

CONSTRUCCIÓN DE UN MAGNETÓMETRO DE EFECTO KERR DE BAJO COSTO PARA LA CARACTERIZACIÓN MAGNÉTICA DE PELÍCULAS DELGADAS MAGNÉTICAS

Jorge Iván Ochoa Gómez ¹, Ana María Cárdenas Soto ²

¹Jorge Iván Ochoa Gómez, jorge8agomez@gmail.com. Estudiante de Ingeniería Electrónica, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

²Ana María Cárdenas Soto, ana.cardena@gmail.com. PhD. Profesora de Planta Departamento de Ingeniería Electrónica, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

RESUMEN

El propósito de este artículo es presentar la construcción y validación de un magnetómetro de efecto Kerr, construido con el fin de fomentar la investigación en torno a las propiedades magnéticas de las películas delgadas magnéticas. Un magnetómetro de efecto Kerr convencional utiliza un amplificador Lock-in para detectar los cambios en la señal Kerr. En este trabajo se presenta la construcción de un magnetómetro de efecto Kerr utilizando amplificadores de instrumentación y de transimpedancia, evitando el uso de un amplificador Lock-in el cual tiene un alto costo económico.

Palabras clave: Efecto Kerr magneto-óptico, Magnetismo en Películas Delgadas, Bucle de Histéresis.

Recibido: 20 de agosto de 2013.

Aceptado: 20 de noviembre de 2013.

Received: August 20th, 2013.

Accepted: November 20th, 2013.

CONSTRUCTION OF A LOW COST KERR EFFECT MAGNETOMETER FOR THE MAGNETIC CHARACTERIZATION OF MAGNETIC THIN FILMS

ABSTRACT

The purpose of this article is to describe the development and validation of a Kerr effect magnetometer, built in order to promote the research on the magnetic properties of magnetic thin films. A conventional Kerr effect magnetometer uses a lock-in amplifier to detect changes in the Kerr signal. The construction of a Kerr effect magnetometer using instrumentation and transimpedance amplifiers is presented, avoiding the use of a lock-in amplifier which has a high economic cost.

Keywords: Magneto-optical Kerr effect, Magnetism in Thin Films, hysteresis loop.

1. INTRODUCCIÓN

Recientemente ha habido un notable interés en las películas delgadas magnéticas, las cuales, debido a su capacidad para reorientar sus dipolos magnéticos, han sido de gran utilidad para el desarrollo científico y tecnológico durante los últimos treinta años. Éstas pueden ser utilizadas para la fabricación de dispositivos de almacenamiento masivo de información (discos duros), modulación de la luz en comunicaciones ópticas, fabricación de sensores magnéticos, entre otras aplicaciones [1], [2].

El efecto Kerr magneto-óptico (MOKE) ha sido ampliamente utilizado para estudiar las propiedades magnéticas de películas delgadas e incluso, de sistemas magnéticos reducidos (nanoestructuras). Esta técnica ha tenido gran acogida ya que es relativamente fácil de implementar y además, es de carácter no invasivo ni destructivo [3].

Inicialmente se introduce brevemente el efecto Kerr desde un punto de vista conceptual y teórico. Se presenta un esquema general de lo que es un magnetómetro de efecto Kerr y se identifican cada una de sus partes. Se muestran los aspectos más relevantes de la construcción y ensamble del equipo. Finalmente se realiza una validación experimental teniendo como referente medidas realizadas en el módulo VSM del PPMS del Grupo de Estado Sólido de la Universidad de Antioquia.

2. EFECTO KERR MAGNETO-ÓPTICO

Cuando un rayo de luz con polarización lineal, ya sea paralela o perpendicular (p y s respectivamente) incide sobre un material no magnetizado ($M = 0$), el rayo de luz reflejado tiene la misma polarización del rayo incidente.

En el caso en que la muestra esté magnetizada ($M \neq 0$), el rayo de luz reflejado sufre una rotación en el plano de polarización (Fig.1), por lo tanto el rayo de luz que se refleja tiene una componente adicional de campo eléctrico. A esta rotación en el plano de polarización la llamamos rotación Kerr (θ_K), debido a que es resultado de este efecto. Estos cambios en la polarización se manifiestan como cambios en la intensidad de la luz reflejada,

de esta forma tenemos una medida indirecta de la magnetización superficial de la muestra.

Desde un punto de vista macroscópico el efecto Kerr magneto-óptico se describe haciendo uso de la teoría de reflexión de Fresnel, mediante la relación de las amplitudes del campo eléctrico de la onda reflejada e incidente. Esta relación se presenta en términos de la matriz de reflexión de Fresnel [4]:

$$\begin{pmatrix} E_p^r \\ E_s^r \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} E_p^i \\ E_s^i \end{pmatrix}$$

En donde

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

Los subíndices i y r hacen referencia a la onda incidente y reflejada respectivamente, los subíndices p y s definen los componentes del campo eléctrico paralelo y perpendicular al plano de reflexión.

Para el cálculo de estos índices es importante tener en cuenta las condiciones de frontera entre los dos medios materiales en donde se desplaza la onda.

Debido al carácter experimental de este artículo se recomienda al lector revisar la referencia [5] para un análisis teórico más profundo.

Existen tres posibles configuraciones experimentales para la magnetización: polar, transversal y longitudinal (Fig.2). Para el caso polar vemos que la magnetización es perpendicular al plano de la interfaz y paralelo al plano de incidencia. En el caso longitudinal la magnetización es paralela a la superficie y al plano de incidencia. En el caso transversal la magnetización es paralela a la superficie y perpendicular al plano de incidencia de la luz [6].

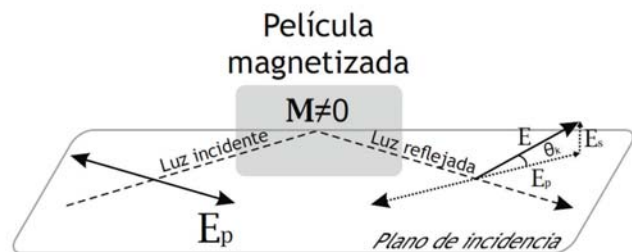


Figura.1. Rotación del plano de polarización debido al efecto Kerr.

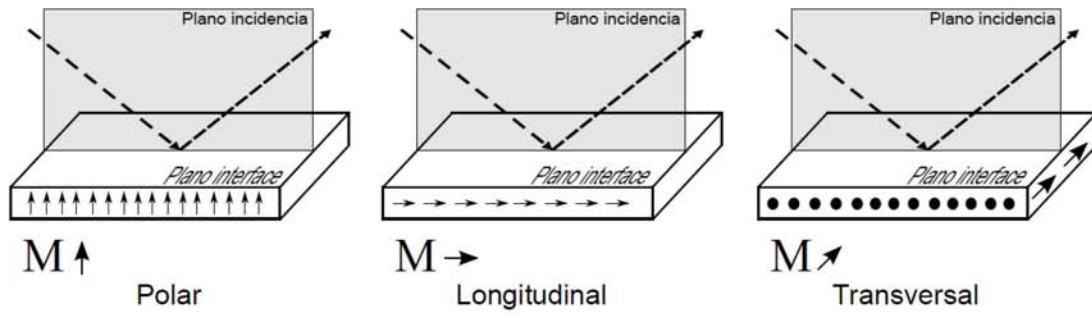


Figura 2. Diferentes tipos de configuración para la magnetización.

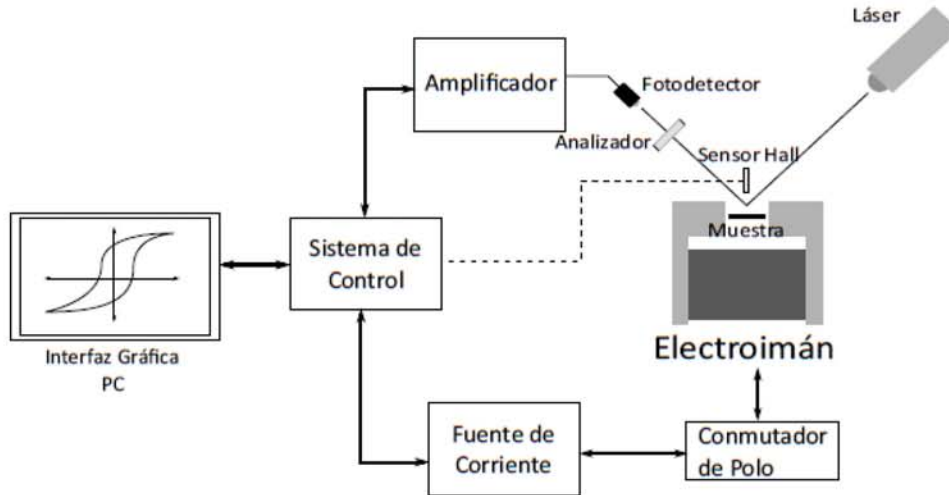


Figura 3. Diagrama de Bloques del magnetómetro Kerr.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

En la Fig.3 vemos el diagrama de bloques del magnetómetro.

En general, estas son las partes que componen un magnetómetro de efecto Kerr. Encontramos algunas variaciones en la parte óptica del equipo, ya que algunos diseños utilizan un fotodiodo extra para tomar una señal de referencia, previa a la reflexión sobre la muestra magnética [7] [8].

El montaje presentado en este artículo se basa en los diseños implementados en [9] y [10].

3.1 Montaje óptico

Láser: se utilizó un láser de Helio-neón, polarizado linealmente y de 20mW de potencia que permite graduar fácilmente el ángulo de incidencia sobre la película magnética.

Antes de realizar medidas el láser se deja estabilizar aproximadamente durante una hora,

esto para asegurar que la intensidad sea constante. Se puede rotar el láser para elegir el tipo de polarización incidente, ya sea paralela o perpendicular al plano de incidencia.

Analizador: se utilizó como analizador un polarizador de pantalla de celular. Los polarizadores que incluyen estas pantallas eliminan considerablemente los reflejos que se producen en la superficie reflectora.

3.2 Electrónica del equipo

Electroimán: el campo magnético es generado por un electroimán de núcleo de hierro, que consta de 4500 espiras de alambre de cobre calibre 22 y se alimenta con una fuente de corriente continua. La fuente de corriente ha sido acoplada a un motor de paso, de tal forma que se pueda incrementar o decrementar el voltaje a través un microprocesador (Fig.4).



Figura 4. Fuente de corriente adaptada para el MOKE.

Bus DC: para evitar fluctuaciones en el campo magnético generado por el electroimán, se acoplo a la salida de la fuente un Bus DC. Este dispositivo consiste en un arreglo de capacitores en paralelo que se encargan de mantener estable la señal de voltaje que alimenta al electroimán, de esta manera se logró estabilizar el campo magnético generado. Podemos ver la señal de voltaje antes y después de colocar el Bus Dc Figuras 5 y 6.

Conmutador de Polo: para poder realizar una inversión en el sentido del campo magnético, se construyó un sistema de conmutación de polos. Este sistema consta de un par de relés electromecánicos que se encargan de invertir el sentido de la corriente que fluye por el electroimán. En el momento en que la fuente tiene un valor de voltaje igual a cero, un microcontrolador activa una señal de conmutación provocando una inversión en el sentido del campo magnético aplicado. Los relés son activados con un voltaje de 12V y soportan una corriente máxima de 12A.

Fotodetectores: la señal de luz reflejada por la muestra magnética se mide con un fotodetector de Silicio de referencia VTB6061H, el cual posee un amplio rango de respuesta espectral comprendido desde los 320 nm hasta los 1100 nm, teniendo su pico máximo en 920 nm. Este fotodiodo tiene como impedancia de salida un valor de $100\ M\ \Omega$.

Se realizó una caracterización de la corriente que genera el fotodiodo en función de la potencia incidente. La variación en potencia se logró variando la distancia entre el sensor y una fuente luminosa. El fotodiodo presenta una relación lineal

entre la corriente de salida y la potencia incidente (Fig.7).

Sistema de amplificación de la señal Kerr: para amplificar la señal Kerr, se utilizó una cadena de amplificación en cascada (Fig.8). El sensor óptico recibe la luz que se refleja desde la muestra magnética y la convierte en una señal de corriente, como esta señal es de muy baja intensidad (del orden de 10^{-9} Amperios) es amplificada utilizando un amplificador conversor de corriente a voltaje, entregando a la salida un voltaje que es proporcional a la corriente de entrada. Finalmente se utiliza un amplificador diferencial para restarle a la señal un *offset* de voltaje y acondicionarla para el envío a través del conversor análogo digital.

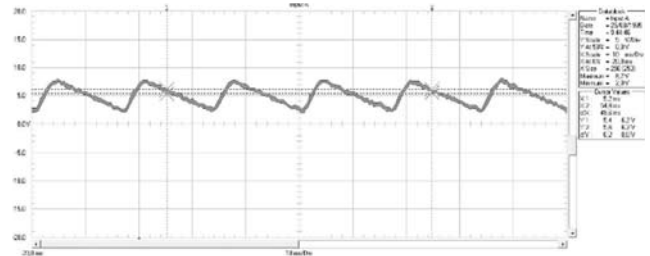


Figura 5. Señal de voltaje en ausencia del Bus DC.

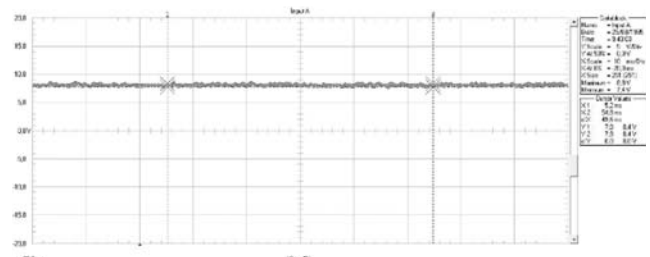


Figura 6. Estabilización del voltaje utilizando el Bus DC.

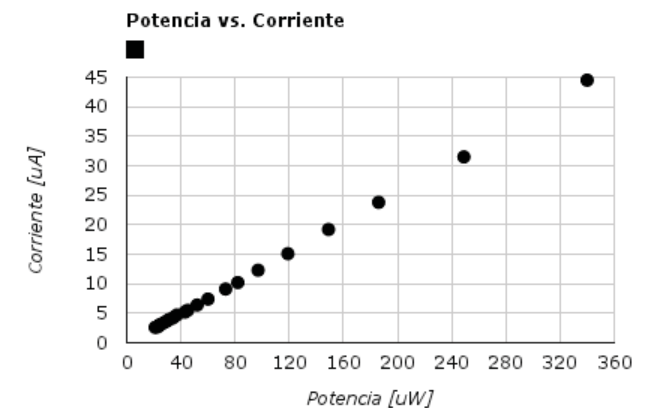


Figura 7. Relación lineal entre la corriente y la potencia incidente.

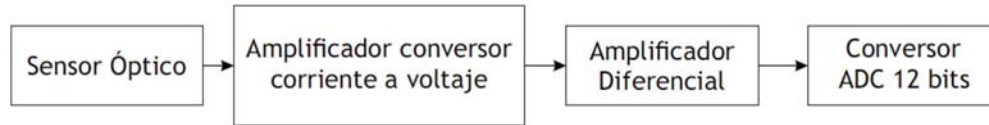


Figura 8. Sistema de amplificación en cascada.

Convertor Análogo-Digital: la señal Kerr es una señal de voltaje, ésta es digitalizada utilizando un sistema desarrollado con la plataforma Arduino, específicamente la versión DUE. Se utilizó el convertor análogo-digital de 12 bits incorporado dentro del sistema de desarrollo. Teniendo un voltaje de operación de 3.3V, una conversión de 12 bits da una resolución de 0.8mV. Con esta resolución se pueden detectar cambios pequeños en la señal Kerr.

3.3 Interfaz de usuario

Programa para el control del magnetómetro: para la visualización y almacenamiento de los datos se realizó una interfaz gráfica en Lazarus (Fig.9). Lazarus es una plataforma de filosofía Open Source, para la programación orientada a objetos basada en Pascal y Delphi. Esta herramienta ofrece grandes prestaciones para el diseño de software que involucre tareas de comunicación con hardware.

La comunicación se realiza mediante protocolo serial utilizando un convertor Serial/USB integrado en la plataforma Arduino, a una velocidad de 115200 Baudios, suficiente para el envío de datos sin pérdida. Los datos que se reciben se almacenan con un formato especial para su posterior lectura en plataformas como: Excel, OriginLab y RStudio. Antes de iniciar la toma de datos se guarda el archivo con extensión *.txt* en el lugar que el usuario desee. El software cuenta con dos paneles de visualización en donde se observa la intensidad del láser con respecto al tiempo y también podemos ver el bucle de histéresis obtenido.

4. RESULTADOS

4.1 Calibración del Equipo

Para la calibración del equipo se contó con el apoyo del Grupo de Estado Sólido del Instituto de Física de la Universidad de Antioquia. Se realizaron medidas a temperatura ambiente de los bucles de histéresis de dos muestras magnéticas en forma de

película delgada, haciendo uso del módulo VSM (Vibrating sample magnetometer) del PPMS (Physical Property Measurement System, Fig.10). Estas medidas se compararon con las obtenidas por medio del magnetómetro Kerr construido con este trabajo (Fig.11).

El VSM realiza una medida de la magnetización de la muestra a nivel volumétrico, a diferencia del MOKE que la realiza a nivel superficial. El eje horizontal que representa el campo magnético aplicado puede ser comparado de forma cuantitativa en ambas técnicas. Con el eje vertical no hay forma de realizar una comparación cuantitativa debido a que el MOKE es sensible a la luz que se refleja desde la muestra, la cual es un parámetro que no se puede controlar sin alterar físicamente la muestra.

El VSM tiene la capacidad de realizar medidas de magnetización en unidades reales de magnetización [emu] en tanto que el MOKE realiza las medidas en unidades arbitrarias, por lo tanto se realizará una comparación entre los ejes verticales solo en términos cualitativos.

Todas las medidas con el MOKE fueron realizadas a temperatura ambiente, en un cuarto oscuro, utilizando polarización -p y a un ángulo de incidencia de 40° con respecto a la normal de la muestra. Con respecto a las medidas con PPMS también fueron realizadas a temperatura ambiente.

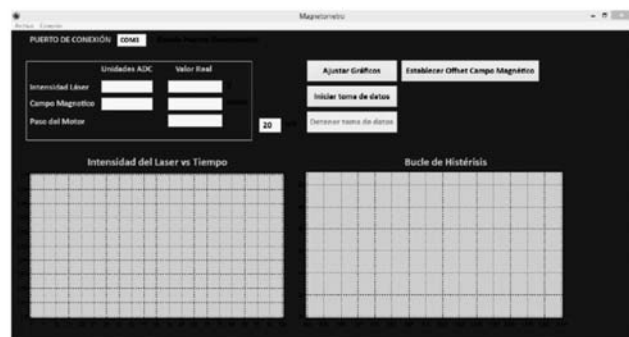


Figura 9. Interfaz de usuario diseñada en Lazarus.



Figura 10. PPMS del Grupo de Estado Sólido.

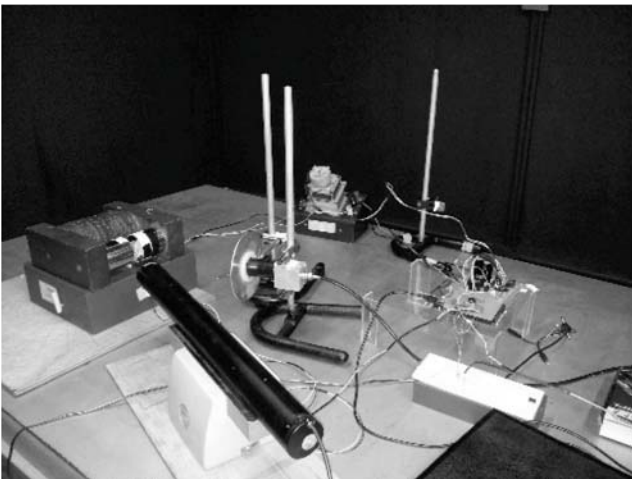


Figura 11. Magnetómetro de efecto Kerr MOKE.

4.1.1 Medidas obtenidas con la muestra de Permalloy

Las muestras de Permalloyd son ampliamente conocidas dentro del campo de la magnetometría, por esta razón se incluyen como punto de partida para la validación del MOKE. El Permalloy es una aleación entre Hierro y Niquel (20% de Hierro y 80% de Niquel). Éste es un material magnético blando, por lo tanto, valores para el campo coercitivo de películas delgadas de este material se reportan entre los 5 y 50 Gauss [11]. Se realizaron medidas usando MOKE y VSM sobre una película de Permalloyd de 200 nm de espesor, podemos observar la similitud de ambos ciclos en las figuras 12 y 13. Se observa en ambas medidas que esta muestra llega a su saturación magnética muy rápidamente.

Medida realizada usando el Moke

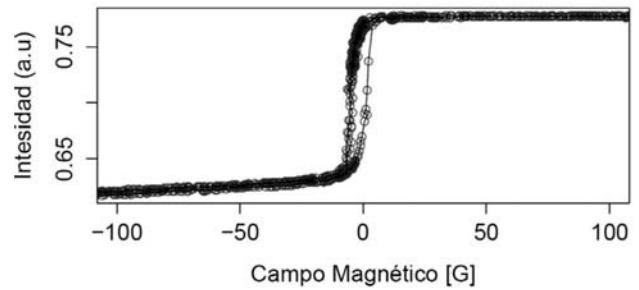


Figura 12. Bucle de histéresis de la muestra de Permalloy (MOKE).

Medida realizada usando el PPMS

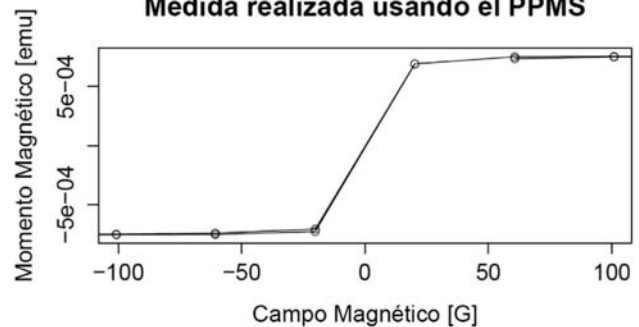


Figura 13. Bucle de histéresis de la muestra de Permalloy (PPMS).

La medida realizada con el MOKE presenta mayor resolución debido a que se hicieron incrementos más finos en el campo magnético aplicado. La medida con el PPMS fue realizada con pasos de 50 Gauss, por este motivo no se ven datos en medio del ciclo de histéresis.

4.1.2 Medidas obtenidas con la muestra de cuchilla

Fue necesario aplicar campos magnéticos de ± 1000 Gauss para analizar las propiedades magnéticas de esta muestra, la cual es una muestra de acero de 0.4 mm de espesor. En la figuras 14 y 15 podemos ver las gráficas obtenidas mediante ambas técnicas. Se observa que ambas figuras presentan un comportamiento cualitativo similar, pero la medida realizada con el VSM presenta mayor resolución para este tipo de muestra. Es posible que esto sea a causa del espesor de la muestra, ya que el VSM puede realizar una medida de la magnetización a nivel volumétrico. Se observa que las medidas realizadas con el MOKE son más sensibles cuando la muestra es de menor espesor, esto se debe a que a medida que se reduce el espesor de la

muestra el comportamiento físico a nivel superficial se hace más significativo.

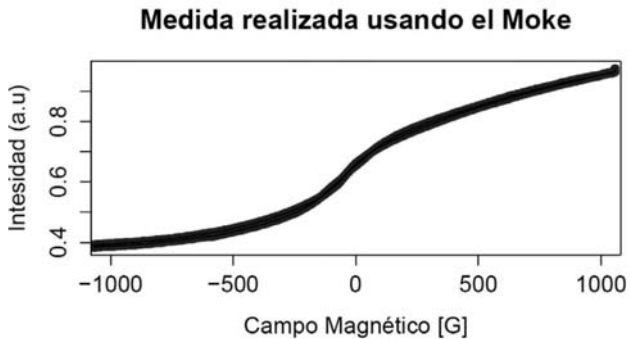


Figura 14. Bucle de histéresis de la muestra de cuchilla (MOKE).

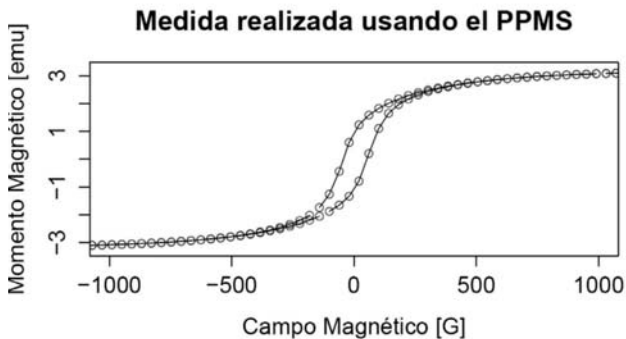


Figura 15. Bucle de histéresis de la muestra de cuchilla (PPMS).

5. CONCLUSIONES

Se logró implementar un magnetómetro de efecto Kerr a un bajo costo económico, comparado con otros sistemas de magnetometría, como por ejemplo el módulo VSM del PPMS. Este sistema puede ser implementado en cualquier laboratorio de física universitario, abriendo las puertas al campo de la investigación en temas relacionados con magnetismo en películas delgadas magnéticas.

6. AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer al CODI de la Universidad de Antioquia por financiar este proyecto, el cual hace parte del programa de apoyo a trabajos de grado. Proyecto No. PR12-2-04.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Freiser, M.J., A Survey of magetooptic Effects, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. IV, Num. 2, 159, 1968.
- [2] Talmadge, J.M., Anomalous magneto-optical Kerr effect in 1-80 nm $Fe_{21}Ni_{79}$ films, Lasers and Electro-Optics Society, Vol. I, 53-54, 2004.
- [3] Grimsditch, M., The diffracted magneto-optic Kerr effect: what does it tell you? Journal of Physics: Condensed Matter, Num. 16, 275-294, 2004.
- [4] Torres, J.I., Efecto Kerr Magneto-óptico antecedentes y aplicaciones, Scientia Et Technica, Vol. XII, Num. 32, 437-442, 2006.
- [5] Qiu, Z.Q., Surface magneto-optic Kerr effect (SMOKE), Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Num. 200, 664-678, 1999.
- [6] Morley, N.A., MOKE hysteresis loop method of determining the anisotropy constants of ferromagnetic thin films: fe on GaAs(1 0 0) with overlayers of Au and Cr, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Num. 300, 436-444, 2006.
- [7] Postava, K., Magneto-optical measurements of magnetization reversal in nanometer scale sputtered Fe thin films, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Num. 163, 8-20, 1996.
- [8] Postava, K., Transverse magneto-optical Kerr effect measured using phase modulation, Journal of European optical society, Rapid publications 1, 06017, 2006.
- [9] Lehnert, A., High resolution in situ magneto-optic Kerr effect and scanning tunnelling microscopy setup with all optical components in UHV, Review of scientific instruments, Num. 80, 023902, 2009.
- [10] Puppín, E., A focused magneto-optical Kerr magnetometer for Barkhausen jump observations, Review of scientific instruments, Vol. 71, Num. 4, 1752-1755, 2000.
- [11] López, J., Montaje y calibración de un Sistema de efecto Kerr magneto-óptico, Revista Colombiana de Física, Vol. 37, Num. 2, 384-388, 2005.