

## ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL MAGNETÓMETRO KERR LONGITUDINAL PARA DIFERENTES ÁNGULOS DE INCIDENCIA

### Analysis of the behavior of magnetometer Kerr longitudinal for different angles of incidence

#### RESUMEN

En este trabajo se realiza un análisis experimental de la relación entre el ángulo de incidencia y la intensidad de la señal Kerr, que influye en la forma del ciclo de histéresis, planteándose una relación directa entre ambos para la configuración longitudinal en el magnetómetro Kerr. Los resultados obtenidos evidencian un mejor comportamiento de dicha curva para el rango comprendido entre  $10^\circ$  y  $60^\circ$  del ángulo de incidencia.

**PALABRAS CLAVES:** Angulo, Histéresis, Kerr, magnetómetro, Señal.

#### ABSTRACT

*In this work experimental analysis was carried out between incidence angle and Kerr signal intensity, that influences in the hysteresis shape behavior, which establishes a direct relationship between both for longitudinal configuration on the Kerr Magnetometer. The results show a better behavior of the curve for the defined range from  $10^\circ$  to  $60^\circ$  of incident angle.*

**KEYWORDS:** Angle, Hysteresis, Ker, magnetometer, signal.

#### JAVIER I. TORRES OSORIO

Ingeniero Electricista, M.Sc.  
Profesor Asistente  
Universidad Tecnológica de Pereira  
[oscuro@utp.edu.co](mailto:oscuro@utp.edu.co)

#### ANDRES C. GARCIA CASTRO

Estudiante X Semestre  
Ingeniería Física  
Universidad Tecnológica de Pereira  
[a.c.garcia.castro@gmail.com](mailto:a.c.garcia.castro@gmail.com)

#### BEATRIZ CRUZ MUÑOZ

Física, Ph.D  
Profesora Asistente  
Universidad Tecnológica de Pereira  
[bcruz@utp.edu.co](mailto:bcruz@utp.edu.co)

**Grupo de Investigación en Propiedades Magnéticas y Magnetoópticas de Nuevos Materiales (GIMM)**

## 1. INTRODUCCIÓN.

El uso del magnetómetro Kerr en los laboratorios de materiales para caracterización magnética de elementos micro y nano estructurados toma cada vez más importancia en el país, por ser una técnica relativamente asequible, dado la ventajas económicas e instrumentales que presenta respecto a otros montajes como el SEMPA (Scanning Electron Microscopy with Polarization Analysis) o el magnetómetro SQUID, entre otros. [1], [2]. Además teniendo en cuenta que hay poca documentación respecto a su instrumentación y modo de operación, se deben realizar análisis funcionales que verifiquen el comportamiento de la señal lumínica (señal Kerr) respecto a las diferentes variables funcionales que este equipo presenta, como lo es el ángulo de incidencia óptimo, para obtener una señal Kerr que permita realizar un ciclo de histéresis simétrico. Básicamente al tener en cuenta que la magnitud de la señal Kerr que se presenta es del orden de micro voltios y las variaciones de ella entre incrementos del campo magnético externo del orden de nanovoltios y que esta señal es susceptible a pequeñas variaciones en la configuración óptica, de las cuales en este trabajo es tenida en cuenta la variación debida a los cambios del ángulo de incidencia.

Para tal efecto se implementa un procedimiento de medición del ciclo de histéresis de un muestra de  $\text{Fe}_{96}\text{C}_4$  realizando variaciones del ángulo de incidencia del haz del láser desde  $7^\circ$  con incrementos aproximados de  $5^\circ$

hasta un ángulo en que no presente una respuesta de ciclo de histéresis apropiada, con el objeto de comprobar lo expuesto por Yuen [3] y por Argyle [4].

## 2. FUNDAMENTO TEÓRICO.

### 2.1 Fenomenología del Efecto Kerr Magnetoóptico.

Es un efecto óptico que exhibe la influencia de campos magnéticos, es decir, una radiación luminosa que presenta cambios en sus características al propagarse a través de un medio en presencia de un campo magnético, se denomina efecto magnetoóptico [5]. Cuando el fenómeno se da por reflexión de la luz sobre un material metálico se conoce como *Efecto Kerr magnetoóptico (MOKE)* [6]. El *MOKE* es un fenómeno en el que se presenta la rotación del plano de polarización de la luz, al ser reflejada por una superficie magnetizada en función de la magnetización del material. La luz es afectada por la magnetización ( $M$ ) de esta superficie y en el caso más general presenta polarización elíptica. La polarización elíptica, genera una rotación del vector de polarización, esta rotación se describe por medio del ángulo Kerr ( $\theta_K$ ). Este ángulo Kerr para efectos prácticos se determina por

la variación en la intensidad de la señal lumínica, que se relaciona con el ángulo Kerr por medio de la ecuación (1), donde  $\delta = \theta_a$  con  $\theta_a > \theta_K$ , siendo  $\theta_a$  el ángulo asignado al analizador.

$$I_K = \frac{I}{I_0} = \left(1 - \frac{2\theta_K}{\delta}\right) \quad \text{donde } I_0 = |E_s^r|^2 \delta^2 \quad (1)$$

Por lo anterior se debe entender que esta señal que presenta una variación de la intensidad de la luz en función de la magnetización de la muestra, es la portadora de la información que describe las características magnéticas del material analizado.

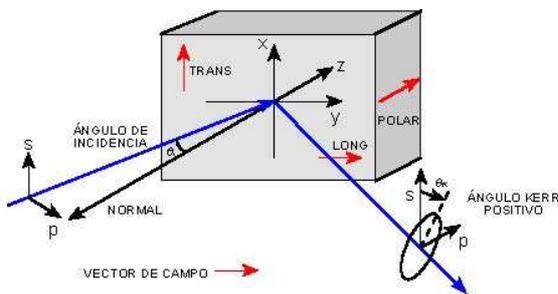
El *MOKE* se clasifica en tres geometrías, esta clasificación se establece según la orientación del vector de magnetización respecto a la superficie reflectante y al plano de incidencia de la luz. Se distinguen tres tipos de efecto Kerr: longitudinal, transversal y polar [5], [7].

A nivel macroscópico el *MOKE* puede ser descrito en base a la teoría de reflexión de Fresnel  $R$  [6], [7], ver ecuación (1).

$$\begin{pmatrix} E_p^r \\ E_s^r \end{pmatrix} = (R) \cdot \begin{pmatrix} E_p^i \\ E_s^i \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$(R) = \begin{pmatrix} r_{pp} & r_{ps} \\ r_{sp} & r_{ss} \end{pmatrix}$$

En la cual los superíndices  $i$  y  $r$  denotan las ondas incidentes y reflejadas respectivamente, y los subíndices  $s$  y  $p$  definen los componentes de campo eléctrico perpendicular y paralelo al plano de incidencia, respectivamente. Ver figura (1)



**Figura 1.** Geometría de la polarización para una muestra magnetizada.

Los coeficientes de la matriz de reflexión  $(R)$  son  $r_{pp}$ ,  $r_{ps}$ ,  $r_{sp}$ ,  $r_{ss}$  y se determinan mediante un manejo matemático del *tensor de permitividad eléctrica* ( $\epsilon$ ), y está resuelto que las propiedades ópticas de un medio se determinan usando este *tensor* [6], que se define por los movimientos

de los electrones en dicho medio. Esta descripción fenomenológica se realiza examinando el tensor dieléctrico generalizado  $3 \times 3 \epsilon_{ij}$  con  $i, j = 1, 2, 3$  y sus elementos antisimétricos, fuera de la diagonal, para obtener los elementos de la matriz  $R$ , ya que este tensor caracteriza ópticamente el medio [8].

**2.2 Elementos de la matriz de reflexión (R).** Una vez determinado el tensor de permitividad eléctrica, se puede resolver la ecuación de onda, como se plantea en [9], considerando  $(n_1)$  y  $(n_2)$  los índices de refracción de los medios dieléctrico y magnético y  $(\theta_i)$  y  $(\theta_r)$  como los ángulos de incidencia, para resolver la matriz de reflexión  $R$  [6]. Se debe tener en cuenta que el elemento  $r_{pp}$  es función sólo de la magnetización en la dirección  $x$  ( $m_x$ ) que la llamaremos dirección *Transversal*, los elementos  $r_{ps}$  y  $r_{sp}$  son función de la magnetización en la dirección *longitudinal* y *polar* y el componente  $r_{ss}$  no depende de la magnetización.

Generando que en la configuración longitudinal el elemento  $r_{ps}$  se debe a la componente de magnetización  $m_y$ . La magnetización en dicha configuración es paralela tanto a la superficie como a la dirección de propagación de la luz. Teniendo a  $r_{ps}$  en (3)

$$r_{ps} = -i \frac{n_1 n_2 \cos \theta_i (m_y \sin \theta_i + m_z \cos \theta_i) Q}{(n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_r)(n_2 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_r) \cos \theta_i} \quad (3)$$

En esta configuración  $I_K$  se obtiene luego de elevar al cuadrado la ecuación (3).

$$I_{pp} + \cos(\theta_p + r_{ps} \sin \theta_p) \cos \theta_a + (r_{ps} \cos + r_{ss} \sin \theta_p) \sin \theta_a \quad (4)$$

Donde  $\theta_a$  y  $\theta_p$  son los ángulos del analizador y del polarizador respectivamente. Para la geometría longitudinal  $\theta_p = 90^\circ$  y  $\theta_a$  es menor a  $1^\circ$ .

En esta ecuación se nota que la intensidad de la señal es dependiente del ángulo de incidencia. Por tanto el ángulo de incidencia que plantee el experimentador tendrá una gran importancia en el ciclo de histéresis, y es lo que se desarrollara a continuación.

El equipo para desarrollar los experimentos del efecto Kerr magnetoóptico se denomina *Magnetómetro Kerr (MEK)*.

**3. MATERIALES Y METODOS.**

Se realizaron las pruebas con un magnetómetro Kerr ex situ que presenta un rango de trabajo de 0 – 1000 mT, acoplado a un electroimán Phylatex o con un rango de operación de 0-10 mT con una bobina de Helmholtz núcleo de aire [10]. Se uso una película delgada de  $Fe_{96}C_4$ , con espesor de 60 nm, crecida por el método

Deposición por Láser Pulsado (PLD), a una temperatura de sustrato 300 K y una presión de fondo de 12  $\mu$ Torr en argón.

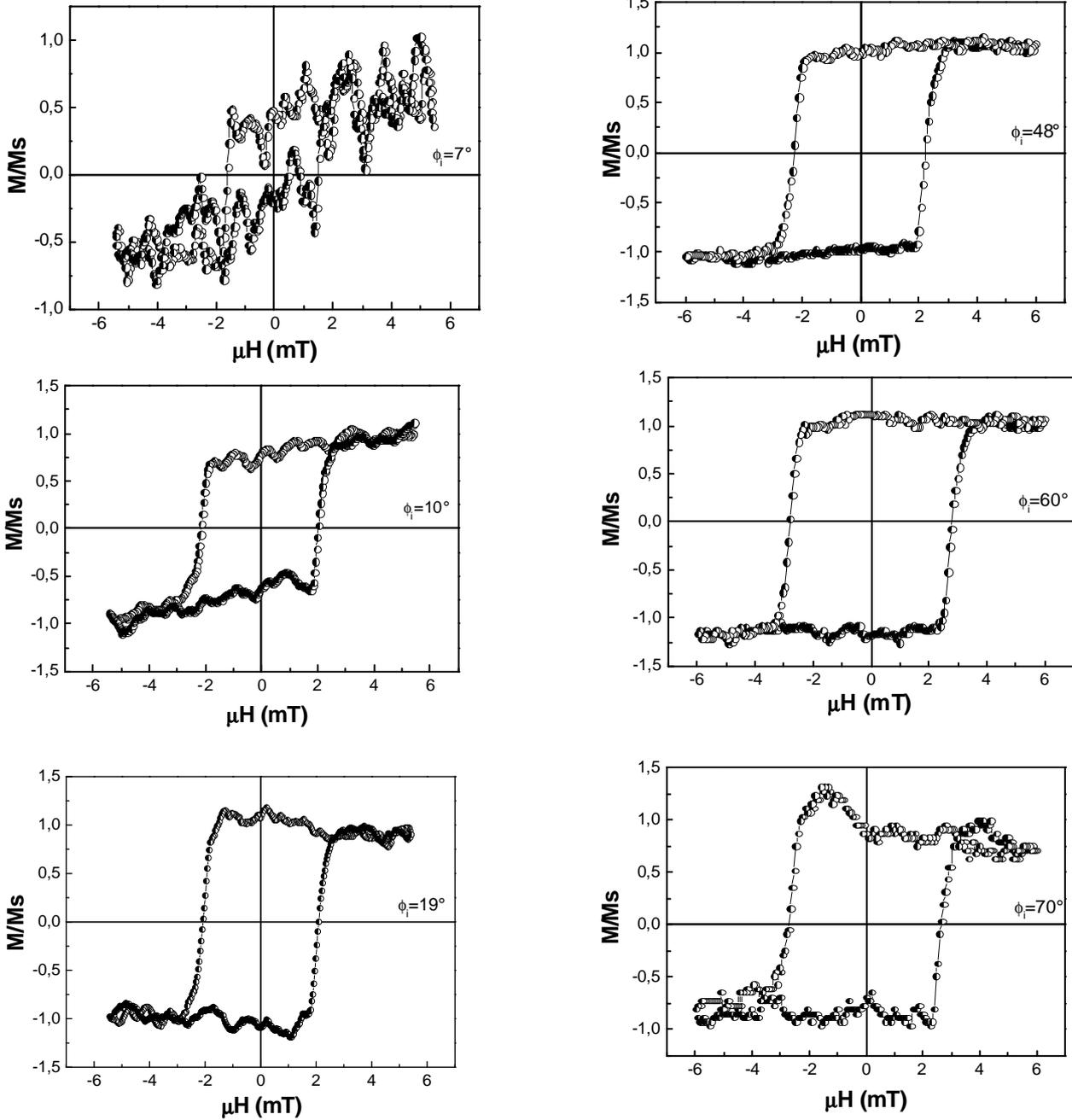
Las mediciones se realizaron con ángulos de incidencia desde 7° y haciendo incrementos de 5° cada vez hasta alcanzar 70°, siendo de interés el comportamiento de la señal Kerr, buscando comprobar lo expuesto por Yuen [3] [4].

**4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.**

Se obtuvieron ciclos de histéresis, variando los ángulos de incidencia del haz sobre la superficie de la película (Ver figura 2).

**Figura 2.** Ciclos de histéresis para diferentes ángulos de incidencia del haz lumínico en el magnetómetro Kerr.

Se puede observar de la figura que el ángulo de mejor respuesta se ubica en un rango entre 10° y 60°. Sin embargo, por limitaciones propias del montaje, debido a la obstrucción que generan las bobinas, no es posible



realizar mediciones en el intervalo de  $20^\circ$  a  $36^\circ$ , por lo cual se hace necesario utilizar espejos que redireccionen el haz. Lo que está de acuerdo con lo reportado por Yuen [3], en forma parcial, pues este determina no se tiene respuesta para ángulos cercanos a cero grados ( $0^\circ$ ) y esto puede causar interpretaciones erróneas, pues como se observa en la figura 2 no se tiene buena respuesta para ángulos inferiores a  $10^\circ$ .

En la configuración longitudinal el ángulo Kerr pueden presentar un arco aproximado a  $1^\circ$ , estos arcos aumentan cuando el ángulo de incidencia es aproximado a un orden de  $60^\circ$ . Por lo que la respuesta de la señal Kerr longitudinal sea linealmente dependiente del ángulo de incidencia; al incrementar dicho ángulo es posible mejorar el ciclo de histéresis. Además reporta que se pueden obtener ciclos a valores cercanos de  $0^\circ$ , sin embargo no presentan una respuesta magnética apreciable en el presente estudio.

## 5. CONCLUSIONES

La respuesta del *MEK* longitudinal es linealmente dependiente del ángulo de incidencia; al incrementar dicho ángulo es posible mejorar el ciclo de magnetización. Siendo el rango de operación para un mejor comportamiento del ciclo de histéresis fue localizado en  $10^\circ \leq \theta_i \leq 60^\circ$

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Torres. Antecedentes y aplicaciones del efecto Kerr magnetoóptico. *Scientia et Technica*. Año XII N° 32. P. 437. 2006.
- [2] J. Torres y B. Cruz. Análisis de diferentes tipos de magnetómetros Kerr usados para el estudio de materiales magnéticos. *Scientia et Technica* Año XIII N° 35 p. 433. 2007.
- [3] H. Yuen, "Construction of a surface magneto-optic Kerr effect apparatus for the measurement of magnetic properties of thin film," *A senior thesis submitted in Physics in the College of Letters and Science of the University of California at Berkeley*, p. 37, 2000.
- [4] D. Herman and Argyle, Magneto-optical effects, *J. Appl. Phys.* vol. 61, 2002.
- [5] V. Antonov, B. Harmon y A. Yaresko. *Electronic Structure and Magneto-Optical Properties of Solids*. Cap. 1. p 948. Kluwer Academic. 2004. isbn 1-4020-1906-8.
- [6] H. Bonette, O magnetómetro a efeito Kerr e o filme fino de Co/Si," *M.Sc. dissertation. Universidad Estadual de Campinas*, p. 40, 2002.

[7] H. Ding and *et al.*, "Experimental method for separating longitudinal and polar Kerr signals," *J. Magn. Mater.* vol. 212, no. 5, 2000.

[8] Z. Qiu and S. Bader, "Surface magneto-optic Kerr effect (SMOKE)," *J. Magn. Mater.* vol. 200, pp. 664–678, 1999.

[9] J. Torres. "Definición de criterios de diseño para la implementación del magnetómetro Kerr". M.Sc. Disertación. Universidad Tecnológica de Pereira. P. 105 2008.

[10] J. Torres, B. Cruz. Descripción e implementación de un magnetómetro Kerr. *Scientia et Technica*. Año XIV N° 38. 2008