicular,  $K_{\perp}$ , y la energía desmagnetizante a través del factor de calidad  $Q = \frac{K_{\perp}}{2\pi M_s^2}$ . Por lo tanto, se espera que ocurran cambios en la configuración magnética si se modifica la anisotropía perpendicular o la magnetización de saturación,  $M_s$ . Debido a la diferencia entre los coeficientes de expansión térmica del sustrato de Si y la película de FePt y la dependencia de  $M_s$  con la temperatura,  $T$ , se predice una reducción de  $Q$  al disminuir  $T$ . Mostramos, a partir del análisis de los resultados de medidas magnéticas entre  $4 \text{ K} \leq T \leq 300 \text{ K}$  que, efectivamente, existe un máximo en el valor del campo coercitivo que puede ser asociado a la transición entre dominios cuya magnetización se encuentra esencialmente en el plano (dominios planares) y tipo *stripes*. Esta

---

<sup>1</sup>En adelante, a la composición equiatómica la llamaremos simplemente FePt.

transición no ocurre a una temperatura bien definida, sino que es gradual y depende del espesor de la película de forma consistente con un cambio en la anisotropía perpendicular inducido por tensiones en la interfaz. Tomando en consideración la variación de las tensiones y de la magnetización con la temperatura, desarrollamos un modelo que predice de forma satisfactoria el cambio del espesor crítico con la temperatura. Para comprender mejor los mecanismos de interacción dominantes en las distintas estructuras de dominios, realizamos un estudio del estado remanente a través de medidas de desmagnetización DC, viscosidad magnética y curvas  $\delta M$ . Encontramos que existe una fuerte correlación entre la estructura de dominios y el tipo de interacciones magnéticas presentes. Dominios planares son asociados con interacciones positivas, del tipo de intercambio, mientras que en dominios tipo *stripes* prevalecen las interacciones negativas del tipo dipolar. El comportamiento dinámico de esta serie también fue caracterizado usando espectroscopía de resonancia ferromagnética (FMR) en un rango amplio de frecuencias, desde 1 hasta 100 GHz. Como se espera, tanto el campo de resonancia como el ancho de línea aumentan junto con la frecuencia, mostrando anisotropía cuando el campo externo es aplicado en dirección paralela o perpendicular al plano. Con el objetivo de determinar el parámetro de amortiguamiento de la magnetización en función de la frecuencia de excitación, se analizó el ancho de línea en diferentes geometrías y encontramos un parámetro de amortiguamiento anisotrópico,  $\alpha_{\parallel} = 0.025(1)$  cuando el campo se aplica en dirección paralela al plano de la película y  $\alpha_{\perp} = 0.021(1)$  en el caso perpendicular.

En la segunda parte del trabajo, con el objetivo de analizar los efectos de las tensiones residuales en las propiedades magnéticas, depositamos una nueva serie de películas delgadas de FePt variando las condiciones de crecimiento. En este caso, se mantiene fijo el espesor nominal  $d \sim 100$  nm pero se fue modificando la presión de Ar ( $P_{Ar}$ ) dentro de la cámara de *sputtering* en el rango  $3 \leq P_{Ar} \leq 13$  mTorr. En esta serie realizamos una caracterización estructural cuidadosa, la cual nos permitió obtener información sobre el tamaño y microdeformaciones de los granos, texturas y la evolución de la deformación en las muestras. Variando las condiciones de fabricación es posible mantener la textura cristalina aproximadamente constante, pero relajar las tensiones. Encontramos que las películas depositadas a menor presión de argón se encuentran sometidas a tensiones de compresión biaxiales. Estas favorecen la componente de la anisotropía en la dirección normal al plano de la película que da origen a dominios magnéticos en forma de *stripes*. Por otro lado, para  $P_{Ar}$  mayores, las tensiones se relajan y la configuración magnética cambia a una estructura de dominios con la magnetización en el plano.

Si bien existen estudios en películas delgadas de FePt en función del espesor o de las tensiones residuales, no se había investigado hasta el momento la dependencia del espesor crítico con los efectos de tensiones inducidas. La posibilidad de modificar de

forma controlada la deformación en las muestras nos permitió estudiar con detalle la transición de dominios magnéticos en el plano a una estructura de *stripes* y su dependencia con estos parámetros. Partiendo de lo aprendido en la serie anterior, se fabricaron nuevas series de películas en las cuales no solo modificamos las condiciones de depósito, sino también el rango de espesores para cada presión de Ar. Además de realizar una caracterización microestructural detallada, investigamos la respuesta magnética por magnetización DC e imágenes de microscopía de fuerza magnética (MFM), a través de las cuales determinamos el espesor crítico en función de  $P_{Ar}$ . Correlacionamos estos resultados con la caracterización estructural, lo que nos permitió construir un diagrama de fases de dominios magnéticos, en el que se relaciona el espesor crítico en función de  $Q$ . La aplicación un modelo teórico que contempla las contribuciones de energía de intercambio, de forma, paredes de dominio y anisotropía perpendicular nos permitió ahondar en la comprensión de los resultados experimentales.

Finalmente, habiendo establecido los mecanismos que dan origen a la estructura de dominios en *stripes*, intentamos profundizar en las propiedades de este tipo de sistemas. La aleación  $Fe_{20}Ni_{80}$  (llamado Permalloy, o en su forma abreviada Py) también presenta dominios tipo *stripes* por encima de un cierto espesor crítico  $d_{cr}$ , originados por una componente de la anisotropía magnética perpendicular al plano. A pesar de esta similitud, algunas propiedades del Py, como el valor del espesor crítico y el período de los *stripes*, son significativamente más grandes que en FePt. Estas diferencias hacen que sea de interés investigar el comportamiento magnético en bicapas FePt/Py con espesores menores y mayores a  $d_{cr}$ . Para realizar este estudio se crecieron dos series de bicapas en las que se mantuvo fijo el espesor de una de las aleaciones mientras se variaba la restante. También se tuvo en consideración el orden en que se crecen las películas por lo cual fabricamos bicapas en las que el FePt es crecido por encima o por debajo del Py. A través de mediciones de microscopía MFM encontramos una única estructura de dominios en forma de *stripes*, aunque para algunas combinaciones de espesores hallamos una configuración de dos estructuras de *stripes* acoplados aproximadamente  $45^\circ$ . Experiencias de magnetometría de muestra vibrante y por efecto Kerr magneto-óptico nos permitieron separar el comportamiento magnético de la capa superior (la longitud de penetración en un experimento por efecto Kerr magneto-óptico es de  $\sim 10 - 20$  nm) de la muestra. En general, encontramos un comportamiento singular, con un fuerte acople de intercambio cerca de la interfaz, pero no lo suficiente como para que los *stripes* en ambas capas roten y saturen en forma conjunta.

En síntesis, en el transcurso de esta tesis hemos caracterizado la transición en la estructura de dominios magnéticos y su dependencia con la anisotropía perpendicular a través del factor de calidad  $Q$ . A partir de los distintos estudios en películas delgadas de FePt, hemos sido capaces de modificar el espesor crítico en el cual ocurre

esta transición magnética de forma controlada, ya sea a través de la modificación de las condiciones de depósito, de la variación de la temperatura o incluso mediante el acople con una capa (Py) con características magnéticas similares.

**Palabras clave:** FePt, películas delgadas, ferromagnetismo, anisotropía magnética, interacciones magnéticas, constante de amortiguamiento, tensiones residuales, dominios magnéticos tipo *stripes*, espesor crítico.