

# Efecto de la temperatura en la resonancia ferromagnética del Ni<sub>50</sub>Fe<sub>50</sub>/Si(001)

M. Díaz de Sihues<sup>a</sup>, P.J. Silva<sup>b</sup>, J.R. Fermín<sup>a,\*</sup>,

A. Azevedo C.<sup>c</sup>, S.M. Rezende<sup>c</sup> y F.M. De Aguiar<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad del Zulia,

Apartado Postal 526, Maracaibo 4001, Zulia, Venezuela,

<sup>b</sup> Laboratorio de Física de Materia Condensada, Centro de Física,  
Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC), Venezuela

<sup>c</sup> Departamento de Física, Universidade Federal de Pernambuco,  
Recife, Brasil

Recibido el 24 de noviembre de 2003; aceptado el 12 de octubre de 2004

We report the effect of temperature on the ferromagnetic resonance (FMR) spectra of Ni<sub>50</sub>Fe<sub>50</sub> thin films sputtered on Si (001) wafers. The FMR field and linewidth were studied as a function of the ferromagnetic layer thickness,  $t$ , and the temperature,  $T$ . The data are interpreted in the framework of a phenomenological model that includes in- and out-of- the plane uniaxial anisotropy fields. The main effect of temperature on the magnetic properties of these films is to induce a surface anisotropy with an out-of- the plane uniaxial axis. The resonance field as a function of temperature, shows three different regimes, with two transition temperatures. Also, the temperature effects on the FMR spectra of these films are connected with the temperature variations of the surface anisotropy. A new magnetic transition is observed in thinner films at low temperatures.

**Keywords:** Ferromagnetic thin films; magnetic anisotropies; interface and surface effects.

Reportamos el efecto de la temperatura en el espectro de la resonancia ferromagnética (FMR) en películas de Ni<sub>50</sub>Fe<sub>50</sub> depositadas sobre el substrato de Si(001). El campo de FMR y el ancho de línea fueron estudiados como una función del espesor de la película ferromagnética,  $t$ , y de la temperatura,  $T$ . Los datos son interpretados con un modelo fenomenológico que incluye campos de anisotropía uniaxial en el plano y fuera del plano. El principal efecto de la temperatura es inducir una anisotropía de superficie que produce un eje uniaxial fuera del plano. El campo de resonancia presenta tres regímenes de temperatura diferentes, con dos temperaturas de transición. El efecto de la temperatura sobre los espectros de FMR se explica en términos de las variaciones de la anisotropía de superficie con la temperatura. Una nueva transición de orden ferromagnético se observa a baja temperatura en la películas más delgadas.

**Descriptores:** Películas delgadas ferromagnéticas; anisotropías magnéticas; efectos de interfase y superficie.

PACS: 76.50.tg; 75.70.Ak; 75.30Gw

## 1. Introducción

Las películas delgadas ferromagnéticas presentan gran interés debido a que poseen propiedades magnéticas diferentes a los materiales masivos. La atención a estos materiales magnéticos aumenta debido a que son candidatos para la fabricación de dispositivos micro-electrónicos, tales como sensores magnéticos, cabezales de grabación magnética, etc. [1]. Una de las técnicas experimentales más utilizadas en el estudio de las propiedades magnéticas de películas delgadas y ultra-delgadas es la resonancia ferromagnética (FMR) [2], o más precisamente, la absorción resonante de radiación electromagnética.

Debido a su alta sensibilidad, el campo de resonancia,  $H_R$ , y el ancho de línea de FMR,  $\Delta H$ , son parámetros útiles en la determinación de los campos de anisotropía y los procesos de relajación en películas delgadas magnéticas. En este trabajo se estudia el efecto de la temperatura en el espectro de FMR de películas delgadas de Ni<sub>50</sub>Fe<sub>50</sub>. Los datos experimentales son interpretados mediante un modelo fenomenológico que involucra el campo de anisotropía uniaxial y de superficie.

## 2. Técnica experimental

En este estudio investigamos el efecto de la temperatura en las propiedades magnéticas de películas delgadas de Ni<sub>50</sub>Fe<sub>50</sub> usando la técnica de resonancia ferromagnética (FMR). El campo magnético es aplicado paralelo al plano de la película. La muestra es colocada en un goniómetro que permite girar el plano de la misma con respecto a la dirección del campo. Se obtiene el campo de resonancia,  $H_R$ , y ancho de línea pico a pico,  $\Delta H$  como funciones del ángulo del campo en el plano, de la temperatura y del espesor de la película,  $t_{FeN}$ . Los espectros de FMR fueron tomados a una frecuencia de 9.35 GHz y en el rango de temperaturas  $4K < T < 300K$ . Las películas policristalinas de Ni<sub>50</sub>Fe<sub>50</sub> fueron fabricadas por evaporación catódica asistida por magnetos sobre substratos comerciales de Si, cortados en la dirección perpendicular al plano (100). Se obtuvieron muestras con espesores en el intervalo de 63 Å a 147 Å.

## 3. Discusión y análisis

Los datos experimentales fueron interpretados con un modelo fenomenológico que involucra las anisotropías uniaxial en el plano y fuera del plano, considerando la energía magnética

TABLA I. Datos experimentales de FMR obtenidos a partir de los ajustes numéricos para las películas delgadas de Ni<sub>50</sub>Fe<sub>50</sub>.

Espesor t(Å)	T = 299°K		T = 82°K	
	2Ku/M (KOe)	4πM <sub>eff</sub> (KOe)	2Ku/M (KOe)	4πM <sub>eff</sub> (KOe)
63	0.009	11.38	0.0073	12.30
83	0.007	11.32	0.010	12.17
105	0.009	10.97	0.014	12.00
126	0.014	10.82	0.02	12.05
147	0.005	10.63	0.007	11.50

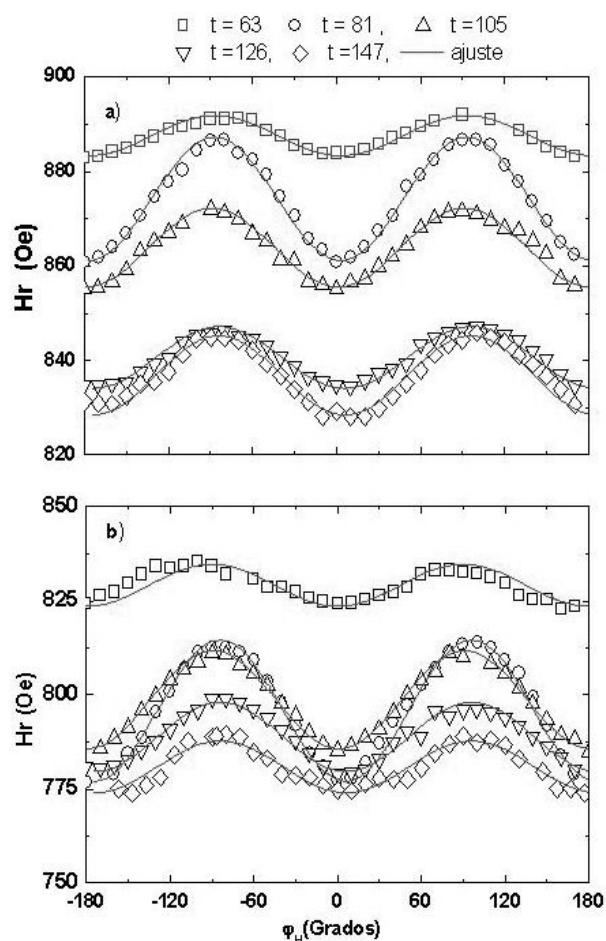


FIGURA 1. HR vs ϕ<sub>H</sub> para diferentes espesores de la película de Ni<sub>50</sub>Fe<sub>50</sub>/Si(001) para: a) T = 299°K y b) T = 82°K.

libre [3],

$$E = -HM \sin \theta \cos(\phi - \phi_H) + 2M_{eff}^2 \cos^2 \theta + K_u \sin^2(\phi - \phi_u), \quad (1)$$

donde el primer término representa la energía Zeeman, el segundo término es la energía de desmagnetización y el tercer término es la energía de anisotropía uniaxial en el plano; H es el campo externo, M la magnetización de saturación;

4πM<sub>eff</sub> = 4πM - 2K<sub>N</sub>/M, K<sub>u</sub> es la constante de anisotropía uniaxial, θ y φ son los ángulos de M con relación a la normal al plano y a la dirección del campo uniaxial, respectivamente, φ<sub>H</sub> es el ángulo del campo aplicado en el plano, y φ<sub>u</sub> determina la dirección del eje uniaxial. La frecuencia de FMR se expresa en términos de la segunda derivada de la energía libre magnética [4]

$$\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 = \frac{1}{M^2 \sin^2 \theta} \left[ \frac{\partial^2 E}{\partial \theta^2} \frac{\partial^2 E}{\partial \phi^2} - \left( \frac{\partial^2 E}{\partial \theta \partial \phi} \right)^2 \right]_{\theta_0 \phi_0}, \quad (2)$$

donde ω es la frecuencia angular, γ (=2.94GHz/KOe) es el radio giro-magnético, θ<sub>0</sub> y φ<sub>0</sub> son las posiciones de equilibrio de la magnetización obtenidas de la minimización de la energía. En la Fig. 1 se muestra la dependencia angular de H<sub>R</sub>, para diferentes espesores de la película de Ni<sub>50</sub>Fe<sub>50</sub>, a T = 299°K y T = 82°K. El efecto del espesor en estas películas es claramente observable. A medida que el espesor decrece H<sub>R</sub> se incrementa, exhibiendo simetría uniaxial en el plano. La línea sólida de la Fig. 1 es un ajuste numérico obtenido mediante la Ec. (2), para cada posición de equilibrio de la magnetización. En la Tabla I se presenta una lista de los parámetros obtenidos de este ajuste. El valor de 2K<sub>u</sub>/M no presenta variaciones apreciables a temperatura ambiente. Sin embargo, a temperatura T ≈ 82K y espesores menores de ~ 80 Å, se observa un incremento sustancial en el campo de anisotropía uniaxial. La magnetización efectiva, 4πM<sub>eff</sub>, también refleja una variación con respecto a su valor volumétrico al disminuir la temperatura y el espesor de la película. De acuerdo con la definición 4πM<sub>eff</sub> = 4πM - 2K<sub>N</sub>/M, esto es debido a que las variaciones de temperatura y espesor pueden inducir una anisotropía de superficie H<sub>S</sub> = K<sub>N</sub>/M = K<sub>S</sub>/Mt.

Los datos experimentales para cada una de las muestras del campo de resonancia y del ancho de línea a temperatura ambiente y nitrógeno se promedian sobre el ángulo del campo en el plano, φ<sub>H</sub>. En la Fig. 2 se observa que en el rango de espesores en estudio, el campo de resonancia y el ancho de línea se mantienen casi constantes con un leve crecimiento a medida que disminuye el espesor de la película. Sin embargo, a T ≈ 80 K, ΔH<sub>PP</sub> muestra un incremento de ~ 20 Oe en este rango de espesores. Las líneas sólidas en la Fig. 2 representan el ancho de línea calculado a partir de la expresión [5]

$$\Delta H_{PP} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{16SH_S}{\pi D} \frac{H_0^{1/2}}{(H_0 + 4\pi M + H_S)^{1/2}} \quad (3)$$

donde D es la constante intercambio, S es un factor geométrico característico de la rugosidad de la superficie, H<sub>S</sub> es el campo de anisotropía superficial, y H<sub>0</sub> es el respectivo campo de resonancia. En la Tabla II se muestra los parámetros obtenidos con este modelo y se comparan con los reportados en la Ref. 5 para dos frecuencias diferentes.

TABLA II. Comparación de los datos obtenidos a diferentes frecuencias.

T(°K)	Frecuencia (GHz)	$4\pi M(KG)$	D(Oe-cm $^2$ )	S(Å $^2$ )
Ambiente [5]	10.83	13.2 (KG)	$2.0 \times 10^{-9}$	16.0
	8.53			
Ambiente	9.30	11.9 (KG)	$1.6 \times 10^{-9}$	16.0
Nitrógeno	9.30	12.8 (KG)	$3.11 \times 10^{-9}$	15.9

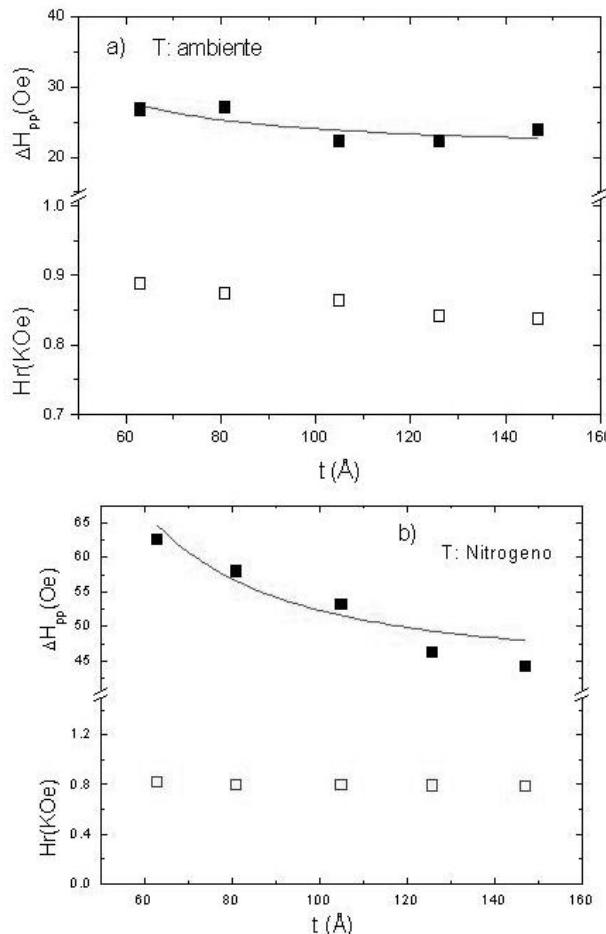
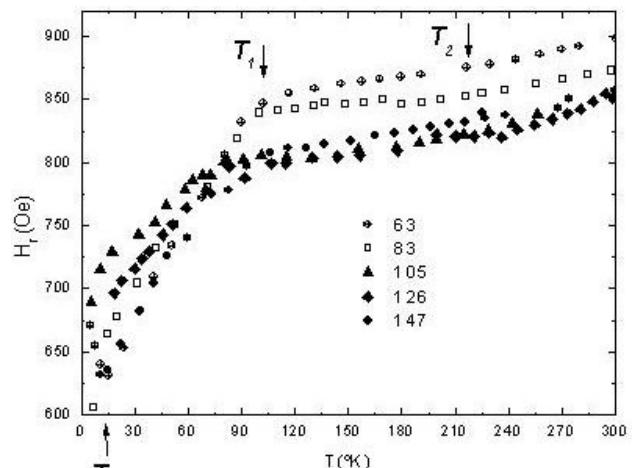


FIGURA 2. Dependencia con espesor del promedio del campo de resonancia y ancho de línea FMR en el plano, en películas delgadas de  $NI_{50}FE_{50}(t)/SI(100)$  medidas con una frecuencia de 9.35 GHz, a temperatura: a) ambiente y b) nitrógeno.

La variación del campo de resonancia con respecto a la temperatura se muestra en la Fig. 3, para  $H_R$  medido en la posición  $\phi_H = 90^\circ$  con relación al eje uniaxial. Se observan tres regímenes diferentes: (a) régimen de bajas temperaturas ( $0 < T < T_1$ ), con un aumento aproximadamente lineal hasta la temperatura crítica,  $T_1$ ; (b) régimen de temperaturas intermedias ( $T_1 < T < T_2$ ), donde  $H_R$  se mantiene casi constante; (c) temperaturas altas ( $T > T_2$ ), donde  $H_R$  muestra un cambio de pendiente y su valor vuelve a aumentar.



tar. Ambas  $T_1$  y  $T_2$  son funciones del espesor y determinan transiciones de orden ferromagnético, debidas posiblemente a la rotación coherente de dominios en el material. En películas suficientemente delgadas  $t \leq 60\text{\AA}$  (círculos  $\oplus$ ) se puede apreciar otra estructura en el campo de resonancia de FMR a temperaturas cercanas a  $T_3 \cong 14K$ . En las demás películas no se observó esta característica, que puede estar asociada con otra transición de orden ferromagnético. Este efecto no ha sido reportado previamente en estos sistemas y requiere de más estudios experimentales y teóricos.

#### 4. Conclusiones

Las películas delgadas de  $NI_{50}FE_{50}$  depositadas sobre substratos de  $Si$  (001) fueron caracterizadas mediante la técnica de la resonancia ferromagnética con el campo aplicado paralelo al plano de las películas. El campo de resonancia como función del ángulo del campo en el plano, exhibe simetría uniaxial en todas las muestras con un ligero corrimiento hacia valores menores a medida que disminuye la temperatura. Este comportamiento está asociado con las variaciones térmicas de la magnetización en el plano, lo que a su vez induce una disminución en la anisotropía de superficie. En las muestras más delgadas y a temperaturas muy bajas puede apreciarse un aumento inesperado del campo de resonancia, indicativo de una disminución en la componente de la magnetización en el plano y un incremento en la anisotropía de superficie.

#### Agradecimientos

Los autores MDS, PJS y JRF agradecen a la División de Investigación FEC-LUZ y CONDES-LUZ por el financiamiento otorgado a este proyecto. AAC, SMR y FMA desean agradecer a FINEP y FACEPE (Brasil) por la ayuda financiera durante la realización de este trabajo.

- 
- \*. Autor para la correspondencia: fermin@luz.ve
  - 1. M.A. Howson, *Contemp. Phys.* **35** (1994) 347.
  - 2. B. Heinrich y J.F. Cochran, *Adv. Phys.* **42** (1993) 523.
  - 3. J.R. Fermin, A. Azevedo, F.M. de Aguilar, F.L.A. Machado y S.M. Resende, *J. Magn. Magn. Mater.* **226-230** (2001) 1621.
  - 4. H. Suhl, *Phys. Rev.* **97** (1955) 555.
  - 5. A. Azevedo, A.B. Oliveira, F.M. De Aguiar y S.M. Resende, *Phys. Rev B* **62** (2000) 1.