

EFFECTO KERR MAGNETO ÓPTICO DE SUPERFICIE EN PELÍCULAS DELGADAS DE PERMALLOY ($\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$)

SURFACE MAGNETO OPTICAL KERR EFFECT IN PERMALLOY'S THIN FILM ($\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$)

Abel Gutarra¹, Elmer Monteblanco², Luis Avilés³

RESUMEN

Se construyó un magnetómetro de efecto Kerr superficial (MEKS) para medir las propiedades magnéticas de películas delgadas de Permalloy ($\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$) de 20 nm de espesor. Se encontró que el campo coercitivo de las muestras tiene valores entre 2-6 Oe. Las películas mostraron anisotropía uniaxial en el plano y se identificaron los ejes de fácil y difícil magnetización. Se midió el ángulo de Kerr para las configuraciones longitudinal y polar y la saturación magnética para diferentes ángulos de incidencia de haz de luz. Los resultados fueron comparados satisfactoriamente con los obtenidos con un Magnetómetro de Muestra Vibrante (MMV).

Palabras clave.- MEKS, Permalloy, Anisotropía uniaxial, Curva de histéresis, Efecto Kerr, Películas delgadas, Laser, Polarización elíptica, Magneto óptica.

ABSTRACT

A Surface magnetic optic Kerr effect (SMOKE) magnetometer was implemented in order to measure the magnetic properties of 20 nm thickness Permalloy ($\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$) thin films. It was found a coercitive field range from 2 to 6 Oe. The films shown uniaxial anisotropy in plane, as a consequence, easy and difficult axis were identified. Kerr angle were measured for longitudinal and polar configuration and magnetic saturation for different light incidence angles were found. These results were successfully compared with those obtained by using a Vibrating Sample Magnetometer (VSM).

Key words.- SMOKE, Permalloy, Uniaxial anisotropy, Hysteresis loops, Kerr effect, Thin films, Elliptic polarization, Magneto optics.

INTRODUCCIÓN

En noviembre de 2007 Albert Fert y Peter Grunberg recibieron el Premio Nobel de Física por el descubrimiento de la Magneto Resistencia Gigante (MRG). Este comportamiento peculiar se presenta en estructuras laminares de multicapas muy delgadas y ha permitido incrementar notablemente la capacidad de almacenamiento de información en los discos duros de los sistemas de cómputo y en

la creciente variedad de dispositivos electrónicos de uso masivo.

En el año 1994 empezaron a desarrollarse dispositivos comerciales basados en MRG, desde entonces no ha cesado la investigación en nuevos materiales y en la tecnología para la obtención y caracterización de películas delgadas magnéticas de dimensiones nanométricas.

¹Dr., docente investigador de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería, ²Master en Ciencias con mención en Física y Tesista de la maestría en física de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería, ³Estudiante del 8vo. Ciclo en Física de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Una de las técnicas de interés creciente para el análisis de muestras ferromagnéticas delgadas está basada en el efecto descrito por J. Kerr [1], el cual consiste en el cambio de polarización de la luz reflejada en una superficie magnetizada. La magnitud de la rotación del vector de polarización de la luz incidente es proporcional a la magnetización M de la muestra [2]. Mediante esta técnica óptica se pueden estudiar las propiedades magnéticas de películas delgadas tales como las curvas de histéresis (directamente relacionadas con la capacidad de almacenamiento de información) así como la dependencia de estas propiedades con la dirección relativa entre campo aplicado y superficie conocida como anisotropía. La caracterización de materiales magnéticos utilizando el efecto Kerr magneto óptico, ha evolucionado en los últimos 10 años al punto que hoy se lo utiliza para el estudio de nanoestructuras, como por ejemplo la propagación de dominios magnéticos en las paredes de nanotubos [3].

En este trabajo se estudian las propiedades de películas delgadas de permalloy (Py), de composición $\text{Ni}_x\text{Fe}_{100-x}$ con $78 < x < 82$, las cuales son consideradas como el prototipo de materiales magnéticos blandos y representan el sistema ideal para la investigación básica. El permalloy más estudiado es el que tiene un índice de dopaje $x = 82$, y es fácilmente magnetizable. Por esta razón se la eligió como una muestra confiable para ponderar la capacidad del magnetómetro construido.

EFFECTO KERR MAGNETO ÓPTICO (MOKE)

Partiendo de las ecuaciones de Maxwell para un medio dieléctrico se puede definir el tensor dieléctrico de la siguiente forma.

$$\hat{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Para una estructura cristalina cúbica solo existirán elementos en la diagonal de esta matriz y si el material fuera isotrópico tendrían el mismo valor. El efecto de la aplicación de un campo magnético externo puede considerarse que causa una variación de los elementos de matriz del tensor dieléctrico. Matemáticamente se puede escribir.

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^0 + \Delta\epsilon_{ij}(\overline{M}), \quad (2)$$

donde \overline{M} es la magnetización del material.

Aplicando propiedades matriciales y el criterio de reversibilidad temporal de la respuesta al campo [Landau], se demuestra que el tensor dieléctrico toma la siguiente forma [E. Monteblanco, Fac. de Ciencias-UNI, 2007. Tesis de Licenciatura].

$$\hat{\epsilon}(M) = \begin{pmatrix} \epsilon^0 + G_{12}M^2 & KM & 0 \\ -KM & \epsilon^0 + G_{12}M^2 & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon^0 + G_{11}M^2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

en donde se observa que las componentes de la diagonal dependen del cuadrado de la magnetización y aparecen dos nuevos términos fuera de la diagonal, diferentes de cero, es decir, el efecto del campo magnético sobre el material es producirle anisotropía óptica.

La luz linealmente polarizada incidente al material es reflejada y transmitida con polarizada elíptica.

El ángulo de rotación para el caso de luz transmitida es conocido como el ángulo de Faraday θ_F , mientras que el correspondiente a la reflexión se conoce como ángulo de Kerr θ_K , ambos son proporcionales a la magnetización M .

$$\theta_F \approx -\frac{k_o}{(n'_+ + n'_-)} \frac{K''M}{(n'_+ + n'_-)} \quad (4)$$

$$\theta_K \approx -\frac{K'M}{(\epsilon_{xx} - 1)\sqrt{\epsilon_{xx}}} \quad (5)$$

Las constantes K y G del tensor dieléctrico son conocidas como componentes del vector de Voigt y son complejas [4]. Las comillas indican la parte real ('') y la parte compleja (') de dichas constantes. Las constante n'_+ y n'_- representan la parte real del índice de refracción en los estados de polarización que corresponden a una polarización circular a la derecha (+) y a la izquierda (-).

CONSTRUCCIÓN DEL MAGNETÓMETRO DE EFECTO KERR DE SUPERFICIE (MEKS)

Los componentes ópticos y electrónicos utilizados en el montaje de un magnetómetro para la medición

del efecto Kerr magnetoóptico de superficie, se muestran a continuación en la Figura 1.

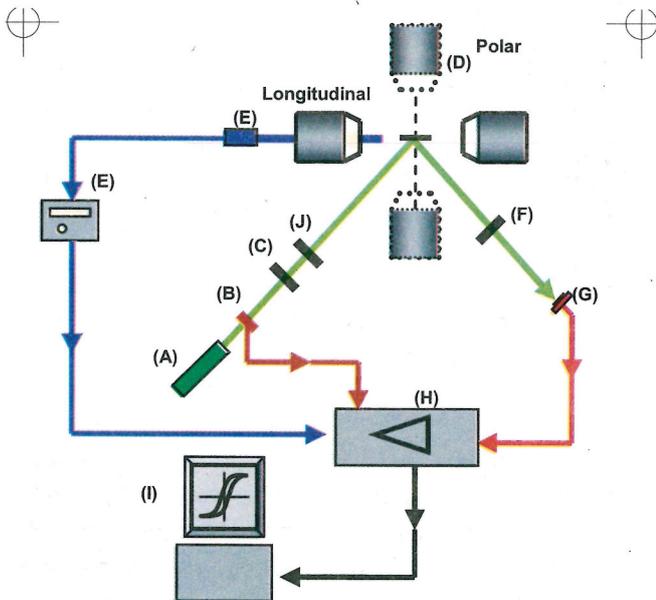


Fig.1 Montaje del MEKS.

- a) Láser, b) Chopper, c) Polarizador, d) Electro magneto, e) Teslámetro, f) Analizador, g) Detector, h) Lock-in, i) Interfase, j) Pupila.

Se utilizó un láser de 532 nm, cuyo haz de luz atraviesa un chopper de frecuencias entre 190 y 220 Hz, como referencia para el amplificador lock-in. La señal pulsada atraviesa un polarizador lineal llegando a la muestra, colocada entre las bobinas de un electro magneto de hasta 600 Oe. La luz reflejada elípticamente polarizada atraviesa un analizador, para luego llegar al detector conectado también al amplificador lock-in. Con la PC se realiza el control del amplificador y la adquisición de datos. Entre las bobinas del electro magneto se coloca una sonda Hall, con la cual medimos el campo magnético aplicado a la muestra. El sistema de adquisición de datos permite obtener las curvas de voltaje producido por la intensidad de luz que llega al detector versus el campo magnético aplicado. Según la ecuación (5), el cambio en la intensidad de luz que llegue al detector dependerá del campo magnético externo, es por ello que cuando la muestra quede totalmente magnetizada, es decir saturada, el voltaje de saturación medido será constante. En las mediciones se obtendrán dos valores para este voltaje de saturación, dependiendo del sentido de

aplicación del campo magnético. En la Figura 2 se aprecia las tres configuraciones del magnetómetro MOKE, las cuales dependen de la dirección en la que se aplica el campo magnético.

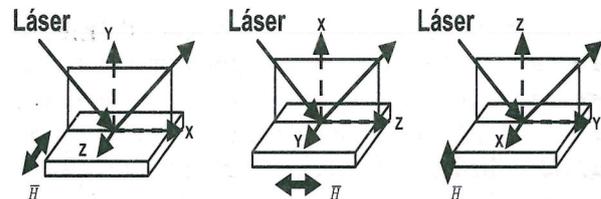


Fig. 2 Configuraciones del MEKS Transversal, Longitudinal y Polar.

Una vez obtenidas las curvas se utilizó la siguiente relación para obtener el ángulo de Kerr.

$$\frac{\Delta I}{I} \approx \frac{4\theta_K}{\tan(\phi)}, \quad (6)$$

donde ϕ es el ángulo que forma el eje del analizador con el eje horizontal del sistema coordinado en el laboratorio, I es el voltaje promedio entre los dos valores de voltaje de saturación, ΔI es la diferencia entre dichos valores de voltaje [E. montebalanco, Fac. de Ciencias-UNI, 2007. Tesis de Licenciatura].

Anisotropía de forma y uniaxial

La importancia de analizar la anisotropía del material radica en que permite conocer las direcciones, para las cuales es fácil o difícil magnetizarlo hasta la saturación. En materiales magnéticos se produce un campo de desmagnetización proporcional a la magnetización M . La proporcionalidad se determina por un tensor, llamado factor desmagnetizante, cuyo valor depende de la forma del material, y en películas delgadas es muy grande en la dirección perpendicular a la superficie y, casi nulo en el plano de la película. Dentro del plano, también es usual encontrar direcciones de fácil magnetización. El origen de este tipo de anisotropías ha sido reportado ampliamente, pero, aunque todavía hay discusiones al respecto [3], se conocen algunos factores, como tensiones con el sustrato, aplicaciones de campo magnético al momento de la deposición [5 y 6], incidencia oblicua al momento de la deposición de la muestra

[7 y 8] y por la forma del material. Se sabe además, que se puede orientar la anisotropía escogiendo sustratos de gran simetría [3, 9].

Preparación de la película delgada de Py $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$

La muestra utilizada para las mediciones del Efecto Kerr, fue, Py $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$, crecida por sputtering DC, sobre un sustrato de vidrio. La presión de base fue de 3.3×10^{-6} bar y la presión de argón fue de 3.3×10^{-3} bar. Se utilizó una potencia de 20 W y el tiempo de deposición fue de 2 min. Con estas condiciones se obtuvieron películas con un espesor nominal de 20 nm. La película delgada que se utilizó para las mediciones de anisotropía y de las curvas $M(H)$ tiene un área superficial de $0,24 \text{ cm}^2$ y un volumen de $4,1 \times 10^{-7} \text{ cm}^3$.

Algunas propiedades estructurales del Py $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$

El permalloy, Py $\text{Ni}_x\text{Fe}_{1-x}$, es uno de los materiales más utilizados para el almacenamiento magnético de datos. Presenta magnetostricción que se desvanece para el índice de dopaje $x = 20$. La alta permeabilidad y el bajo campo coercitivo, hacen del Py un material magnético suave que sirve como interruptor de campo. Se usa como sensor en los cabezales de los discos duros aprovechando su magnetorresistencia anisotrópica o su magnetorresistencia gigante en películas delgadas de Py/Cu/Co.

El Py cristalizado tiene estructura fcc, con parámetro de red de $a_{(100)} = 3.5 \text{ \AA}$.

En películas delgadas, pueden modificarse sus parámetros de red, según el sustrato sobre el cual haya sido crecido y producir alguna anisotropía en él [3,10].

RESULTADOS

Para obtener la curva de anisotropía en el plano de la muestra se realizaron mediciones con un magnetómetro de muestra vibrante (VSM). Las mediciones de magnetización se hicieron girando la muestra un ángulo α con respecto a un eje arbitrario contenido en el plano de la muestra. El resultado se muestra en la Figura 3, en donde se aprecian la magnetización remanente mínima y máxima separadas por 90° .

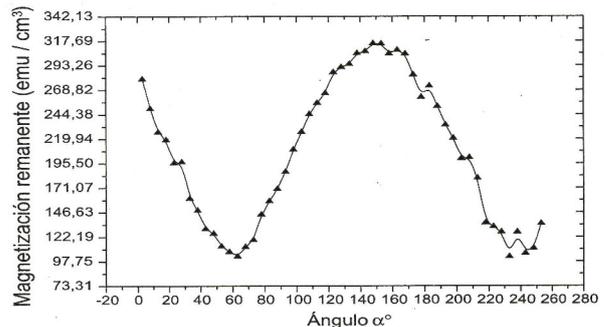


Fig. 3 Variación de la magnetización remanente para diferentes direcciones de medición en el plano de la muestra.

Al existir una sola dirección de fácil magnetización podemos afirmar que la película de Py tiene anisotropía uniaxial [3]. En la Figura 4 podemos apreciar que la forma de las curvas de histéresis dependen del ángulo α (dirección en la cual orientemos la muestra con respecto del campo magnético externo). Para algunos ángulos, las curvas decrecen rápidamente al cambiar el sentido de campo magnético mientras que para los valores complementarios, lo hacen suavemente en concordancia con lo que se observó en la curva de anisotropía.

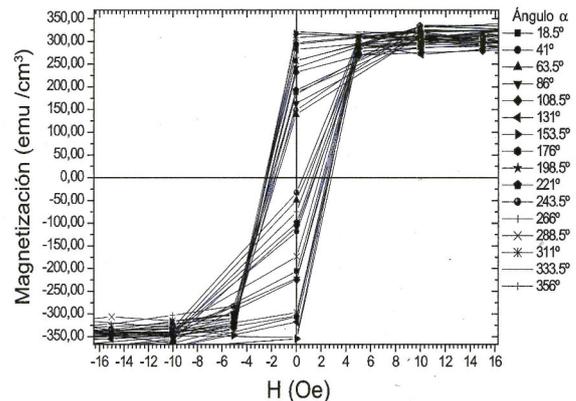
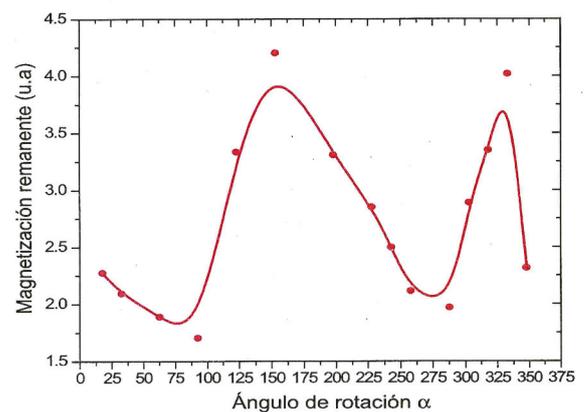


Fig. 4 Curvas de histéresis en el plano de la muestra, medidas con un VSM.

En la Figura 5 se puede observar dos curvas de histéresis medidas en el plano de la muestra para estas dos direcciones características.

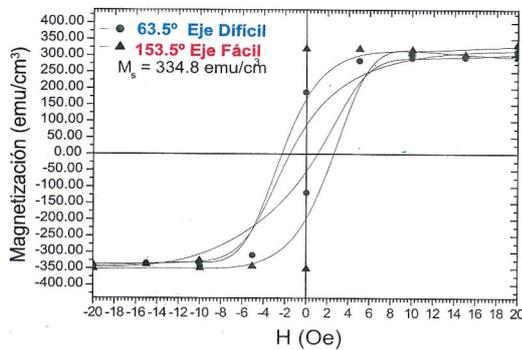


Fig. 5 Curvas de histéresis en el plano de la muestra, medidas con un VSM para las direcciones de paralela y perpendicular al eje de fácil magnetización.

Se obtiene una magnetización de saturación M_s de 334.8 emu/cm^3 y que no cambia de valor para cualquier dirección en que sea medida es decir, M_s no depende del ángulo α . Podemos observar también que la muestra se satura magnéticamente para valores pequeños de campo de hasta un máximo de 8 Oe. Según la literatura el campo coercitivo para películas delgadas de Py de 20 nm de espesor, en la dirección del eje de fácil magnetización, es de aproximadamente 4 Oe, mientras que para el eje de difícil magnetización es aproximadamente 15 Oe [3]. La Figura 6 muestra las mediciones de magnetización obtenidas con el magnetómetro de Kerr, para dos ángulos de incidencia del haz de luz, con la muestra en posición polar. Se puede observar la caída más suave de la curva correspondiente a un ángulo de incidencia de 28° , mientras que para un ángulo de 40° la curva de histéresis es mucho más cuadrada. Los valores de intensidad de saturación no son los mismos para los dos casos pero su diferencia es muy pequeña.

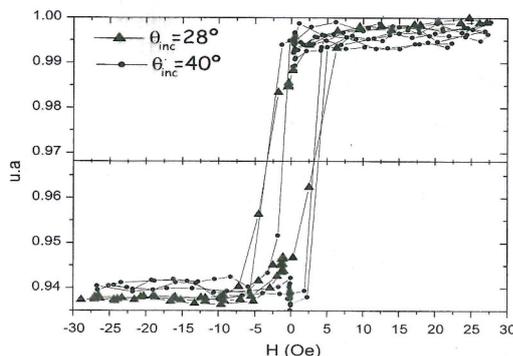


Fig. 6 Curvas de histéresis con el MEKS polar.

De las mediciones mostradas en la Figura 6 llegamos a obtener que el ángulo de rotación de Kerr, es $\theta_k = 2.7 \times 10^{-4}$ radianes para el caso del ángulo de incidencia 28° y $\theta_k = 2.49 \times 10^{-4}$ radianes para el caso del ángulo de incidencia igual a 40° . El ángulo de Kerr Polar promedio es $\theta_k = 2.59 \times 10^{-4}$ radianes. La incertidumbre en estas dos mediciones fue de 5.33×10^{-5} radianes para el ángulo de incidencia de 40° y de 6.48×10^{-5} radianes para el ángulo de 28° .

En la Figura 7 se observa las mediciones realizadas con MEKS longitudinal para diferentes ángulos de incidencia. Se puede ver que la diferencia entre los valores de las intensidades de saturación aumenta al incrementar el ángulo de incidencia. Las gráficas para los ángulos de 11° y 15° se encuentran superpuestas debido a que el ángulo de incidencia es aproximadamente el mismo. Se puede observar un campo coercitivo menor que en las mediciones del MEKS Polar.

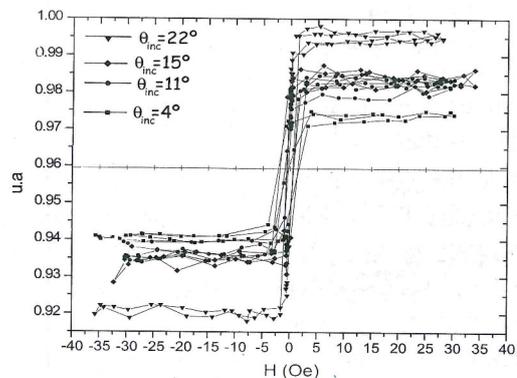


Fig. 7 Curvas de histéresis con MEKS longitudinal.

Utilizando la ecuación 6 y los resultados obtenidos de las mediciones mostradas en la Figura 7 se llega a obtener el ángulo de rotación de Kerr para los diferentes ángulos de incidencia en configuración longitudinal.

Tabla 1. Resultados obtenidos del ángulo de Kerr.

Angulo de incidencia	Angulo de Kerr $\theta_k = x \cdot 10^{-4}$ (rad)
4°	1,42
11°	2,01
15°	2,16
22°	3,41

Los valores experimentales obtenidos para el ángulo de rotación de Kerr, mantienen el mismo orden. En la Figura 8 Podemos apreciar las curvas de histéresis del $\text{Py-Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$, medidas por VSM y por MEKS.

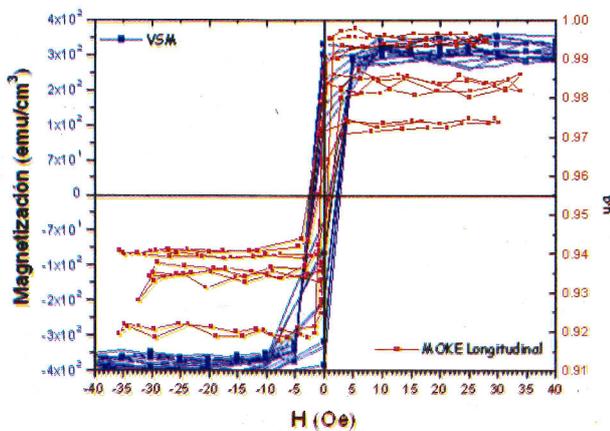


Fig. 8 Curvas de histéresis medidas con VSM en (cuadrado rojo) y con el magnetómetro MEKS longitudinal (círculo azul).

CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó un Magnetómetro de Efecto Kerr Superficial, en sus variantes polar y longitudinal. Se comprobó el funcionamiento del sistema midiendo curvas de histéresis para la muestra de Py de 20 nm de espesor comparándolas con las obtenidas con un magnetómetro de muestra vibrante (VSM). Las curvas de anisotropía medidas en el VSM nos muestran un material magnético con anisotropía uniaxial lo cual ocurre en policristales de Py. La magnetización de saturación en el plano fue de $334,8 \text{ emu/cm}^3$ en promedio, puesto que las curvas de histéresis medidas no fueron del todo simétricas. La diferencia en la magnetización remanente para estos ejes fue de $182,7 \text{ emu/cm}^3$ la cual es muy pequeña.

Podemos concluir que la película de $\text{Py-Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ presenta una leve anisotropía en el plano. El campo coercitivo obtenido de las curvas de histéresis en el plano de la muestra no supera los 4 Oe lo que era esperado por ser un material fácilmente magnetizable y con bajo campo coercitivo. Al comparar las curvas de histéresis del MEKS polar con el longitudinal se aprecia un mayor campo coercitivo para las curvas del MEKS polar, esto es debido a la anisotropía en el plano de la muestra, es mucho más difícil magnetizar el material aplicando

campo magnético perpendicular a este, que hacerlo con campo magnético en el plano.

Los ángulos de rotación de Kerr obtenidos para la película de $\text{Py-Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ se encuentran en el orden de magnitud esperados y los valores promedios obtenidos fueron de $2,6 \times 10^{-4}$ radianes para el MEKS polar, y $2,25 \times 10^{-4}$ radianes para el MEKS longitudinal. Al aumentar el ángulo de incidencia de la luz láser en las mediciones del MEKS polar la intensidad medida disminuye, como es de esperarse por las ecuaciones de Fresnell pero no es atribuible a un efecto magnético como en el caso del MEKS longitudinal. El orden de magnitud del ángulo de rotación de Kerr para los diferentes ángulos de incidencia no cambia drásticamente en el MEKS polar. Para el MEKS longitudinal se aprecia la dependencia entre la rotación de Kerr y el ángulo de incidencia.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a: F. Piuzzi; R. Baptist; Y. Barjhoux; de la Asociación Puya Raymondí por la donación de los equipos y componentes ópticos. Al Instituto Balseiro y a su división de Resonancias por permitir el acceso del Lic. Elmer Monteblando a sus instalaciones y, a Carlos Rojas por el apoyo brindado en las pasantías de investigación. A los Srs. V. Quinder y J. Farfán por el apoyo técnico.

REFERENCIAS

1. **Kerr, J., Philos.** "J. Mag. Sci". 5, 321, 1877; 5,161, 1878, pp. 321 – 161, Estados Unidos.
2. **Bader, S. D.** J. Magn. Mater 100", pp. 440-454, 1991, USA.
3. **Lee, Y., Bland, J. A. C.,** "Journal of Korean Physical Society", Vol. 39, No 4, pp 661-666, October 2001, Korea.
4. **Qiu, Z. Q., Pearson, J., Bader, S. D.,** "Phys. Rev B", Vol. 46, No 13, pp. 8195-8201, 1992, USA.
5. **Soochoo, F.,** "Magnetic Thin Films" (Harper and Raw publishers, pp. 119, 1965, Estados Unidos.
6. **Smith, D.O.,** "J. Appl. Phys". 30, 264S, pp. 264. 1959, USA.
7. **Stearns, M. B.** "J. Magn. Mater", pp. 5, 167 1977, USA.
8. **Phys Today** 34, 1978, USA.
9. **Bland, J. A. C., Hope, S., Tselepi, M., Choi, B.C.,** "J. Phys. D 31, pp. 622, 1998, USA.

10. **Michelini, F., Ressler, L., Degauque, J.,**
“Journal of Applied Physics”, Vol. 92, No 12,
pp. 7337 - 7340, 2002, USA.

Correspondencia: agutarra@uni.edu.pe

Recepción de originales: Mayo 2008

Aceptación de originales: Junio 2008