

# Magnetómetro Kerr: análisis de ruido e instrumentación

## Kerr Magnetometer: Noise Analysis and Instrumentation

JAVIER IGNACIO TORRES OSORIO

Ingeniero Electricista de la Universidad Tecnológica de Pereira y profesor del departamento de Física de la misma universidad. Integrante del grupo de investigación en Propiedades Magnéticas y Magnetoópticas de Nuevos Materiales.

oscur@utp.edu.co

BEATRIZ CRUZ MUÑOZ

Física, Magíster y Doctora en Ciencias Físicas de la Universidad del Valle. Profesora del departamento de Física de la Universidad Tecnológica de Pereira, categoría Asistente. Directora del grupo de investigación en Propiedades Magnéticas y Magnetoópticas de Nuevos Materiales.

bcruz@utp.edu.co

Clasificación del artículo: investigación

Fecha de recepción: 11 de julio de 2006

Fecha de aceptación: 30 de abril de 2007

**Palabras clave:** magnetómetro, Kerr, ruido, instrumentación.

**Key words:** magnetometer, Kerr, noise, instrumentation.

### RESUMEN

El magnetómetro Kerr ha mostrado ser una de las herramientas más ágiles y eficaces para el estudio y la caracterización de materiales magnéticos (películas delgadas). En este artículo se describen los tipos de ruido inherentes al montaje de esta herramienta y la forma como pueden ser minimizados; asimismo, se realiza un análisis descriptivo de diferentes tipos de montajes prácticos. El criterio de diseño empleado para la instrumentación de este montaje se basa en las técnicas de eliminación de ruido utilizadas. Como aspecto central se presenta la reducción de ruido por *wavelets*, para poder llegar a proponer una nueva alternativa de instrumentación y control más versátil y económica. Por último, se realiza un análisis comparativo en relación con otras técnicas de caracterización de materiales magnéticos.

### ABSTRACT

Kerr magnetometer is one of the most agile and efficient tools for the analysis and characterization of magnetic materials (thin films). In this work there are described the kinds of noise related to the assembly of this tool, and the way in which they could be minimized. A descriptive analysis of different types of practical assemblies is made also, considering the noise elimination techniques used as design criterion for the instrumentation of such assembly. As the principal aspect, the noise reduction by wavelet is presented as a new alternative of instrumentation and control, more flexible and viable. A comparative analysis in relation with other techniques of magnetic material characterization is made too.

## 1. Introducción

Recientemente, los efectos magneto-ópticos sólo han sido aplicados al estudio de películas delgadas; sin embargo, la historia de tal efecto comienza a mediados del siglo XIX, con su descubrimiento por parte de M. Faraday. A mediados de 1800, él y J. Kerr desarrollaron varios experimentos para estudiar la polarización de la luz sobre la transmisión y reflexión a través de medios no magnetizados. La comprensión teórica de los efectos de Faraday y Kerr contribuye al entendimiento general de los fenómenos magneto-ópticos. El uso del efecto Kerr magneto-óptico en el estudio de las propiedades magnéticas de materiales utilizables en almacenamiento de información, análisis de semiconductores y/o construcción de máquinas eléctricas es una herramienta útil, versátil y de bajo costo.

Las aplicaciones de este efecto se realizan por medio del magnetómetro Kerr; con respecto a éste, en la actualidad se encuentra poca documentación acerca de los tipos de ruido implícitos en este montaje, así como del análisis de las características de la señal óptica obtenida como base de información del material estudiado y, en términos generales, sobre la implementación del magnetómetro Kerr desde el punto de vista de instrumentación y control. En este documento se presentarán los tipos de ruido inherentes a cada paso de su montaje, sus fuentes y características, para así determinar una forma de supresión de esta señal.

## 2. Fundamentación teórica

Los efectos ópticos que exhiben la influencia de campos magnéticos, es decir, una emisión de luz generada por una fuente luminosa que se propaga a través de un medio en presencia de un campo magnético se denominan efectos magneto-ópticos. El primer efecto magneto-óptico asociado a la transmisión de la luz a través de un cristal lo descubrió M. Faraday en septiembre de 1845 [1]. Posteriormente, en 1877, cuando examinaba la polarización de la luz al ser reflejada por una superficie pulida inmersa

en un campo electromagnético, J. Kerr descubrió un fenómeno equivalente al efecto Faraday, pero asociado a la reflexión; esto fue llamado efecto Kerr magneto-óptico [2] [3].

El término *efecto Kerr* (o su acrónimo MOKE proveniente de la sigla en inglés: *Magneto-Optic Kerr Effect*), fue propuesto por Argyres y se empezó a emplear por primera vez en 1955 [4]. El MOKE había sido usado en el estudio magnético de muestras, pero en 1985 Moog y Bader (en el *Argonne National Laboratory* de los Estados Unidos de Norteamérica) introdujeron la aplicación del efecto Kerr magneto-óptico al estudio de las películas magnéticas delgadas, bajo el acrónimo SMOKE (*Surface Magneto-Optic Kerr Effect*) [5].

### 2.1. Efecto Kerr magneto-óptico

Se trata de un efecto magneto-óptico relacionado con la reflexión de la luz sobre una superficie magnetizada. Una completa descripción fenomenológica del MOKE a nivel macroscópico puede ser realizada mediante la teoría de reflexión de Fresnel [6] [7], al relacionar las amplitudes de la onda reflejada con la incidente en términos de la matriz de reflexión de Fresnel ( $R$ ) [6].

$$\begin{pmatrix} E_p^r \\ E_s^r \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} E_p^i \\ E_s^i \end{pmatrix} \quad (1)$$

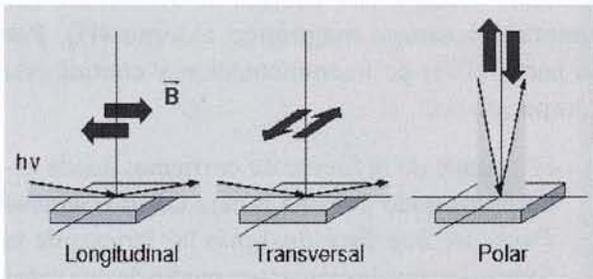
$$R = \begin{pmatrix} r_{pp} & r_{ps} \\ r_{sp} & r_{ss} \end{pmatrix} \quad (2)$$

En (1) y (2),  $i$  y  $r$  denotan las ondas incidentes y reflejadas respectivamente, y  $s$  y  $p$  definen los componentes de campo eléctrico paralelo y perpendicular al plano de reflexión. Si se utilizan las relaciones provenientes de la condición de continuidad se obtienen las relaciones entre las amplitudes de los campos eléctrico y magnético y, a través de estas dos, se definen los coeficientes de la matriz de reflexión ( $R$ ).

$$r_{pp} = \begin{pmatrix} E_p^r \\ E_p^i \end{pmatrix} \quad r_{ps} = \begin{pmatrix} E_p^r \\ E_s^i \end{pmatrix} \quad r_{sp} = \begin{pmatrix} E_s^r \\ E_p^i \end{pmatrix} \quad r_{ss} = \begin{pmatrix} E_s^r \\ E_s^i \end{pmatrix} \quad (3)$$

Para determinar los elementos de la matriz de reflexión se debe contarse con el tensor de permisividad eléctrica ( $\epsilon$ ), que define un método para describir fenómenos ópticos. Por medio de la operación matemática de estos elementos se obtiene la señal Kerr  $I_K$ , que es la recibida por el fotodetector.

El efecto Kerr presenta tres configuraciones estándar para el montaje experimental: polar, longitudinal, y transversal [8] [9]. La clasificación se establece de acuerdo con la relación geométrica entre la orientación de la magnetización y el plano de incidencia de la luz (ver figura 1). El uso de cada una de estas variaciones define la forma de montar las bobinas con respecto al equipo óptico.



**Figura 1.** Configuraciones del MOKE según su composición geométrica

Fuente: Disponible en: <http://www.uam.es/departamentos/ciencias/fismateriaic/especifica/lasuam/danyela/moke.html> [fecha de consulta: septiembre de 2006]

## 2.2. Señal Kerr ( $I_K$ )

Cualquier variación en la magnetización de la muestra genera la variación de la intensidad de la luz reflejada; entonces, esta última se puede utilizarse para monitorear las características magnéticas

Si se sustituye  $E_r$  en  $I$  se obtiene la intensidad relativa  $I_K$ .

$$I_K = \frac{I}{I_0} \left| (r_{pp} \cos\theta_p + r_{ps} \text{sen}\theta_p) \cos\theta_a + (r_{sp} \cos\theta_p + r_{ss} \text{sen}\theta_p) \text{sen}\theta_a \right|^2 \quad (8)$$

de la muestra mediante la recepción, el acondicionamiento y el procesamiento de la señal  $I_K$ .

$$E^i = \begin{pmatrix} E_p^i \\ E_s^i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_0 \cos\theta_p \\ E_0 \text{sen}\theta_p \end{pmatrix} \quad (4)$$

Para comprender el desarrollo de la señal  $I_K$ , en primer lugar, se debe tener en cuenta el campo eléctrico de la señal incidente ( $E_i$ ) linealmente polarizada; ésta presenta un ángulo  $\theta_p$  con respecto al plano de polarización de la luz:

Luego se determina el campo eléctrico de la señal reflejada, multiplicando el campo eléctrico incidente por la matriz de reflexión de Fresnel ( $R$ ).

$$E^r = \begin{pmatrix} E_p^r \\ E_s^r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{pp} & r_{ps} \\ r_{sp} & r_{ss} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_p^i \\ E_s^i \end{pmatrix} \quad (5)$$

La señal reflejada pasa por el analizador antes de llegar al fotodetector; a ella se le adiciona un ángulo arbitrario, con respecto al plano de polarización que se denominará  $\theta_a$ ; el campo eléctrico detectado ( $E_d$ ) resultante es:

$$E^d = E_p^r \cos\theta_a + \text{sen}\theta_a \quad (6)$$

De este modo se obtiene la función de la intensidad recibida por el fotodetector, definida como:

$$I = |E^d|^2 = |E_p^r \cos\theta_a + E_s^r \text{sen}\theta_a|^2 \quad (7)$$

En (8),  $I_0 = |E_0|^2$ .

Se debe tener en cuenta que  $I_K$  es función de tres componentes de la magnetización en la muestra cuando los elementos de la matriz  $R$  son proporcionales a componentes de magnetización en la superficie reflectora ( $m_x, m_y, m_z$ ). El efecto Kerr se clasifica de acuerdo con la dirección de la magnetización en la película, es decir, en concordancia con su configuración.

La señal  $I_k$  es recibida por el fotodetector y transducida en una señal eléctrica compuesta por una fotocorriente, más unos componentes de ruido que se describirán en un aparte posterior. La  $I_k$  transducida a una corriente Kerr  $i_k$  se define como:

$$i_k = i_s + i_r \quad (9)$$

En (9),  $i_s$  es la fotocorriente generada por el fotodetector, e  $i_r$  es la corriente ruidosa (ver el apartado 3.2).

### 3. Descripción del MEK convencional

El equipo básico para realizar pruebas empleando el efecto Kerr magneto-óptico consta de tres *sets*: uno óptico, uno eléctrico y otro de instrumentación y control.

El *set* óptico se articula en una superficie estable; el uso de una mesa antivibratoria no es indispensable si se minimizan las vibraciones ambientales [8]. Como fuente lumínica se puede usarse un *diodo láser* de alta estabilidad ( $\sim 0,1$ ) y baja potencia ( $\sim 5\text{mW}$ ), con longitud de onda entre 400 nm y 850 nm. Un fotodetector es utilizado para transducir la señal reflejada por la muestra estudiada, conocida como señal Kerr  $I_k$ . También se pueden usar lentes focales para minimizar los problemas asociados a inestabilidades en el camino óptico.

De igual forma, se usan un par de polarizadores: la primera recibe la señal emitida por el diodo láser y genera su polarización vertical señal; la segunda es cruzada por la señal lumínica al ser reflejada por la muestra y recibe el nombre de *analizador*. Además,

puede contarse con un *chopper* que pulsa la señal del láser a una frecuencia específica definida por el experimentador; este elemento está interconectado al *lock-in*, el cual presenta un filtro ranura con frecuencia de paso equivalente a la frecuencia a la que el *chopper* opera<sup>1</sup>.

De acuerdo con los criterios de diseño que sean replanteados se tendrán variaciones en los diferentes *sets* que generan diferentes tipos de montajes: el MEK *convencional* [8] [9] (ver figura 2), el MOKE de difracción (*D-MOKE*) [10] (ver figura 3) y el *Durham MEK* [11] (ver figura 4). La configuración de cada uno varía en especial en su *set* óptico. Las variaciones se producen porque el experimentador tiene diferentes alternativas para tratar el ruido y la relación señal a ruido (S/N), luego se presentan variaciones en el *set* de instrumentación y control.

El *set* eléctrico se compone de una fuente de corriente y una o dos bobinas de Helmholtz que generan el campo magnético externo (H). Por su parte, el *set* de instrumentación y control está compuesto por:

- El control de la fuente de corriente: puede estar constituido por una tarjeta GPIB (*General Purpose Interface Bus*) más las tarjetas de la fuente o se puede ejercer por medio de una señal de voltaje controlada mediante un potenciómetro digital y un microprocesador.
- Un sensor de campo magnético o una sonda Hall que monitorean el campo magnético y están comunicados con el PC (*Personal Computer*).

En la fuente se deben controlar la inversión de fase, el nivel y el número de los incrementos en la corriente.

Con el fin de hacerlo más versátil y exacto y para definir los criterios del *set* de instrumentación y control de este magnetómetro, se deben conocer sus componentes básicos, ventajas y desventajas en cuanto a características físicas y de instrumentación.

<sup>1</sup> El Lock-in forma parte del set de instrumentación.

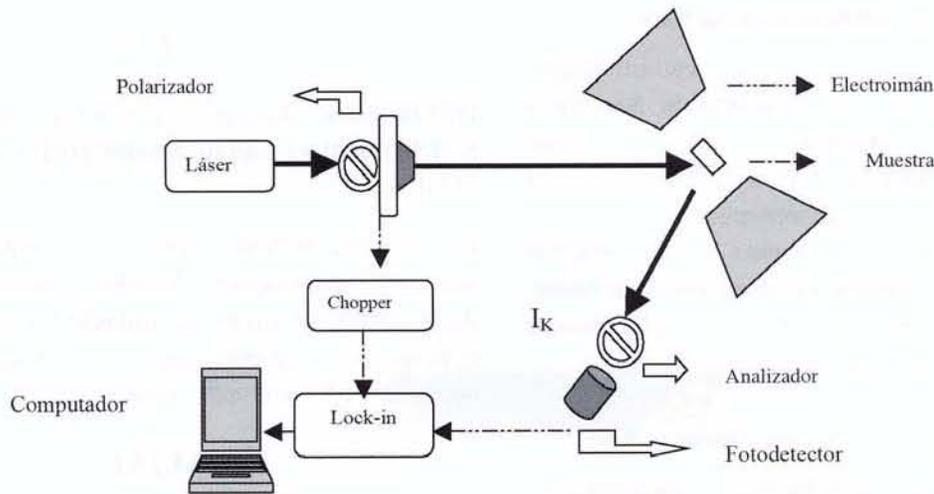


Figura 2. Magnetómetro convencional

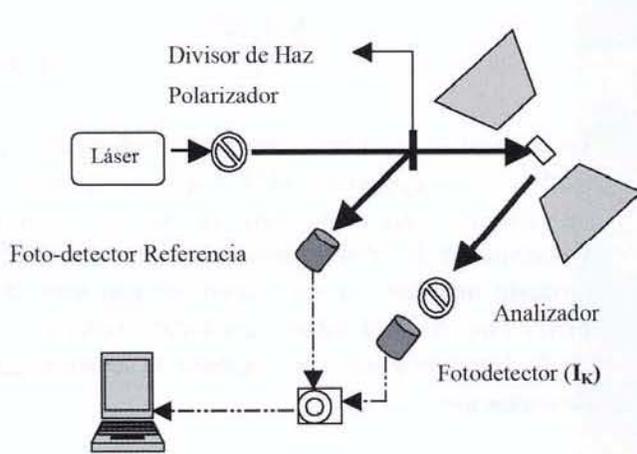


Figura 3. MOKE de difracción

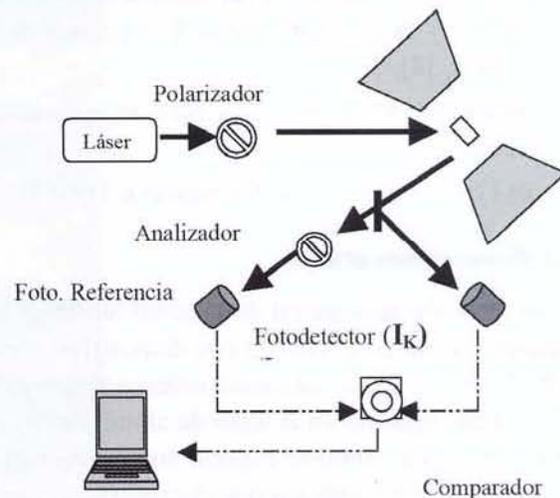


Figura 4. Durham MOKE

ción. Al montaje básico se pueden adicionar o quitar elementos (*chopper*, *lock-in* y fotodetectores), con el propósito de mejorar las características de la relación S/R de  $I_k$  (ver figuras 2 a 4).

### 3.1. Ruido en el MEK

Los ruidos en el MEK son de tipo ambiental y técnico o instrumental [6]. El primero es producido por fuentes extras de luz sobre el haz luminoso y el ruido electromagnético sobre el láser, el fotodetec-

tor, los conductores u otros elementos electrónicos. El segundo es intrínseco a los dispositivos como fotodetectores o láser.

Una profunda comprensión del ruido técnico facilitará su mayor supresión en un montaje magneto-óptico. Para ello éste se clasifica de acuerdo con su fuente, distribución y ubicación dentro del montaje; las características resultantes en cada clase definen el tipo de tratamiento que se le debe dar.

**3.2. Ruido óptico: ruido en la señal Kerr**

Esta señal se puede presentar en el camino óptico o en algunos de los elementos ópticos. Se debe a diferentes clases de fuentes; entre ellas, las fuentes ambientales (externas) afectan la señal lumínica en el camino óptico. También puede ser causado por imperfecciones en elementos ópticos como los polarizadores [12] (que se pueden considerar fuente externa). Este tipo de ruido se compensa fácilmente si se eliminan sus fuentes.

**3.3. Ruido técnico: ruido en la corriente Kerr**

Puede tener las siguientes fuentes y características:

- Fluctuaciones en la alimentación del láser, producidas por la variabilidad en la red de suministro de energía; si las fluctuaciones duran entre 1 y 10 pueden generar distorsiones en la señal  $I_k$  [8].
- Vibraciones mecánicas que generan ruido acústico [13].
- c) Fluctuaciones en el fotodetector [14-17].

**3.1. Ruido debido al láser**

El proceso de generación de la señal lumínica no introduce ruido a la señal en este dispositivo por sí solo. La presencia de esta señal indeseada se puede deber a alteraciones en la señal de alimentación de la red eléctrica (como se expresó anteriormente) o a inducciones por radiaciones electromagnéticas.

**3.2. Ruido debido a fotodetectores**

Cuando la señal lumínica incide sobre este transductor causa el flujo de una fotocorriente que fluye del diodo, seguida por una corriente denominada corriente oscura  $i_D$ , que corresponde a la expresión:

$$i_{rD}^2 = 2qi_D\Delta f \tag{10}$$

Asimismo, la naturaleza cuántica de los fotones genera un proceso fotoeléctrico aleatorio en la generación de pares electrón hueco (EHP).

$$i_{rq}^2 = 2qi_{ph}\Delta f \tag{11}$$

Dado que estos dos ruidos no están correlacionados, se deben sumar cuadráticamente [16] (ver ecuación (13)).

La corriente ruidosa  $i_r$  consta de la superposición de cuatro componentes: el ruido térmico  $i_{tc}$ , el ruido de disparo  $i_d$ , el ruido de contacto  $i_c$  y el ruido de generación-recombinación  $i_{gr}$ . Las funciones que describen estos tipos de ruido son:

$$\overline{i_{tc}^2} = 4KT\Delta F \tag{12}$$

$$\overline{i_d^2} = 2q(I_D + i_{ph})\Delta f \tag{13}$$

$$\overline{i_{rc}^2} = \frac{K_f I_D^2 \Delta f}{f} \tag{14}$$

La corriente  $i_{gr}$  presenta una espectro-densidad de ruido blanco *gaussiano* [13]. Este transductor es un elemento muy importante, por ser un detector y transmisor de información que puede ser caracterizado mediante la realización de una serie de mediciones [17], a saber: la relación señal/ruido (S/R), la mínima señal detectable y la sensibilidad de captación.

**4. Atenuación del ruido en la señal Kerr**

La atenuación se puede realizar si se emplean *hardware* o *software*. Se pretende reducir el ruido en la señal Kerr empleando técnicas basadas en la transformada *wavelet* que han mostrado una mejor estimación de la señal sin ruido; posteriormente, se observa si la señal Kerr mejora.

**4.1. Atenuación por hardware**

En el MEK convencional para minimizar la relación señal/ruido se puede usar un sistema de detección de fase. Este sistema consta de un *chopper* que modula mecánicamente la señal luminosa a una frecuencia determinada; la señal es detectada y amplificada

por un *lock-in*, que debe sintonizarse a la misma frecuencia; para ello los experimentadores cuentan con diferentes tipos de montaje.

En el MEK convencional, Berling *et al.* [18], Wrona *et al.* [19] y Hampton *et al.* [20] recomiendan el sistema compuesto por *chopper* y *lock-in* como una buena alternativa para el mejoramiento de la relación S/R. Por su parte, López *et al.* [21] y Grimsdith y Vavassori en el MOKE de difracción (D-MOKE) [10] plantean el uso de doble fotodetector: el primero toma la señal de referencia después de ser polarizada y la compara con la señal  $I_k$  recibida por el segundo; la diferencia de estas dos señales continúa a la etapa de preproceso. También si se usan dos fotodetectores, Allwod *et al.* [11] plantean el mejoramiento de la relación S/R, ya que localizan ambos detectores después del analizador; por consiguiente, el fotodetector de referencia es puesto después del analizador para generar detección diferencial y compensar el ruido correlacionado.

En el análisis del ruido sobre la señal  $I_k$  realizado en el apartado 3.5 se determinó que las componentes de ruido son de tipo blanco *gaussiano*; en consecuencia, el *denoising* se puede hacer mediante el uso de *wavelets* [22].

## 4.2. Atenuación mediante software con *wavelets*

### 4.2.1. Reducción de ruido óptico

Se trata de disminuir el ruido inherente a la adquisición de la señal por parte del fotodetector; este ruido es producido en el proceso de generación de la fotocorriente luego de la captación de fotones. Se pretende reducirlo usando técnicas basadas en la transformada *wavelet*, las cuales han mostrado una onda mejor de la señal sin ruido; para posteriormente realizar el procesamiento de la señal.

### 4.2.2. Modelo

En la reducción de ruido óptico se busca encontrar una aproximación cercana a los valores  $x_n$  de  $y_n$ , dado el siguiente modelo:

$$y_n = x_n + \eta_n \quad n = 1, \dots, N \quad (15)$$

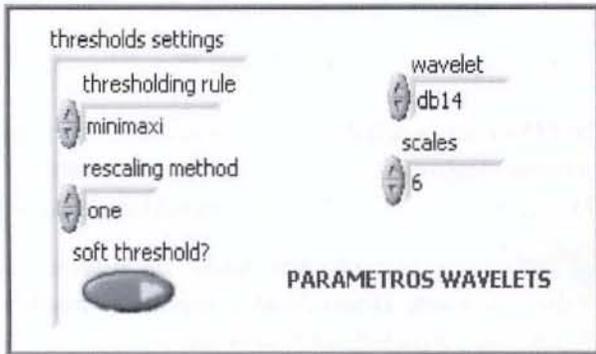
En (15)  $x$  es la señal sin perturbaciones,  $\eta$  es un proceso aleatorio blanco *gaussiano* con media  $\mu = 0$  y varianza  $\sigma = 1$ , y  $N$  es la longitud de la señal.

La reducción de ruido por medio de *wavelet* se realiza mediante el uso de algoritmos que pueden clasificarse en métodos lineales o no lineales de reducción de ruido. Los lineales sólo eliminan el ruido en una escala determinada; los no lineales asumen que el ruido se encuentra en todos los coeficientes y está distribuido sobre todas las escalas, atendiendo a tal distribución.

Para llevar a cabo la operación de filtrado los métodos no lineales asumen dos formas: la de umbral duro (*hard threshold*) y la suave (*soft threshold*); la segunda es una extensión de la primera. Ambas desarrollan un barrido sobre todos los coeficientes de cada nivel; para hacerlo se debe seleccionar un valor umbral. En el caso del umbral duro, serán eliminados los coeficientes analizados menores que el umbral; en el otro caso, los coeficientes mayores al valor umbral se atenúan en un factor determinado y los menores se suprimen.

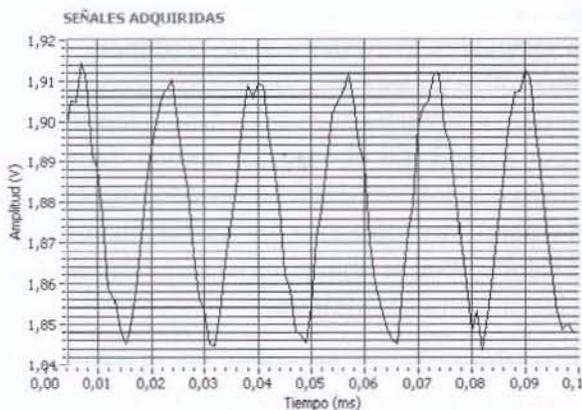
A continuación, se presentan los algoritmos de filtrado con *wavelets*; Minimax, Algoritmo Fixed from threshold, Algoritmo Rigorous SURE y el Heuristic SURE. Con el uso de *wavelets* se debe tener especial cuidado con la longitud de las muestras y la onda madre seleccionada. Generalmente, si se selecciona un espacio de muestras muy grande, además del ruido el filtrado tiende a suprimir componentes de interés.

Para la reducción de ruido por medio de *wavelets* fue empleado el filtro *denoising* simple de LabView, que cuenta con cuatro parámetros de entrada.



**Gráfica 1.** Parámetros del filtro *denoising* simple por *wavelets*

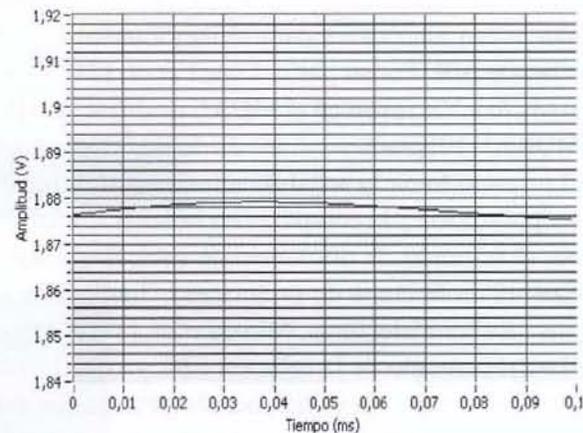
La combinación de tales parámetros depende del tipo de señal que se va a tratar. En este caso se obtuvieron buenos resultados con la combinación presentada en la figura 4; ellos son los siguientes:



**Gráfica 2.** Señal luminica transducida por el fotodetectos. (V versus t)

En la gráfica 2 se presenta la señal captada por el fotodetector. Ésta es transducida a una señal de voltaje que presenta distorsiones debidas a los tipos de ruido expresados en el apartado 3.2. La señal es procesada mediante *de-noise* por *wavelet*. Como resultado se obtiene la señal expuesta en la gráfica 3, que es mucho más suave en su forma, puesto que conserva el promedio de la señal; esto demuestra el

buen resultado del proceso para una señal óptica. Con la señal filtrada se continúa el proceso de la información captada para entregar como resultado la curva de ángulo Kerr (señal filtrada del fotodetector) contra campo magnético.



**Gráfica 3.** Señal óptica filtrada mediante *de-noise* por *wavelet*

La señal filtrada registró una relación S/R de 29.

## 4. Conclusiones

- Con respecto al MEK convencional, el MEK implementado por medio de procesamiento con *wavelets* es más fácil de implementar y más económico, dada la ausencia del *chopper* y el *lock-in*.
- Con respecto a los dos tipos de montajes por comparación de haz (D-MOKE y Durham MEK), el MEK implementado por medio de procesamiento con *wavelets* es más versátil, gracias al uso de un solo fotodetector. Asimismo, requiere de menor cantidad de elementos para el preprocesamiento de la señal, dado que no cuenta con etapas de comparación.
- Es necesario que los criterios de diseño para el proceso de instrumentación y control del MEK sean definidos y documentados, para facilitar futuras implementaciones para realizar en laboratorios interesados.

## Referencias bibliográficas

- [1] Faraday, M. (1846). *On the Magnetization of Light and the Illumination of Magnetic Lines of Force*. Trans. Roy. Soc, 5:592.
- [2] Kerr, J. (1877). *Philos. Mag*, 3:339.
- [3] Kerr, J. (1878). *Philos. Mag*, 5:161.
- [4] Argyres, P.N. (1955). "Theory of the Faraday and Kerr Effects in Ferromagnetics". *Physical Review*, Vol. 97 (2), pp. 334-345.
- [5] Moog, R y Bader, S. (1985). *Superlattices Microstruct.* 1. p 543.
- [6] Bonette, H. (2002). *O magnetômetro a efeito Kerr e o filme fino de Co/Si*. Universidad Estadual de Campinas, p. 40.
- [7] Ding, H, Putter, S, Oepen, H. and J, Kirschner. (2000). "Experimental Method for Separating Longitudinal and Polar Kerr Signals". *Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 212 (5).
- [8] Qiu, Z. and Bader, S. (1999). "Surface Magneto-optic Kerr Effects (SMOKE)". *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 200, pp. 664-678.
- [9] Qiu, Z. and Bader, S. (2000). "Surface Magneto-optic Kerr Effect". *Review Scientific Instruments*, Vol. 71 (3), pp. 910-913.
- [10] Grimsditch, M and Vavassori, P. (2004). *The Diffracted Magneto-optical Kerr Effect: What does it Tell You?* Phys. Condens. Matter, Vol. 16, pp. R275-R294.
- [11] Allwood, D, Xiong, G, Cooke, M. y Cowbur, R. (2003). *Magneto-Optical Kerr Effect Analysis of Magnetic Nanostructures*. Appl. Phy, 36:2175-2182, 2003.
- [12] Chun-Yeol, Y. and Sung-Chul, S. "Effects of Polarizer and Analyzer Imperfections in a Magneto-Optical Kerr Spectrometer". *Optical Society of America B*, Vol. 17 (6).
- [13] Meyer, G., Creselius, T., Kaindl, G and Bauer. (2002) *A Versatile UHV System for Combined Far- and Near-Field Magneto-optical Microscopy of Thin Films*. M.M.M, Vol. 240, pp. 6-78.
- [14] W. Marshall. L. (2001). *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook*. CRC Press LLC, Ch. Noise Measurement, p. 1150.
- [15] Kazaa, A. (1994). *Transducer and their Elements. Design and Applications*. Prentice Hall, p. 572.
- [16] Kasap, O. S.(2001). *Optoelectronics and Photonics, Principles and Practices*. Prentice Hall, p. 340.
- [17] Saleh, E. B and Teich, C. M. (1991). *Fundamentals of Photonics*. Willey Interscience, p. 965.
- [18] D. Berling, R. G. G. Zabrocki, S. Stephan, L. Bubendorff, A. Mehdaoui, and D. Bolmond. (2006). *Accurate Measurement of In-plane Magnetic Anisotropy Energy Function  $E(\theta)$  in Ultrathin Films by Magneto-Optics*. M.M.M, Vol. 297, pp. 118-140.
- [19] Wrona, J, Stobiecki, T, Czapkiewicz, R, Slezak, T, Korecki, J, and Kim. (2004). *C. R-VSM and MOKE Magnetometers for Nanostructures*. M.M.M, Vol. 272, pp. 2294-2295.
- [20] Hampton, J, Martínez, J. and Abruña, A. (2002). "Development of a Versatile Smoke System with Electrochemical Applications". *Review of Scientific Instruments*, Vol. 73 (8), pp. 3018-3021.
- [21] López, J., Reyes, B., Tobón, L., Henao, R., Grimsditchd, M., Morales, A. y Osorio, J. (2005). "Montaje y calibración de un Sistema de Efecto Kerr magneto-óptico". *Revista Colombiana de Física*, Vol. 37 (2), pp. 384-388.
- [22] Jansen, M. (2001). *Noise Reduction by Wavelet Thresholding*. Springer, p 193.