

# Espectro magneto-óptico y las componentes no diagonales del tensor dieléctrico de ferritas de Co en un rango de energía entre 1,0 y 5,0 eV

Eudaldo García Tarajano, Oscar Arés, Orlando González Pérez, Facultad de Física, Universidad de La Habana

## RESUMEN

En los últimos años la medición y obtención de espectros magneto-ópticos ha sido una técnica muy utilizada en la caracterización de las propiedades magneto-ópticas tanto en láminas delgadas ferromagnéticas como en ferritas.

Utilizando el efecto Kerr Ecuatorial se presentan en este trabajo los espectros magneto-ópticos en un rango de energía entre 1,0 eV a 5,0 eV de ferritas de Co para diferentes ángulos de incidencia de la luz. Se obtuvieron los componentes no diagonales del tensor dieléctrico ( $\vec{\epsilon}$ ). Los resultados obtenidos se discuten sobre la base de la teoría de las transiciones dipolares eléctricas.

## ABSTRACT

On the last few years measuring and obtention of magneto-optic spectra have been a technique very much used in the characterization of magneto-optics properties in infero magnetics shields as well in ferrites.

In this paper using Kerr Ecuatorial effect the magneto-optics spectra in a rank of 1,0 to 5,0 eV of ferrites Co. for different angles of incidence of light are presented. The non-diagonal components of tensor dielectric were obtained. The results reached are analyzed on the theory electrical dipolar transitions.

# INTRODUCCIÓN

El principio de trabajo con los que se rigen los sistemas dedicados a la obtención de los espectros magneto-ópticos es la dependencia lineal que existe entre la mayoría de dichos efectos con la magnetización de las muestras investigadas.

Las investigaciones del tipo fundamental se realizan a través del análisis de los espectros magneto-ópticos de los materiales estudiados.

Mediante esta técnica, podemos obtener información de la estructura microscópica que presentan los niveles de energía de los electrones magnéticos, en los iones metálicos con diferentes coordinaciones; tetraédricos, octaédricos, etcétera, de la red cristalina pertenecientes a los ferro-dieléctricos. La esencia de este fenómeno, está en las transiciones del tipo dipolar eléctrica que sufren los electrones en la capa 3d (1) de dichos iones, al incidir sobre la muestra un haz de luz linealmente polarizado. Aquí juega un papel importante el tensor dieléctrico, ya que los efectos magneto-ópticos se relacionan con las componentes no diagonales de dicho tensor y es precisamente a través de este que se manifiesta el fenómeno de transición dipolar eléctrica como veremos más adelante.

El objetivo de este trabajo, ha sido el estudio de los espectros magneto-ópticos de ferritas de Co obtenidas en el Laboratorio de Magnetismo del Departamento de Física de los Metales y la obtención a partir de estos de las componentes no diagonales del tensor dieléctrico ( $\overleftrightarrow{\epsilon}$ ).

*Descripción de los enfoques Magneto-Ópticos y su relación con los elementos del tensor dieléctrico  $\overleftrightarrow{\epsilon}$ .*

En general la descripción fenomenológica de los efectos magneto-ópticos se pueden derivar con la ayuda de las ecuaciones diferenciales de Maxwell.

$$\frac{1}{C} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = - \text{rot } \vec{E} \quad (1)$$

$$\frac{1}{C} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \text{rot } \vec{H}$$

y las ecuaciones tensoriales

$$\vec{D} = \overleftrightarrow{\epsilon} \vec{E} \quad (2)$$

$$\vec{B} = \overleftrightarrow{\mu} \vec{H}$$

Discutiremos brevemente las relaciones entre los efectos magneto-ópticos observados y los elementos no diagonales del tensor dieléctrico.

Un tratamiento más intenso puede encontrarse en [2].

La propagación de las ondas electromagnéticas en una sustancia puede ser descrita con la ayuda de los tensores  $\overleftrightarrow{\mu}$  y  $\overleftrightarrow{\epsilon}$ .

Para frecuencias ópticas  $\overleftrightarrow{\mu}$  puede tomarse igual a la unidad. Considerando que la magnetización es paralela al eje z, el tensor dieléctrico tiene la forma:

$$\overleftrightarrow{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon & -i\epsilon' & 0 \\ i\epsilon' & \epsilon & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_0 \end{pmatrix}$$

Todos los elementos presentan parte real e imaginaria.

El efecto ecuatorial de Kerr ( $\delta$ ) puede expresarse en función de los componentes no diagonales [3] mediante la siguiente expresión:

$$\delta = a(n, k, \varphi) \epsilon'_1 + b(n, k, \varphi) \epsilon'_2 \quad (3)$$

donde:

a y b son funciones complejas que dependen del índice de refracción n, de coeficiente de absorción k y el ángulo de incidencia de la luz  $\varphi$ .  $\epsilon'_1$  y  $\epsilon'_2$ , la parte real e imaginaria de la componente no diagonal del tensor dieléctrico.

por otra parte apoyándonos en la teoría cuántica de la dispersión se comprueba [4] la conexión entre las transiciones dipolares eléctricas y las componentes no diagonales del tensor  $\overleftrightarrow{\epsilon}$ , al obtener

$$\begin{aligned} \epsilon'_1 &= \frac{\pi N e^2}{m} \sum_e \frac{f_{fe} \Gamma_{fe}}{W_{fe} [(W_{fe} - w)^2 - \frac{1}{4} \Gamma_{fe}^2]} \\ \epsilon'_2 &= \frac{2\pi N e^2}{m} \sum_e \frac{f_{fe} (W_{fe} - w)}{W_{fe} [(W_{fe} - w)^2 - \frac{1}{4} \Gamma_{fe}^2]} \end{aligned} \quad (4)$$

donde:

$$f_{fe} = \frac{2m W_{fe}}{\hbar} \langle f | x | e \rangle \langle e | y | f \rangle$$

y se conoce como la fuerza del oscilador.

$\Gamma_{fe} = \Gamma_f + \Gamma_e$ , siendo  $\Gamma_f$  y  $\Gamma_e$  el inverso del tiempo de vida en los estados básicos y excitado respectivamente.

$W_{fe}$ : frecuencia de transición

w : frecuencia propia (singlete).

De un cálculo sencillo se obtuvo que el máximo de la curva  $\epsilon'_1$ , concuerda con la frecuencia de resonancia, es decir:

$$W_{\text{máx}} = W_{fe} \quad (5)$$

mientras que para  $\epsilon'_2$  el máximo de la curva corresponde a una frecuencia tal que se cumple que:

$$W_{\text{máx}} = W_{fe} = \frac{1}{2 W_{fe}} \quad (6)$$

De este desarrollo se puede inferir la importancia que tiene desde el punto de vista experimental obtener  $\delta$ , ya que este parámetro se relaciona con las componentes no diagonales del tensor  $\vec{\epsilon}$  y a su vez este, se relaciona con la fuerza del oscilador, lo que nos permite su cálculo. Un tratamiento más intenso se puede encontrar en [4] y [5].

#### *Metódica Experimental y muestras investigadas*

De los efectos magneto-ópticos conocidos para investigar los espectros de los iones 3d, se escogió el efecto ecuatorial de Kerr.

En la medición de este efecto, el vector de magnetización  $\vec{M}$  está paralelo a la superficie de la muestra y perpendicular al plano de la luz incidente.

El método utilizado para medir el efecto magneto-óptico ( $\delta$ ) consistió en medir el cambio de intensidad de una onda p linealmente polarizada reflejada en la muestra sin campo y en campo alterno presente en ella. Dicho campo alterno cambia el sentido de la magnetización provocando una variación del coeficiente de reflexión. El efecto medido se define por:

$$\delta = \frac{I - I_0}{I_0} = \frac{\Delta I}{I_0} \quad (7)$$

donde:

I e  $I_0$  son respectivamente la intensidad de la luz reflejada de la muestra magnetizada hasta la saturación y no magnetizada.

#### *Muestras investigadas*

Fueron investigadas ferritas espinélicas de Co policristalinas con las composiciones  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  y  $\text{Co}_{0.8}\text{Fe}_{2.2}\text{O}_4$ . En estos compuestos los iones  $\text{Co}^{2+}$  se pueden encontrar en sitios octaédricos B y tetraédricos A [6]. La distribución de estos cationes entre sitios A y B depende fuertemente de las condiciones de preparación. Las muestras investigadas fueron obtenidas por el método de coprecipitación [7], el que permite una mayor homogeneidad y densidad en los policristales que el cerámico convencional.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se efectuaron mediciones del efecto ecuatorial de Kerr en un rango de frecuencias de 1,0 a 5,0 eV. Las mediciones se efectuaron para ángulos de incidencia de 60°, 65° y 70°, como se muestran en las figuras 1 y 2. También a continuación se presentan los valores del índice de refracción y la constante de absorción contra frecuencia en la figura 3. Con los valores de  $n$  y  $k$  y tomando dos ángulos de incidencia 60° y 70° se calcularon las componentes no diagonales del tensor de permitividad dieléctrica  $\epsilon' = \epsilon'_1 - i \epsilon'_2$  como se muestra en la figura 4.

En la figura 5 aparecen los espectros para las ferritas de fórmula química  $\text{Co}_x \text{Fe}_{3-x} \text{O}_4$  para  $x = 1$  y  $x = 0,8$ .

En la figura 2 aparecen para el ángulo de incidencia  $\phi = 65^\circ$  la comparación de los espectros magneto-ópticos experimental y calculada a partir de la expresión (3).

De los resultados obtenidos se puede ver cómo influye en la medición del efecto magneto-óptico el ángulo de incidencia, el cual es capaz con una pequeña variación, cambiar hasta la forma de la curva, como puede apreciarse en la figura 1. Esto se debe fundamentalmente a que para estas sustancias el ángulo de Brewster se encuentra entre 65° y 70°.

En la figura 5 vemos que cuando existe mayor concentración de iones de  $\text{Co}^{2+}$  en la muestra, el pico es más pronunciado corroborándose la hipótesis de que son estos iones los responsables de las transiciones ópticas del tipo  $4 T_1 (^4F) \rightarrow 4 A_{2g} 4 T_{1g} (P)$  en una frecuencia alrededor de 2,3 eV [8], [9].

Utilizando la expresión (3) se calculó el espectro magneto-óptico para  $\phi = 65^\circ$ , el cual coincide bastante bien con el espectro experimental como se muestra en la figura 2. Este resultado corrobora el tratamiento fenomenológico utilizado en este efecto magneto-óptico.

En la figura 4 aparece el rango de energía utilizado, el comportamiento de la componente no diagonal parte real e imaginaria del tensor  $\epsilon'$ , donde tal como lo predice la teoría presentan máximos abruptos característicos de curvas donde está presente el fenómeno de resonancia. De las ecuaciones (4) se obtuvo que estos máximos no coinciden con el mismo valor de frecuencia, o sea las curvas se desplazan con respecto a la otra. Este resultado está de acuerdo con el obtenido experimentalmente.

Por último con los valores de  $\epsilon'_1$  y  $\epsilon'_2$  utilizando las expresiones (4) que relacionan la fuerza del oscilador con los componentes no diagona-

les, obtuvimos  $f$  cuyo resultado fue  $6,8 \cdot 10^{-5}$ . Este valor está dentro del rango de valores reportados en la literatura [10].

Para ejemplificar lo anterior presentamos los valores de la fuerza del oscilador para los mismos compuestos de algunas sustancias.

Para el caso del  $\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6^{2+}$  la fuerza del oscilador es de  $7,5 \cdot 10^{-5}$  para el  $\text{CoSo}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  es de  $9,0 \cdot 10^{-5}$  y por último para el  $\text{Co}(\text{NH}_3)_6^{2+}$  es de  $13,8 \cdot 10^{-5}$ .

## CONCLUSIONES

1. El efecto magneto-óptico ecuatorial de Kerr es más fuerte para las ferritas que poseen mayor concentración de iones  $\text{Co}^{2+}$ .
2. La transición observada por nosotros en 2,3 eV es del tipo dipolar eléctrica y corresponde a los electrones magnéticos del ión  $\text{Co}^{2+}$  en sitios octaédricos.
3. Se presenta un modelo microscópico que relaciona a los efectos magneto-ópticos con las transiciones dipolares eléctricas que nos permitió explicar el corrimiento que existe entre los picos de la curva de la parte real e imaginaria de la componente no diagonal del tensor dieléctrico.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Freiser, M.J.  
IEEE Trans Magn 4, 152, 1968.
2. Kahn, F.J.; P.S. Pershan and J.P. Remeika.  
Phys Rev. 186, 891, 1969.
3. Física de los fenómenos magnéticos, G.S. Krinchik, 1976.
4. González Pérez, Orlando  
Trabajo de Diploma 1980.
5. Dadidov,  
Mecánica cuántica.
6. Smit, J. y H.P.J. Wijn  
Ferritas, 1965.
7. Sánchez Llamazares, José L.  
Trabajo de Diploma 1980.
8. Krinchik y colaboradores  
ЖЭТФ 73, 699, 1977
9. Fergusin, J.  
J. Chem. Phys. 39, 116, 1963.
10. Balhausen, C.J. and C.K. Jorgensen  
Acta Chem. Scanda 9, 397 (1955).

Recibido: 7/marzo/1984

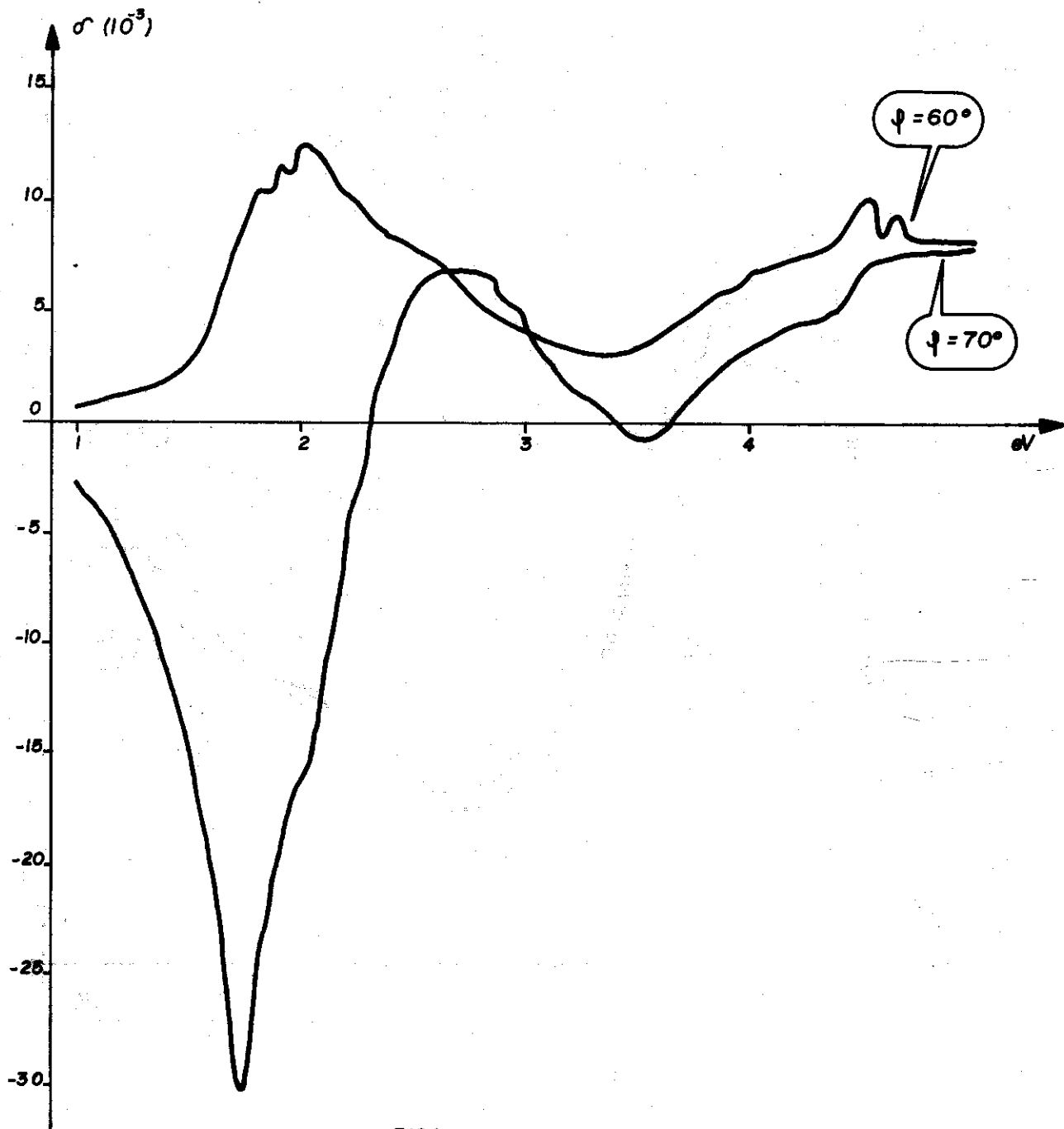


FIG.1

ESPECTRO MAGNETO ÓPTICO ECUATORIAL DE KERR EN FERRITAS DE  
 FÓRMULA  $Co_{0,8}Fe_{2,2}O_4$ , PARA ÁNGULOS DE INCIDENCIA DE  $60^\circ, 70^\circ$

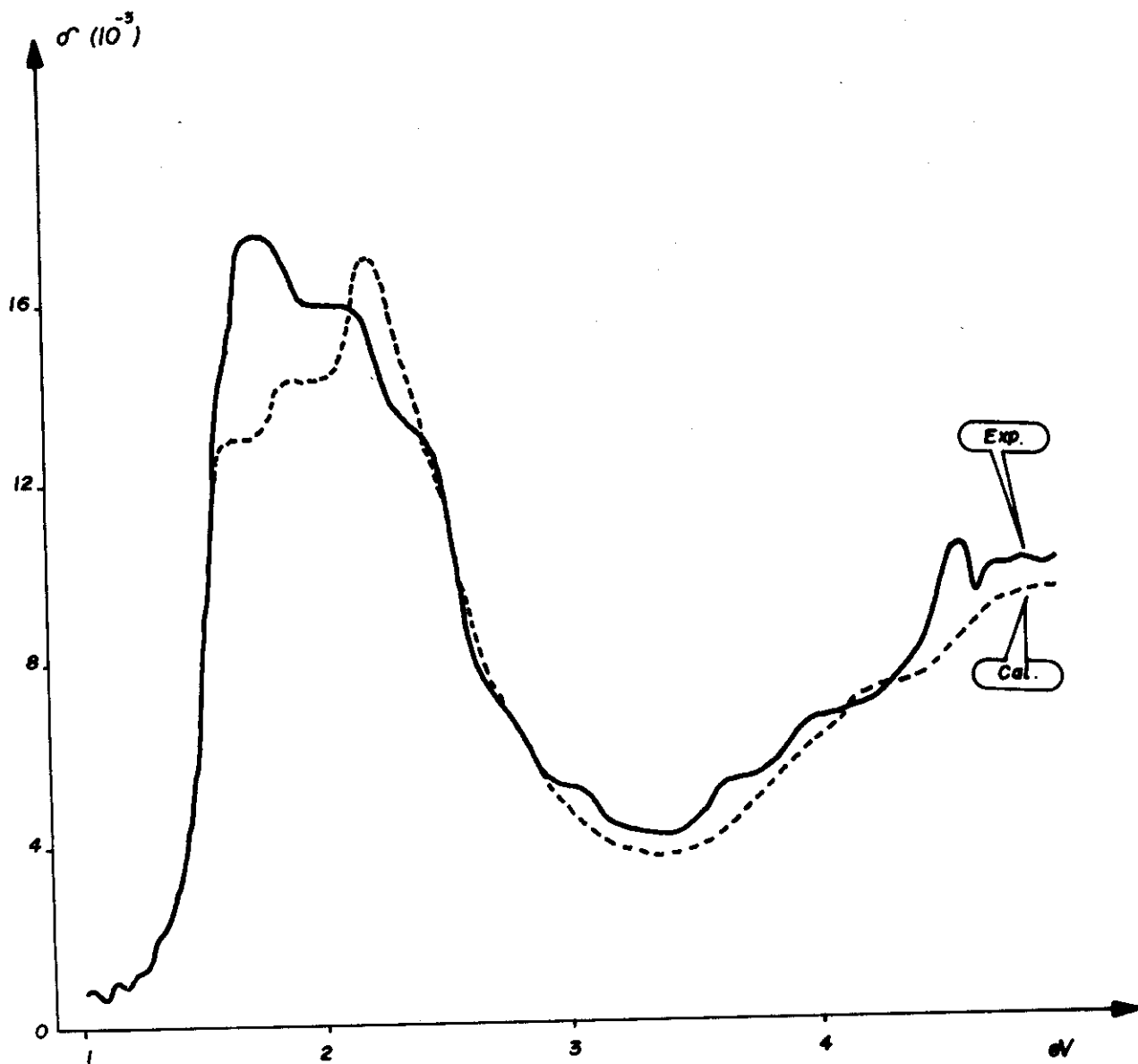


FIG. 2.

ESPECTRO MAGNETO-ÓPTICO ECUATORIAL DE KERR EXPERIMENTAL Y CALCULADO EN FERRITAS DE FÓRMULAS  $Co_{0,8}Fe_{2,2}O_4$ , PARA UN ÁNGULO DE INCIDENCIA DE  $65^\circ$ . -



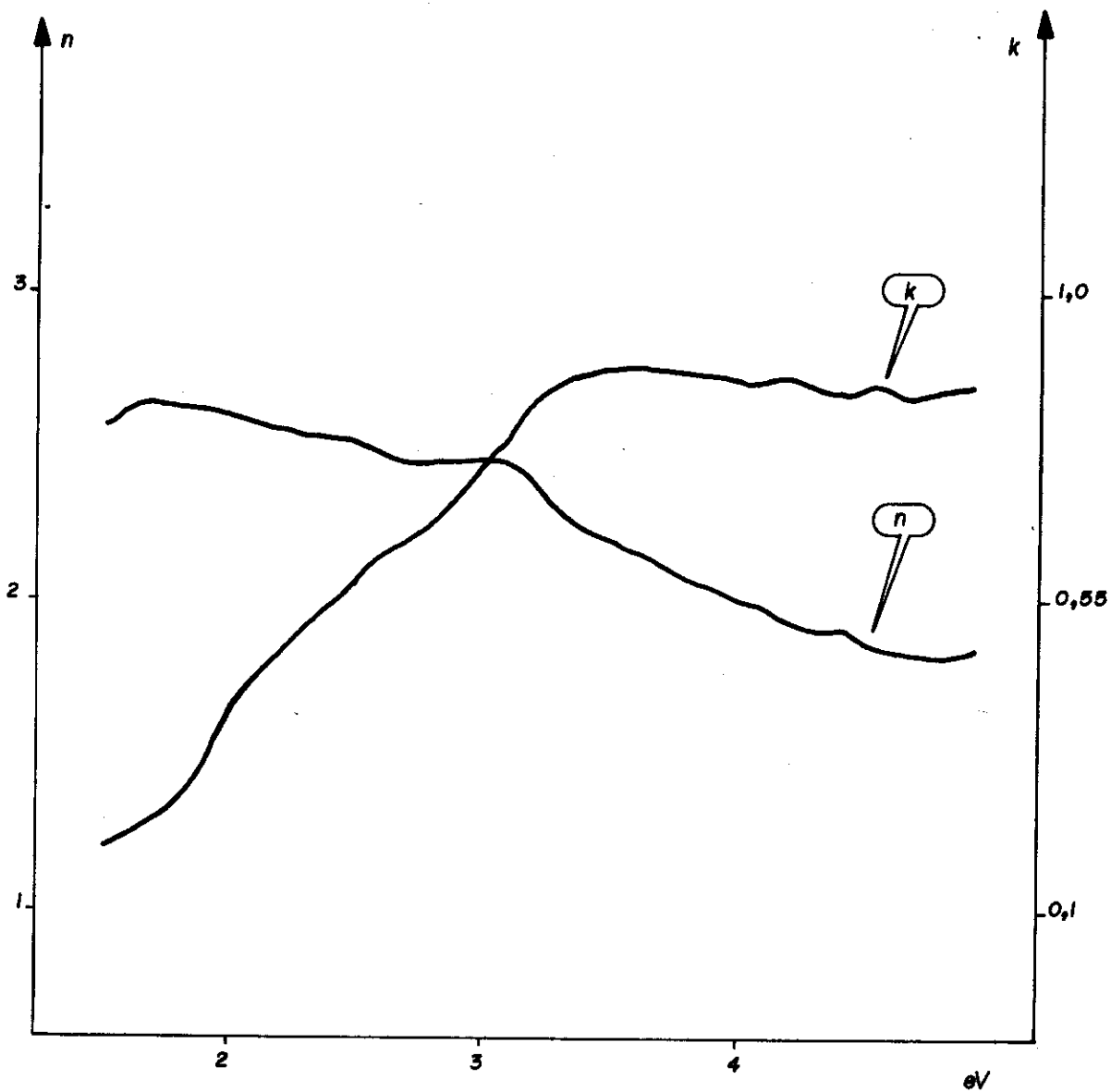


FIG.3

ESPECTRO DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN Y LA CONSTANTE DE ABSORCIÓN EN FERRITAS DE FÓRMULA  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  .-

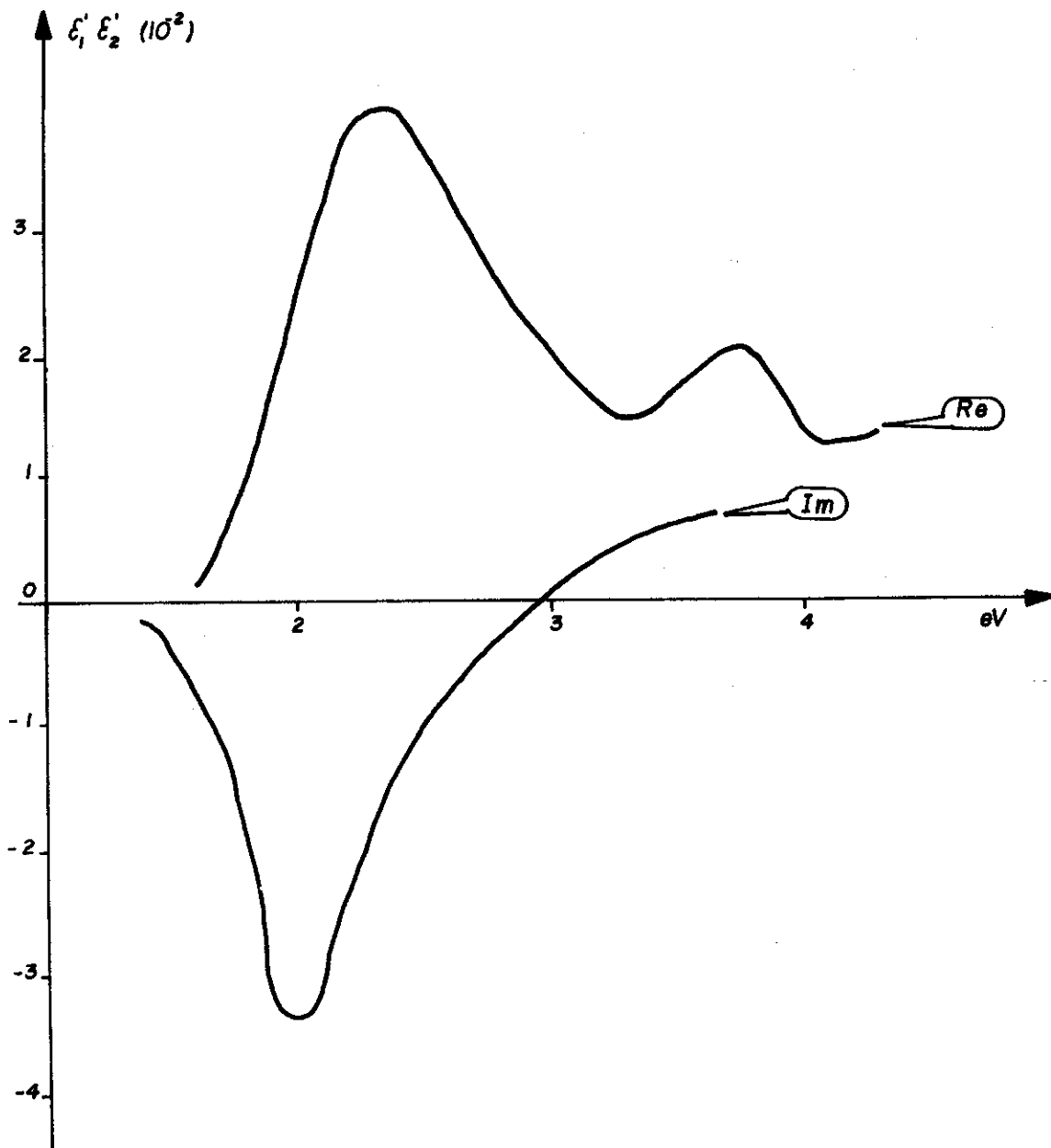


FIG. 4

ESPECTRO DE LA PARTE REAL E IMAGINARIA DE LA COMPONENTE NO DIAGONAL DEL TENSOR DIELECTRICO EN UNA FERRITA DE FÓRMULA  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  .-

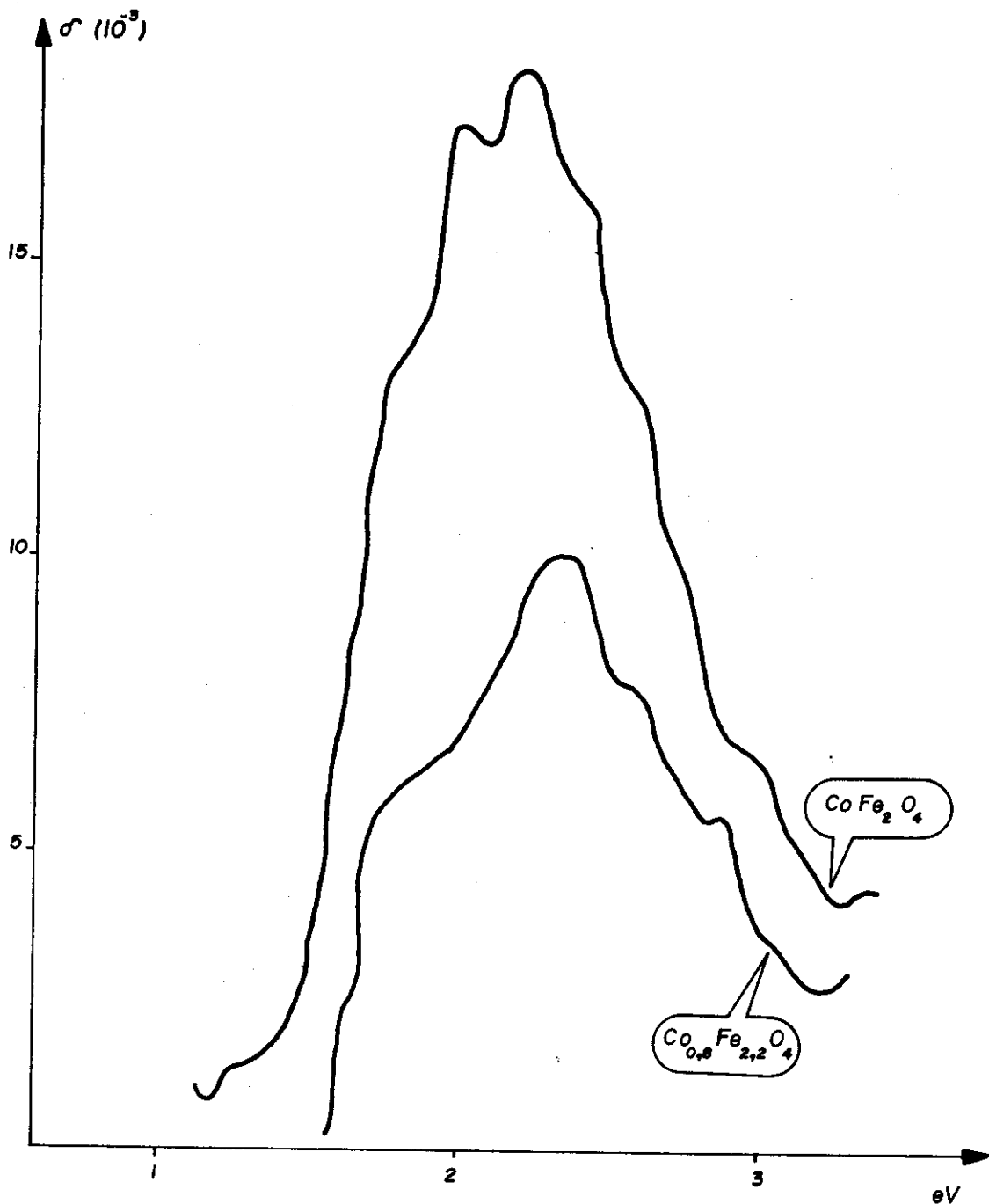


FIG. 5

ESPECTRO MAGNETO-ÓPTICO ECUATORIAL DE KERR EN FERRITAS DE FÓRMULA  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  Y  $\text{Co}_{0.8}\text{Fe}_{2.2}\text{O}_4$ , PARA UN ÁNGULO DE INCIDENCIA DE 65 %