

## EFFECTO KERR MAGNETOÓPTICO ANTECEDENTES Y APLICACIONES

### RESUMEN

En este artículo se presenta una revisión del estado del arte del efecto Kerr magnetoóptico, tanto desde su origen como desde una perspectiva fenomenológica. Se consideran varias alternativas de implementación desde el punto de vista de la instrumentación, junto con algunas de sus aplicaciones prácticas. El magnetómetro Kerr se compara con algunas técnicas conocidas orientadas al estudio de nuevos materiales magnéticos de proporciones micrométricas y nanométricas. Además, se reportan los grupos de investigación nacionales que actualmente trabajan al rededor del efecto Kerr magnetoóptico.

**PALABRAS CLAVES:** Magnetoóptico, Kerr, magnetómetro, materiales.

### ABSTRACT

*This article presents a state of art review of the magneto-optic Kerr effect from its origin and from a phenomenological perspective as well. An implementation description of the aforementioned effect is also considered, namely the Kerr magnetometer. Different setup alternatives of the Kerr magnetometer are analyzed from the instrumentation point of view, together with some of its practical applications. The Kerr magnetometer is contrasted to some other well known techniques oriented to the characterization of new magnetic materials of micrometric and nanometric proportions. Besides, national research groups involved in magneto-optic Kerr effect applications are listed..*

**KEYWORDS:** Magneto-optic, Kerr, magnetometer, materials.

### 1. INTRODUCCIÓN

Los efectos magnetoópticos han sido aplicados recientemente a películas delgadas, pero su historia comienza a mediados del siglo XIX con el descubrimiento del efecto magnetoóptico de Michael Faraday. Tanto Faraday como John Kerr, a mediados de 1800, desarrollaron muchos experimentos en los cuales estudiaron la polarización de la luz en la transmisión y reflexión a través de medios no magnetizados. La comprensión teórica de los efectos de Faraday y Kerr contribuyen al entendimiento general de los fenómenos magnetoópticos. El uso del efecto Kerr magnetoóptico en el estudio de las propiedades magnéticas de materiales, ya sean para emplearse en almacenamiento de información, análisis de semiconductores y construcción de máquinas eléctricas, es una opción muy versátil y de bajo costo, que se presenta como una herramienta muy útil en el estudio de nuevos materiales magnéticos. Las aplicaciones del efecto Kerr magnetoóptico se realizan por medio del magnetómetro Kerr, que presenta como resultado de su proceso una curva de histéresis del material analizado. En la actualidad se encuentra poca documentación sobre los tipos de ruido implícitos en las señales, del análisis de las características de la señal óptica que se obtiene 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.

### JAVIER IGNACIO TORRES O.

Ingeniero electricista.  
Profesor Departamento de Física  
Universidad Tecnológica de Pereira  
oscuru@utp.edu.co

### 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Un efecto óptico que exhiba 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 denomina efecto magnetoóptico. Este efecto tiene un papel preponderante en el desempeño de la electrodinámica clásica, y demuestran un fuerte indicio de la naturaleza electromagnética de la luz [1].

#### 2.1. Origen y desarrollo del Efecto Kerr magnetoóptico.

A principios del siglo XIX varios físicos procuraban descubrir la relación entre la luz y las fuerzas conocidas en ese momento. Indicios preliminares llevaron a pensar que la interacción sería más evidente con campos eléctricos que magnéticos [1]. El primer efecto magnetoóptico lo descubrió Michael Faraday en septiembre de 1845 [2]. Faraday formuló que el efecto de un campo magnético aplicado a un cristal por el cual pasa luz (transmisión) es la rotación del plano de polarización de esta. Subsecuentemente experimentó con la reflexión de la luz en superficies metálicas dentro de un campo magnético, pero no obtuvo resultados por las imperfecciones del material [3]. El primero en ofrecer una explicación microscópica a este efecto magnetoóptico de Faraday fue William Thompson (Lord Kelvin) en 1856 [4]. En 1873 Maxwell presentó proposiciones adicionales en busca de la explicación del citado efecto [5] y propuso la primera explicación desde el plano macroscópico. Él expresó que la luz polarizada linealmente puede expresarse como una superposición de

dos componentes de polarización, dos modos circulares que presentan velocidades de propagación diferentes y por ende, índices de propagación distintos para cada una de las componentes de polarización [1], [3], lo que se conoce como birrefringencia circular. Treinta y dos años después del descubrimiento de Faraday, en (1877), el reverendo John Kerr descubrió un fenómeno equivalente al efecto Faraday, pero asociado a la reflexión, cuando examinaba la polarización de la luz al ser reflejada por una superficie pulida inmersa en un campo magnético, llamado efecto Kerr magnetoóptico [6], [7].

Estos dos son algunos de los efectos más importantes en magnetoóptica. La primera descripción teórica desde el punto de vista cuántico del efecto Kerr magnetoóptico y otros efectos magnetoópticos la formuló Hulme, en 1932 [1], [4]. Hulme desarrolló cálculos de dos índices de refracción (polarización R y L, derecha e izquierda respectivamente) basado en el modelo de un ferromagneto de Heisenberg y la fórmula de dispersión Kramers-Heisenberg [4]. Él planteó que la dependencia que la constante dieléctrica presenta respecto del espín es consecuencia del acople espín-órbita, es decir, el acoplamiento entre el espín del electrón y el movimiento del mismo. Esta interacción resulta de la relación de la partícula con el campo magnético que esta experimenta a medida que se traslada a través del campo eléctrico del medio. Este enfoque indica que el índice de refracción se da en términos de la autoenergía y los elementos de la matriz del operador momentum dipolar, con respecto a las funciones propias del sistema. Hulme se preocupó por el desdoblamiento de los niveles energéticos, debido a la interacción espín-órbita. De otro lado, despreció la función de onda debido a la interacción espín-órbita. Pero esta teoría fue insatisfactoria. [1], [4] Una aproximación más exacta fue expuesta por Kittel en 1951. Kittel mostró que era necesario considerar las funciones de onda debido al acoplamiento espín-órbita para obtener la presentación correcta de los índices de refracción [1], [4]. Subsecuentemente Argyres, en 1955, presenta un análisis más completo del efecto magnetoóptico en un ferromagneto usando la teoría de perturbación [8]. Este efecto, cuyo acrónimo **MOKE** proviene del inglés (Magneto-Optic Kerr Effect), este término se uso por primera vez en 1955 gracias a Argyres [8]. 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 magnetoóptico* al estudio de las películas magnéticas delgadas bajo el acrónimo **SMOKE** (*Surface Magneto-Optic Kerr Effect*) [9], entendiéndose por películas delgadas superficies con espesores del orden de los nanómetros. El trabajo experimental de estos pioneros se convirtió en referencia obligada para los futuros investigadores, uniéndose a este grupo el profesor Z. Q. Qiu de la Universidad de Berkeley. Unos años más tarde, en 1990, Zak, Moog y Bader plantean modelos teóricos [10]. Estos modelos usados para muestras de una sola capa han sido utilizados posteriormente por muchos experimentadores. Luego del

modelo de Zak *et al*, se han planteado variaciones a los procedimientos y al modelo matemático inicial del **SMOKE**, como las variaciones expresadas en el 2000 por Ding *et al*, miembros del Max-Planck-Institut de Alemania, que propusieron un modelo experimental, en el cual separan las señales polar y longitudinal [11], y luego lo expuesto por Vinosvský *et al* [12], donde expresan que la aplicación del **SMOKE** a un emparedado de múltiples películas se debe tratar como una suma de contribuciones de las capas individuales. En 2004, Chun y Sung [13] parten de una tesis similar a la expresada por Ding *et al*, donde expresan que: "generalmente el **MOKE** aplicado en sistemas multicapa presenta múltiples reflexiones, las cuales requieren un tratamiento basado en operaciones con matrices de 4X4 en las que se hace necesario el uso de enormes trabajos numéricos y pueden ser desfavorables para algunos experimentos", haciendo el método de Zak *et al* para muestras multicapa intratable. Por tanto plantean un modelo con el cual el de Zak *et al* se puede llevar a uno más fácil. También se desarrollaron modelos mediante los cuales se relacionan los coeficientes de los sistemas matriciales [r] y [t] (matriz de reflexión y transmisión respectivamente) en los efectos magnetoópticos Kerr y Faraday. [14]

**2.2. Efecto Kerr magnetoóptico (MOKE).** En términos generales, a escala microscópica, el efecto Kerr magnetoóptico es debido al acople entre el campo eléctrico de la luz y las funciones de onda del espín del electrón de la muestra; vía interacción espín-órbita[15]. Este acople genera un cambio en la polarización de la luz al ser reflejada, en donde la magnitud del cambio de la polarización es proporcional a la magnetización de la muestra[16], situación que presenta un alto potencial en el análisis de materiales magnéticos.

Una completa descripción fenomenológica del **MOKE** a nivel macroscópico puede ser presentada mediante la teoría de reflexión de Fresnel [1], [11], al relacionar las amplitudes de la onda reflejada con la incidente en términos de la matriz de reflexión de Fresnel [1].

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

donde

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

En esta ecuación los superíndices *i* y *r* denotan las ondas incidentes y reflejadas respectivamente, y los subíndices *p* y *s* definen los componentes de campo eléctrico paralelo y perpendicular al plano de reflexión. Para el cálculo de los coeficientes de la matriz de reflexión de Fresnel asumimos una continuidad en los componentes tangenciales de los campos eléctrico (**E**) y magnético (**H**) para una superficie reflectora (ver figura 1), donde el ángulo  $\theta_1$  es el ángulo incidente y el ángulo  $\theta_2$  de reflexión de la luz incidente.

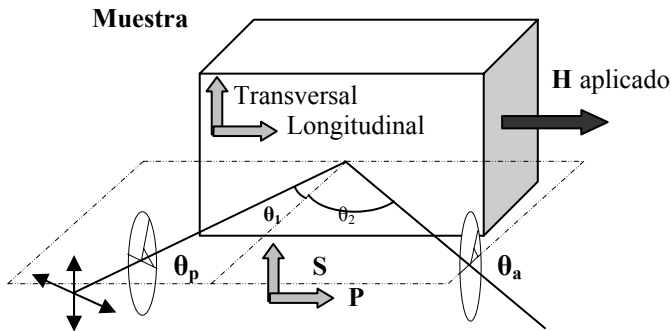


Figura 1. Geometría de magnetización en el efecto Kerr magnetoóptico.

Utilizando las relaciones provenientes de las condiciones de continuidad obtenemos las relaciones entre las amplitudes de los campos eléctrico y magnético, y a través de estas dos definimos los coeficientes de la matriz de reflexión ( $R$ )

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

Los coeficientes de la matriz de reflexión de  $r_{pp}$ ,  $r_{ps}$ ,  $r_{sp}$ ,  $r_{ss}$  se determinan mediante un manejo matemático del tensor dieléctrico ( $\epsilon$ ), ya que las propiedades ópticas de un medio se determinan mediante este tensor, 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 óptimamente el medio [3]. Una forma equivalente utilizada para el tensor de permitividad eléctrica es:

$$\epsilon(M) = \begin{pmatrix} \epsilon_0 & -i\epsilon_0 Q & 0 \\ i\epsilon_0 Q & \epsilon_0 & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Donde  $\epsilon_0$  es independiente de la dirección de la magnetización  $M$ ; y  $Q$  es la constante compleja magnetoóptica que caracteriza el medio. Esta constante puede ser expresada de la formas  $Q = Q_0 e^{-iq}$ , donde la magnitud de  $Q_0$  es linealmente proporcional a la magnetización del material y  $q$  es su fase. Por ejemplo para Fe la magnetización de saturación  $Q_{Fe} = 0.0215^{-i0.073}$ . Una vez que la parte imaginaria es muy pequeña y la parte real es de unas pocas milésimas, podemos expandir  $Q$  y tener apenas términos de primer orden. En términos, generales un campo magnético aplicado  $H$  y los componentes de campo eléctrico ( $E_p^i$ ) y ( $E_s^i$ ) de luz no coinciden en los ejes principales de magnetización [17]. El MOKE también se puede describir en términos de un vector de campo eléctrico, llamado vector de Jones [12], [16], técnica desarrollada en 1941 por Clark Jones.

$$(E) = R \begin{pmatrix} E_{0p} e^{i\phi_p} \\ E_{0s} e^{i\phi_s} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Donde  $\phi_p$  y  $\phi_s$  son las fases de las componentes de la luz horizontal y vertical respectivamente, y los subíndices ( $s$ ) y ( $p$ ) definen los componentes de campo eléctrico paralelo y perpendicular al plano de reflexión.

El resultado de experimentar con el MOKE es un ciclo de *histéresis*  $M-H$  del material al que se le aplica este efecto, siendo esta respuesta un "lenguaje" entendido en todo el mundo. Mediante esta práctica se obtiene rápidamente información cualitativa acerca de las características magnéticas de un material. Este efecto magnetoóptico ha tenido una variedad de usos en el estudio de propiedades magnéticas de materiales para diferentes aplicaciones.

El MOKE se puede dividir en dos regímenes diferentes, relacionados con el espesor del material magnético reflector y la profundidad de penetración de la luz incidente. Cuando el MOKE se aplica a películas delgadas se convierte en SMOKE [3]. En el primero, el espesor de la superficie es mucho mayor que la longitud de penetración y se presentan profundidades de penetración de la luz del orden de 20 nm [18], y en el SMOKE el espesor de la película es del mismo orden o menor que la longitud de penetración, haciéndolo un método muy versátil en la caracterización de muestras delgadas y ultradelgadas, ya que dado el actual desarrollo en el crecimiento de películas delgadas, se presentan superficies de unos pocos nanómetros.

Algunos investigadores, a finales de la década de los 90, reportaron resultados de experimentos basados en el SMOKE con emparedados de películas cuyos espesores individuales estaban entre 1 nm y 6 nm [19]. Estas pruebas se realizaron a temperaturas que variaban de 3-400 K. El SMOKE por su comportamiento intrínseco no presenta limitaciones para pruebas con películas ultradelgadas. Recientemente se encuentran reportes de caracterización magnética a muestras de una sola capa con espesores de 2 y 3 nm [11], [20], y [21]. Es importante tener en cuenta que este efecto presenta tres configuraciones estándar para el montaje experimental: *Polar*, *longitudinal*, y *transversal*.

**2.3. Configuraciones del MOKE.** Estas clasificaciones se establecen por la relación geométrica entre la orientación de la magnetización y el plano de incidencia de la luz. (ver figura 1)

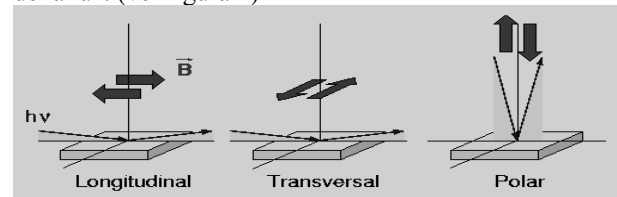


Figura 2. Configuraciones del MOKE según su composición geométrica.<sup>1</sup>

<sup>1</sup><http://www.uam.es/departamentos/ciencias/fismateria/c/especifica/lasua/m/danyela/moke.html>

**2.3.1. Efecto Kerr polar.** En esta configuración el campo magnético es aplicado en dirección normal al plano de la superficie, y la magnetización es paralela a la normal de la superficie. Esta configuración es la que presenta la señal lumínica con orden de magnitud más alto de las tres configuraciones descritas, ya que puede presentar un arco de aproximadamente 20 minutos.

**2.3.2. Efecto Kerr transversal.** El campo está aplicado en dirección axial a la superficie, siendo la incidencia de la luz es perpendicular a la dirección del campo. La magnetización es paralela al plano y perpendicular a la dirección de propagación de la luz.

La incidencia de la luz

**2.3.3 Efecto Kerr longitudinal.** En esta configuración el campo también es aplicado en dirección axial a la superficie, pero la incidencia de la luz es longitudinal a la dirección del campo. La magnetización en esta configuración es paralela tanto a la superficie como al plano de incidencia de la luz.

Las configuraciones longitudinal y transversal pueden presentar un arco de aproximadamente 4 minutos. Estos arcos aumentan cuando el ángulo de incidencia es del orden de  $60^\circ$  [22]. El **SMOKE** polar es insensible al valor del ángulo incidente (para pequeños ángulos) mientras que la configuración longitudinal es linealmente dependiente del ángulo de incidencia. Al incrementar este ángulo, es posible mejorar el **SMOKE** longitudinal, pero no el polar. La configuración longitudinal no existe cuando el ángulo de rotación Kerr es cero (o muy cercano a cero) [17].

### 3. DESCRIPCIÓN DEL MAGNETÓMETRO KERR.

El equipo mediante el cual se desarrollan los experimentos del efecto Kerr magnetoóptico se denomina magnetómetro Kerr (**MEK**). El equipo básico para realizar pruebas por medio del efecto Kerr magnetoóptico consta de tres sets: set óptico, set eléctrico y set de instrumentación y control. Según los criterios de diseño que replanteen se tendrán variaciones en los diferentes sets. Estas variaciones presentan como resultado diferentes tipos de montajes: el **MEK convencional** [3], [4], (**D-MOKE**) MOKE de difracción [23] y el **Durham MEK** [24] que varían su configuración en primera instancia en el set óptico. Estas variaciones se deben a las diferentes maneras con que cuenta el experimentador para tratar el ruido y la relación señal a ruido (S/N), lo que conlleva a variaciones en el set de instrumentación y control.

El set óptico se articula en una superficie estable, no siendo completamente necesario el uso de una mesa antivibratoria si se minimizan las vibraciones ambientales [4]. Como fuente lumínica se puede usar un *diodo láser* de alta estabilidad ( $\sim 0,1$ ) y de baja potencia ( $\sim 1\text{mW}$ ), con longitud de onda entre 400 nm y 850 nm. (según documentación revisada) 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, por medio de los cuales se minimizan problemas asociados a inestabilidades en el

camino óptico. Se usan un par de polarizadores, el primero recibe la señal emitida por el diodo láser, generando una polarización vertical de la señal. El segundo es cruzado por la señal lumínica al ser reflejada por la muestra y recibe el nombre de *analizador*. Además, se puede contar con un *Chopper* que pulsa la señal del láser a una frecuencia específica definida por el experimentador. El *Chopper* está interconectado al *Lock-in* que presenta un filtro ranura operado a igual frecuencia que el *Chopper* (el *Lock-in* forma parte del set de instrumentación). El set eléctrico se conforma por una fuente de corriente y una o dos bobinas, que pueden ser de Helmholtz o electroimanes, que generan el campo magnético externo **H**.

El set de instrumentación y control está compuesto por el control de la fuente de corriente, que se puede realizar por medio de una tarjeta GPIB (General Purpose Interface Bus) más las tarjetas de la fuente, o por medio de una señal de voltaje controlada mediante un potenciómetro digital y un microprocesador; también cuenta con un sensor de campo magnético o una sonda Hall, que monitorea el campo magnético, comunicado con el Pc. En la fuente se debe controlar la inversión de fase, además, el nivel y número de los incrementos en la corriente.

Al plantear la necesidad de definir los criterios para instrumentar y controlar este procedimiento, con el fin de hacerlo más versátil y exacto, se deben conocer los componentes básicos y las ventajas y desventajas de cada uno con respecto a características físicas y de instrumentación. A este montaje básico se le pueden adicionar o quitar elementos. Tales como: *Chopper*, *Lock-in* y *fotodetectores*, con el fin de mejorar las características de la relación S/R de  $I_k$ .

### 4. APLICACIONES DEL MOKE.

La técnica **MOKE/SMOKE** permite evaluar el carácter magnético de un material en una forma rápida y fácil, siendo una técnica no destructiva. La amplia aceptación de esta técnica se debe a que las medidas no sufren interferencia por los sustratos (paramagnéticos) y portamuestras, además de la simplicidad en el montaje y la facilidad para obtener ciclos de histéresis.

El **MOKE** presenta varias líneas o métodos de ejecución, entre los que sobresalen: El *microscopio MOKE*, el *micro MOKE* y el *Bragg-MOKE*. El *microscopio MOKE* es el método más generalizado, este permite resolución de un micrómetro.

Esta técnica magnetoóptica implementada mediante el **MEK** es conveniente para medidas ex situ y es muy importante para realizar medidas in situ, cuando las muestras crecen en una cámara de ultra alto vacío (UHV) [18]. La aplicación del **SMOKE** es ampliamente utilizada en el estudio de películas magnéticas delgadas [3], [4] y [11] y en las dos últimas décadas, para el análisis de propiedades físicas de micro y nanoestructuras magnéticas multicapa, que pueden ser heterogéneas [13], [19] y [25]. Este fenómeno magnetoóptico tiene una variedad de aplicaciones realizables por medio de los

diferentes métodos de ejecución, los cuales son utilizados en la visualización de dominios magnéticos [26], [27], [28] y [29] y caracterización de materiales mediante la medición de: magnetostricción, magnetorresistencia, remanencia magnética, anisotropía [30], susceptibilidad inversa ( $\chi^{-1}$ ) con el **MEK** longitudinal [31], de coercitividad [20], [32] y [33], de permeabilidad [34], análisis de la relación que presenta la frecuencia con la coercitividad por medio del método de magnetización inversa [21], [35], análisis de microestructuras ferromagnéticas impresas por medio del **Bragg-MOKE** [36] y de nanoestructuras magnéticas [23], [24], [36] y [37] o estudio de micromuestras a las que se les adiciona nanopartículas [38]. Estas prácticas son necesarias en el estudio de aplicaciones magnetoelectrónicas como semiconductores magnéticos, sensores magnéticos, y en el desarrollo de métodos para almacenamiento de alta densidad de información mediante discos magnéticos [29], [39]. También, para el análisis de aisladores o materiales para la construcción de máquinas eléctricas.

En las últimas cinco décadas se han desarrollado numerosos métodos mediante variaciones al uso del **MOKE** y el **SMOKE** para la observación de dominios y propiedades magnéticas. En 1997, miembros del National Institute of Standards and Technology, de los EE.UU, reportaron una técnica para microscopía **MOKE** con la cual no es necesaria la aplicación de un campo magnético externo para la extracción de imágenes de contraste magnético *SKEM* (scanning Kerr-effect microscopy) [40]. También a finales de la década del 90, se presenta una nueva variación al **MOKE** que permite realizar mediciones simultáneas; (second-harmonic magneto-optical Kerr effect) *SH-MOKE* [41]. También se tienen los métodos de rotación de campo magnético *ROTMOKE* [42] y *espectroscopía MOKE* [43]. Además, se plantea el uso del **MOKE** como complementario de la espectroscopía [43], [44], de la técnica *Mössbauer* y recientemente, se complementa con las simulaciones micromagnéticas [23], [39] y [45]. En los últimos años, se presenta el **MEK** combinado en el mismo montaje con técnicas como el microscopio de fuerza magnética [46], la visualización óptica de la muestra mediante la cámara CCD [24] y también para análisis *in situ* por medio de la combinación con el interferómetro *SANAG* (Sanag-SNOM) [26], haciendo el **MEK** más eficiente.

## 5. COMPARACIÓN CON OTRAS TÉCNICAS

Son varias las técnicas que entregan información similar a la suministrada por el **MEK**; entre las más comunes se cuentan: la *microscopía de fuerza magnética* (MFM), *microscopía de escaneo por transmisión de electrón de Lorentz* (LSTEM) y las simulaciones micromagnéticas. El montaje del **MEK** para realización del **MOKE** y **SMOKE** puede ser atractivo para el experimentador por muchas razones:

- El **MEK** presenta una configuración electrónica simple, que genera un bajo costo en la construcción

comparado con el magnetómetro *SQUID* [35] o con el LSTEM, que no presenta una configuración fácil [23].

- El **SMOKE** para el estudio de películas delgadas tiene también la ventaja de presentar una alta sensibilidad al comportamiento magnético de las superficies muy delgadas y una buena resolución espacial (<200 nm) [24], [31] y [35].
- La capacidad de los montajes **SMOKE** de desarrollar medidas *in situ* en cámaras de UHV es muy importante en el estudio de las propiedades durante el crecimiento del cristal. Práctica en la que sobrepasa al *SQUID*, que no es apto para esta labor [23].
- Comparado con el magnetómetro de muestra vibrante (*VSM* en inglés), el montaje **SMOKE** puede medir un lazo completo en unos pocos minutos, a diferencia de una hora con el *VSM*; además, con el *VSM* es posible que las propiedades magnéticas del soporte del sustrato y la muestra puedan arrojar interferencia en la medida [17].
- El **MEK** también tiene ventajas sobre otras técnicas como la *SEMPA* (*Scanning Electron Microscopy with Polarization Analysis*) y fotoemisión, porque puede medir la magnetización de las muestras en presencia de un campo magnético [17].
- Diferente al *VSM*, el montaje **SMOKE** no puede medir el valor absoluto de la magnetización *M*.

## 6. ACTUALIDAD EN COLOMBIA

Actualmente el país cuenta con cuatro grupos de investigación que trabajan con esta técnica: el grupo de Materiales Magnéticos y Nanoestructuras de la Universidad del Quindío, que trabaja con una variación del montaje convencional del **MEK** [46]. El grupo de estado sólido de la Universidad de Antioquia, que realiza pruebas con el **D-MOKE** [47], el grupo de variables magnetoópticas y nuevos materiales de la Universidad Tecnológica de Pereira, que está definiendo los criterios de diseño para la instrumentación y puesta en funcionamiento del **MEK**, además, están implementando formas diferentes de tratamiento de la señal de ruido; y el grupo de ciencia de materiales y tecnología de plasma de la Universidad del Tolima.

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se deben definir y documentar los criterios de diseño en cuanto al proceso de instrumentación y control del **MEK**, para hacerlo mucho más asequible.
- El **MEK** es más económico que otras técnicas, pero el costo de este montaje se puede reducir si se refinan los criterios de diseño en cuanto al acondicionamiento de la señal  $I_k$  y las formas de tratamiento de la señal de ruido por ejemplo por software, mediante denoising por wavelets.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Bonette. H. magnetómetro a efecto Kerr e o filme fino de co/si. 2.002. Msc Theses Universidad Estadual de Campinas,

- [2] Faraday. M. On the magnetization of light y the illumination of magnetic lines of force. *Trans. Roy. Soc.*, 5:592, 1846.
- [3] Qiu. Z y Bader. S. Surface magneto-optic Kerr effect (SMOKE). *M.M.M.*, 200:664–678, 1999.
- [4] Qiu. Z y Bader. S. Surface magneto-optic Kerr effect. *Review Scientific Instruments*, 71(3):910–913, 2000.
- [5] C. Maxwell. J. A transite on Electricity Magnetism, 2(21), 1873.
- [6] Kerr. J. *Philos. Mag.*, 3:339, 1877.
- [7] Kerr. J. *Philos. Mag.*, 5:161, 1878.
- [8] Argyres. P. Theory of the Faraday y Kerr effects in ferromagnetics. *Phy. Rev.*, 97(2):334–345, 1955.
- [9] Moog. R y Bader. S. Superlattices *Microstruct.* 1. p 543. 1985
- [10] Zak. J, Moog. C y Bader. S. *Phys. Rev. B* 43. p 6423. 1990
- [11] Ding. H, Putter. S, Oepen. H, y Kirschner. J. Experimental method for separating longitudinal y polar Kerr signals. *Magn. y Magn. Mat.*, 212(5), 2000.
- [12] Vinosvský. S, Postava. K, y Yamaguchi. K. Magneto-optic polar Kerr y Faraday effects in periodic multilayer. *Optics Express*, 9(3):158–171, 2001.
- [13] Chun-Yeol. Y y Sung-Chul. S. Analytic expressions of the general magneto-optical Kerr effects for a nanometer-thick magnetic layer with a capping layer. *Phys. Stat. sol(b)*, 7:1406–1410, 2004.
- [14] Reinisch. R, Nevier. M, Tayeb. G, y Popov. E. Symmetry relations for reflection y transmission coefficients of magneto-optic systems. *Optics Communications*, 205:59–70, 2002.
- [15] Qui. Z and Bader. S. *MRS Bulletin*. 20. pp34. 1995
- [16] Wikes. J. The experimental ultrafast magneto-optical Kerr effect. 2000. Theses submit Bacheror of Science in Physics from the college of William y Mary in Virginia, p. 46,
- [17] Yuen. H. Construction of a surface magneto-optic Kerr effect apparatus for the measurement of magnetic properties of thin film. 2.000 Theses A senior submitted in Physics in the College of Letters y Science of the University of California at Berkeley.
- [18] Hampton. J, Martinez. J, y Abruña. H. Develpoment of a versatile SMOKE system with electrochemical applications. *Rev. of Sci. Inst.*, 73(8):3018–3021, 2002.
- [19] D’Orazio. F, *et al.* Temperature dependence of magnetic properties in epitaxial Cu/Ni/Cu/Si(111) measured by magneto-optical Kerr effect. *M.M.M.*, 198-199:369–371, 1999.
- [20] Cougo dos Santos. M, Geshev. J, Pereira. L, Alves. M, y Schmidt. J. Interlayer coupling in self-organized Fe nanoclusters grown on vecinal Si(111). *Phys. Rev.*, 70 B, 2004.
- [21] Moore. T, *et al.* Determination of magnetostriction in films using strained substrate techniques. *Phys. Condens. Matter*, 16:L375–L380, 2004.
- [22] <http://dpwww.epfl.ch/cours/ansermet/magweb/Magnetooptics.pdf>. Magnetooptics effects, 2002. Efectos magnetoópticos.
- [23] Grimsditch. M y Vavassori. P. The diffracted magneto-optical Kerr effect: what does it tell you? *Phys. Condens. Matter*, 16:R275–R294, 2004.
- [24] Allwood. D, *et al.* Magneto-optical Kerr effect analysis of magnetic nanostructures. *Appl. Phy.*, 36:2175–2182, 2003.
- [25] Novosad. V, Souche. Y, y Pishko. V. Magneto-optical Kerr effect in conical difaction geometry of micron-Size Fe3Si wire array. *Trans on Magn*, 35(5):3145–3147, 1999.
- [26] Meyer. G, Creselius. T, Kaindl. G, y Bauer. A. Versatile UHV system for combined far- y near-field magneto-optical microscopy of thin films. *M.M.M.*, 240:6–78, 2002.
- [27] Choi. j y *et al.* Change of magnetic property in ultrathin Fe films grown on Pd(111) induced by morphological change y interdiffusion. *Surface Science*, 495(5):173–184, 2001.
- [28] McCord. J, *et al.* Kerr microscopy estudy on sputtered fe stripes. *Trans. Magn*, 39(5):2687–2689, 2003.
- [29] Jeong-Won. L, *et al.* In situ vectorial magnetization study of ultrathin magnetic films using a surface magnetooptical Kerr effect measurement system. *Trans. on Magn*, 37(4):2773–2775, 2001.
- [30] Gehring. G, Ali. M, Cooke. M, y Mattheis. R. Determination of magnetostriction in films using strained substrate techniques. *M.M.M.*, 257:15–21, 2003
- [31] Berling. D, *et al.* Accurate measurement of in-plane magnetic anisotropy energy function  $M_a(\theta)$  in ultrathin films by magneto-optics. *M.M.M.*, 297:118–140, 2006.
- [32] Tang. F, *et al.* Asymetry of magnetooptical Kerr effect loops of Co nano-columns grown by oblique incident angle deposition. *M.M.M.*, 283:65–70, 2004.
- [33] N. D. Ha, *et al.* Observation of reversed hysteresis loops y negative coercivity in CoFeAlO magnetic thin films. *M.M.M.*, 295:126–131, 2005.
- [34] Orue. I, Garcia. A, Saad. A, Cos. D, y Baradian. J. Transverse magnetization y giant magnetoimpedance in amorphous ribbons. *M.M.M.*, 290:1081–1084, 2005.
- [35] Wrona. J, *et al.* R-VSM y MOKE magnetometers for nanostructures. *M.M.M.*, 272:2294–2295, 2004.
- [36] Schmitte. T, Wesphalen. A, Theis-Brohl. K, y Zabel. H. The bragg-MOKE: magnetic domains in Fourier space. *Superlattices y Microstructures*, 34:127–136, 2003.
- [37] Vavassori. P, *et al.* Magnetization reversal via single y double vortex states in submicron permalloy ellipses. *Phys. Rev. B.*, 69(2):214404, 2004.
- [38] Tomita. S, Kato. T and Tsunashima. S. Magneto-Optical Kerr Effects of Yttrium-Iron Garnet Thin Films Incorporating Gold Nanoparticles. *Phy. Rev* 96. 2006
- [39] Vavassori. P, Bovolenta. R, y Metlushko. V. Vortex rotation control in permalloy disks with small circular voids. *Appl. Phys.*, 99:053902–1, 2006.
- [40] Silva. T y Kos. A. Nonreciprocal diferencial detection method for scanning Kerr effect microscopy. *Appl. Phys*, 81(8):5015–5017, 1997.
- [41] Kabos. P, Kos. A. B, y Silva. T. J. Vectorial second-harmonic magneto-optic Kerr effect measurements. *J. Appl. Phys.*, 87(9):5980–5982, 2000.
- [42] Kai-Uwe. B y M. Roly. MOKE y AMR investigations on exchange bias field strength y direction in ferromagnet/antiferromagnet systems. *Trans. on mag*, 38(5):2767–2769, 2002.
- [43] Vinosvský. S, *et al.* R. MOKE spectroscopy of sputter-deposited Cu-ferrite films. *M.M.M.*, 290:195–197, 2005.
- [44] Shalynguina. E, Progrebnaya. I, y Shalynguina. O. Magneto-optical investigation of Co-wedge/Pd-wedgesywich. *Trans on Magn*, 35(5):3142–3144, 1999.
- [45] Calle. C, *et al.* Simulación de comportamientos histeréticos blandos en películas magnéticas. *Revista colombiana de Física*, 38(2):5549–552, 2006.
- [46] Peterka. D, Enders. A, Haas. G, y Kern. K. Combined kerr microscope y magnetic force microscope for variable temperature ultrahigh vacuum investigations. *Rev. Scient. Inst.*, 74(5):2744–2748, 2003.
- [47] Calle. V, *et al.* Empleo de un sistema basado en el efecto Kerr MOKE para el estudio de películas magnéticas. *Revista colombiana de Física*, 38(1):37–40, 2006.
- [48] López. J, Tobón. b Reyes. L, Henao. R, Grimsditchd. M, Morales. A, y Osorio. J. Montaje y calibración de un sistema de efecto Kerr magnetoóptico. *Revista colombiana de Física*, 37(2):384–388, 2005.