

# Determinación experimental de la constante de Verdet y la dependencia térmica del efecto Faraday en vidrios ópticos con laser de He-Ne

R.A. Díaz Delgado, J. Ravelo Triana, A. Combarro Romero y V.L. Fajer Ávila  
Buró Especial de Construcción de Instrumentos Científicos con Producción  
Adjunta. Academia de Ciencias de Cuba

## RESUMEN

En el presente trabajo se determina experimentalmente el campo magnético efectivo que actúa sobre las muestras de estudio, mediante una fuente espectral de sodio y dos sustancias como el bisulfuro de carbono y el agua para las cuales la constante de Verdet se conoce bien. Se realiza con el láser de He-Ne la determinación experimental de la constante de Verdet para estas sustancias y para los vidrios ópticos del tipo flint pesado, empleados comúnmente como núcleos de las celdas de Faraday, marca TF-1 y TF-5 de fabricación soviética. Se hace el estudio de la dependencia térmica del efecto Faraday en los vidrios mencionados en el intervalo de temperatura de 30 °C a 80 °C. Todas las determinaciones se realizaron con un error relativo menor que el 1 % para un intervalo de confianza del 95 %.

## ABSTRACT

The effective magnetic field actuating over the studied samples was experimentally determined in this paper by means of a sodium spectral source and two substances like  $CS_2$  and  $H_2O$  whose Verdet constant are well known. The Verdet constant experimental determination of this substances and heavy flint optical glasses, commonly employed as Faraday cell cores,

was performed with He-Ne laser. The thermal dependence of the Faraday effect in the mentioned glasses was studied in the 30 °C to 80 °C range. Every determination was realized with relative error less than 1 % within 95 % of confidence level.

## 1. INTRODUCCIÓN

La propiedad de las sustancias ópticamente inactivas de convertirse en activas en presencia de un campo magnético es conocida como el efecto Faraday. La mayor o menor capacidad de las sustancias de provocar giros de la luz linealmente polarizada debido a este efecto, es caracterizada por la denominada constante de Verdet. La constante de Verdet ha sido extensamente estudiada en diversos tipos de vidrios [1 - 3] en un intervalo espectral que va desde el ultravioleta hasta el infrarrojo, sin embargo, existe poca información para la longitud de onda del láser de He-Ne. Por otra parte, el efecto Faraday en los vidrios ha encontrado amplia aplicación en la construcción de dispositivos como la llamada celda de Faraday para su empleo como modulador y compensador en polarimetría y elipsometría [4 - 9].

Es conocido que las variaciones de temperatura influyen en el comportamiento de las celdas de Faraday [7] y pueden dar lugar a errores en las mediciones realizadas con polarímetros o elipsómetros que empleen dichas celdas como compensadores, sin embargo no hay información detallada disponible al respecto.

El objetivo del presente trabajo es realizar un estudio de la dependencia térmica del giro del plano de polarización en las barras de vidrio flint pesado que se emplean como núcleos de las celdas de Faraday y determinar la constante de Verdet de estos vidrios con un láser de He-Ne, para su utilización en la construcción de instrumentos.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO Y RESULTADOS

### 2.1. DETERMINACION DEL CAMPO MAGNÉTICO

Para la determinación de la constante de Verdet es necesario conocer con precisión la intensidad del campo magnético  $H$ , en presencia del cual se produce el giro del plano de polarización. La determinación del campo se realizó por dos métodos. Primero se determinó con una celda de Hall, la cual fue previamente contrastada en un imán permanente conocido. Esta determinación se realizó mediante la integración numérica de los valores medidos punto a punto, en un intervalo correspondiente a la posición que ocuparían las muestras de estudio en la instalación experimental. El valor obtenido de esta forma para la intensidad de campo magnético fue 2050 oersted, aplicando una corriente de 8 A al electro-imán. Se determinó la distribución axial del campo entre los polos del electro-imán, como se muestra en la Figura 2. El segundo método consiste en la medición del

ángulo de giro del plano de polarización por una sustancia, cuya constante de Verdet es bien conocida, en presencia de un campo magnético y a partir de ahí determinar la intensidad de campo magnético efectivo  $H_{ef}$ .

Para este fin se diseñó y construyó una instalación experimental cuyo esquema se muestra en la Figura 1a.

La instalación experimental está constituida por una fuente de luz (1), en nuestro caso una lámpara espectral de sodio, un condensador (2), un filtro amarillo (3), dos diafragmas (4) y (6), un objetivo (5), un prisma polarizador de Glan-Thompson (7), el electro-imán (8), un portamuestra (9) diseñado para poder trabajar con muestras líquidas y sólidas y mantener la temperatura constante (Figura 1b), una celda de Faraday (10) como moduladora, o sea realizando la oscilación del plano de polarización a una frecuencia igual a la que tiene la señal de corriente que se aplique al solenoide, un prisma analizador (11) montado en un goniómetro de una precisión de  $0,003^\circ$ , un fotosensor (12), un osciloscopio (13), una fuente de corriente alterna (14) para la celda moduladora, una fuente estabilizada de corriente directa (15) para el electro-imán, un picoamperímetro (16), una fuente estabilizada de corriente directa (17) para el sensor de temperatura y por último un termostato (18) para mantener la temperatura de la muestra constante.

Se emplearon dos sustancias para la determinación del campo magnético: agua ( $H_2O$ ) y bisulfuro de carbono ( $CS_2$ ) cuyas constantes de Verdet para la longitud de onda amarilla del sodio son bien conocidas [10]. Las mediciones del giro del plano de polarización se efectuaron por el método de compensación descrito en el trabajo [9]. En el caso del agua se hicieron 45 mediciones y se obtuvo un valor de 1891 oersted y en el bisulfuro de carbono 47 mediciones y su resultado fue de 1906 oersted; promediando ambos valores se obtuvo  $1899 \pm 15$  oersted para un intervalo de confianza del 95 %.

## 2.2. ESTUDIO DE LA DEPENDENCIA TÉRMICA DEL EFECTO FARADAY

Para el estudio de la dependencia térmica del giro del plano de polarización en los vidrios flint pesados se empleó una instalación experimental muy similar a la usada en la determinación del campo magnético, pero en este caso se sustituyó la fuente de luz y toda la óptica por un láser de He-Ne. Las mediciones del giro del plano de polarización se hicieron por el método de la compensación ya mencionado, en un intervalo de temperatura de  $30^\circ C$  a  $80^\circ C$ . Para cada temperatura se realizaron entre 20 y 45 mediciones con el objetivo de disminuir el error de las determinaciones. Las muestras estudiadas, cilindros con una longitud de 5 cm y diámetro de 1 cm, fueron dos ejemplares de vidrio óptico flint pesado uno TF-5 y otro TF-1 ambos de fabricación soviética. Se seleccionaron estas marcas de vidrio por presentar un factor de mérito, según se define en [1], relativamente grande y por ser un tipo de vidrio óptico que se produce en grandes

cantidades. Por otra parte el vidrio flint pesado se emplea comúnmente como núcleo de las celdas de Faraday [1,7,8,11,12], cuando es necesario obtener una rotación significativa del plano de polarización de la luz. En la Figura 3 se muestra la dependencia térmica del giro del plano de polarización, determinada experimentalmente, en los vidrios TF-5 y TF-1 respectivamente. En la ordenada se representa el giro normalizado mientras que en la abscisa se indica la temperatura.

### 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Los valores obtenidos experimentalmente de la intensidad del campo magnético por los dos métodos descritos anteriormente no se encuentran muy alejados entre sí, pero se escogió el valor obtenido por el segundo método para todos los cálculos debido a que en éste se reprodujeron con suficiente fidelidad las condiciones experimentales a que estarían sometidas las muestras de estudio y por tanto presenta menor influencia de error sistemático. Como el valor del campo se determinó de forma indirecta el error aleatorio se evaluó según el método descrito en el trabajo [13]. El error relativo en la determinación del campo magnético fue menor del 1 %.

En la Figura 3 se observa que aparentemente la dependencia térmica del efecto Faraday es pequeña en estos vidrios, sin embargo, empleando el método de regresión lineal, para las muestras de 5 cm de longitud, se obtuvieron los siguientes resultados:

TF-5	$P=0,0010^\circ/\text{Kelvin} \pm 3,0 \%$	$r=0,99$
TF-1	$P=0,0007^\circ/\text{Kelvin} \pm 2,5 \%$	$r=0,99$

donde P es la pendiente de la mejor recta y r es el coeficiente de regresión lineal que da una medida de la calidad del ajuste. Estos resultados indican que un incremento de 10 Kelvin en la temperatura del vidrio produce un aumento de 7 a 10 milésimas de grado en el giro, lo cual no depende del campo magnético presente. Estos valores son significativos si se desea lograr un error total menor que  $0,01^\circ$  en las determinaciones elipsométrica y polarimétrica mediante un instrumento de medición que emplee una celda de Faraday como compensador. Estos resultados muestran que para estas aplicaciones de elevada precisión es necesario asegurar que la temperatura de la celda compensadora no aumente en más de 5 Kelvin respecto de la temperatura ambiente, si asumimos como valor típico de la dependencia térmica  $0,001^\circ/\text{Kelvin}$ , o considerar mediante algún tipo de corrección las variaciones mayores.

La determinación experimental del valor del campo magnético efectivo aplicado a las muestras, así como los resultados obtenidos en el estudio de la dependencia térmica del efecto Faraday en los vidrios mencionados permitió determinar el valor de la constante de Verdet a  $30^\circ\text{C}$  para la longitud de onda del láser de He-Ne ( $\lambda_0=632,8 \text{ nm}$ ) en el vidrio TF-1 y

TF-5. Para el primero este valor fue 0,0384 y para el segundo fue 0,0546 ambos expresados en min/oe-cm. También se realizó la determinación experimental de la constante de Verdet para la longitud de onda arriba mencionada a 26 grados C del bisulfuro de carbono y del agua, cuyos valores son 0,359 y 0,0114 min/oe-cm respectivamente, con un error relativo menor del 1 %. Estos valores se determinaron para un intervalo de confiabilidad del 95 %. Por otra parte se realizó el cálculo de la constante de Verdet para estas mismas sustancias a la longitud de onda señalada empleando los datos que aparecen en /14,16/ y el primer término de la fórmula de la dispersión /15/ de esta constante:  $V=A/Lo^2 + B/Lo^4$ . Para el TF-1 se obtuvo el valor de 0,0380, para el TF-5 el valor fue 0,0550, para el bisulfuro de carbono se obtuvo el valor de 0,0360 y para el agua 0,0113 los cuales coinciden aceptablemente con los resultados experimentales obtenidos en el presente trabajo, considerando el error que implica el empleo de la fórmula aproximada.

#### 4. CONCLUSIONES

Se logró determinar la constante de Verdet para la longitud de onda del láser de He-Ne de los vidrios flint pesados TF-1 y TF-5 y del bisulfuro de carbono y el agua con un error relativo menor que el 1 % en un intervalo de confiabilidad del 95 %. Se concluyó que en aplicaciones polarimétricas y elipsométricas de elevada precisión, mejor que 0,01°, donde se empleen celdas de Faraday como compensadoras con núcleos de vidrio del tipo estudiado, es necesario considerar las variaciones de temperatura de la celda superiores a 5 Kelvin.

#### RECONOCIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al Dr. Álvarez Ponte del INIMET, a los compañeros del Departamento de Magnetismo de la Universidad de La Habana y a los compañeros del área de mecánica del BECICPA por su valiosa cooperación en el presente trabajo.

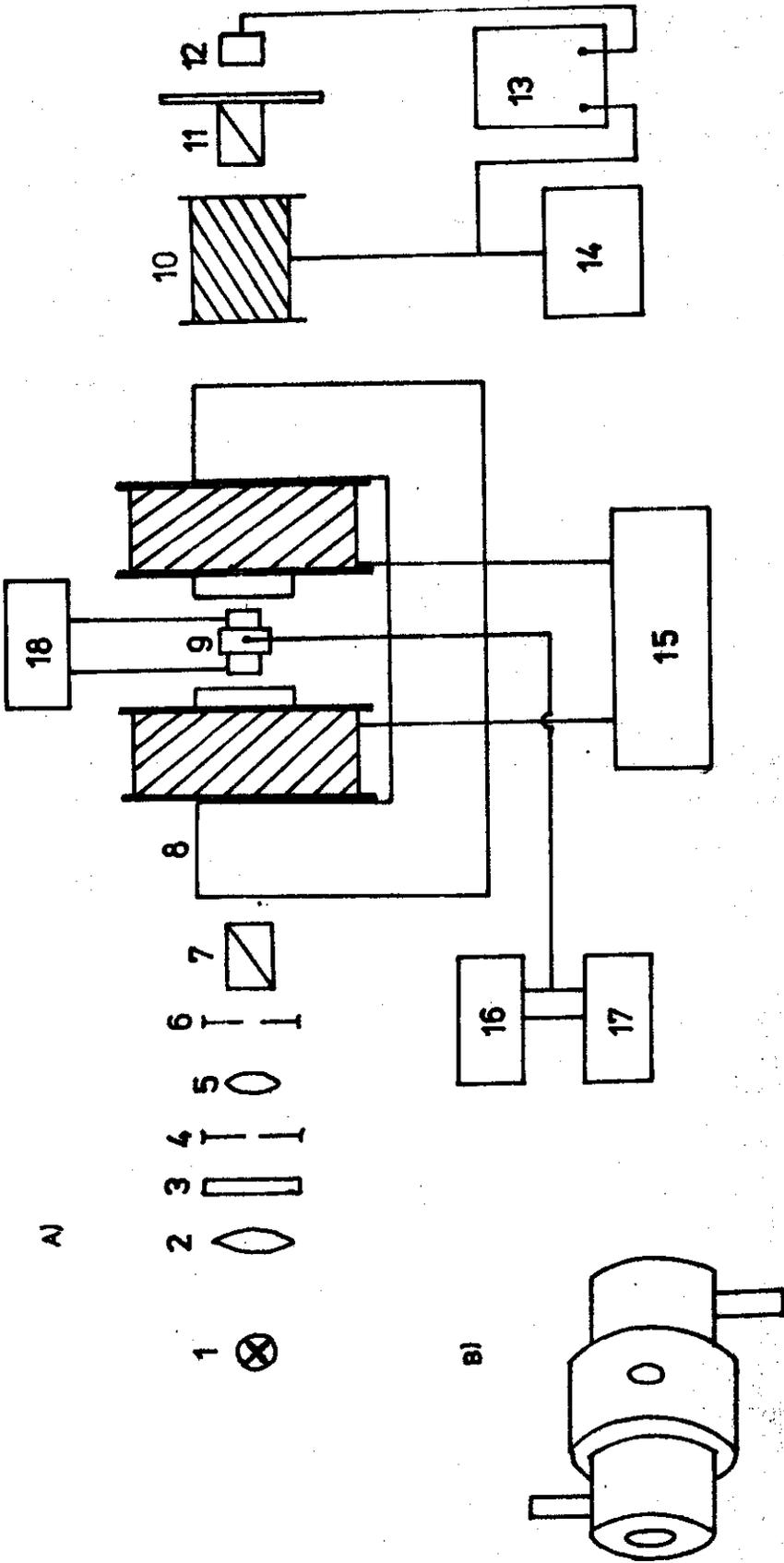


Fig.1 a) Diagrama de la instalacion experimental  
 b) Porta muestra

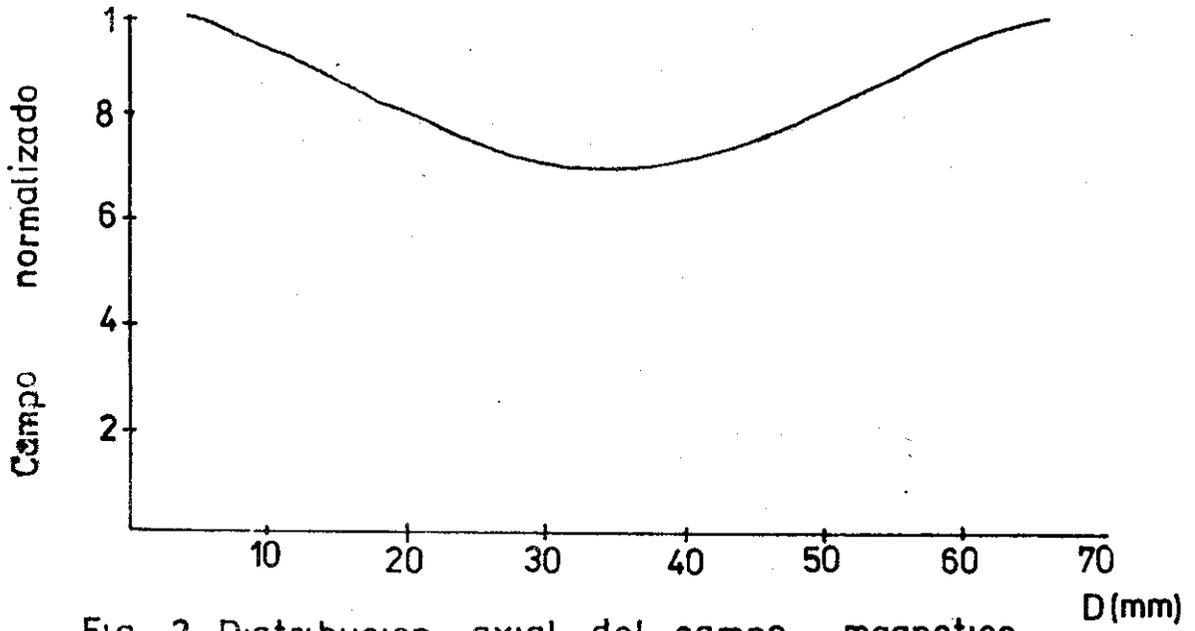


Fig. 2 Distribucion axial del campo magnetico

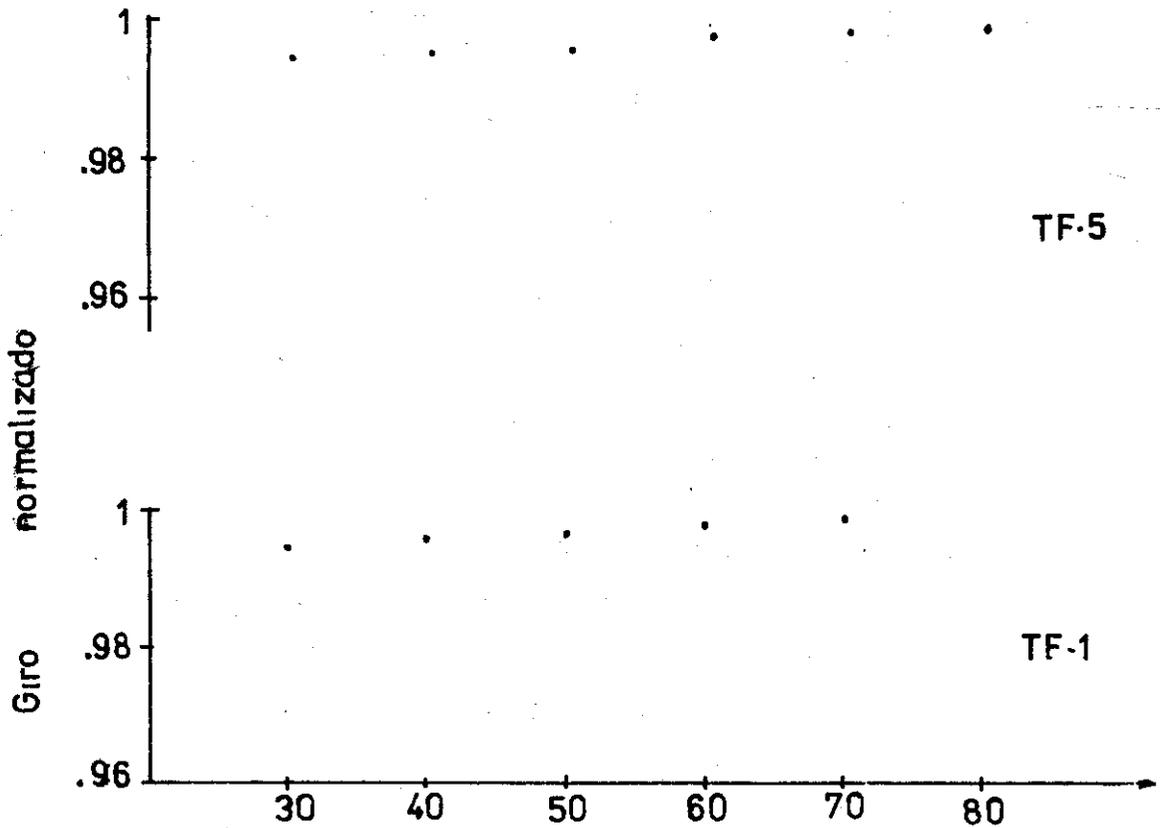


Fig.3 Dependencia termica del efecto faraday

## BIBLIOGRAFÍA

1. Robinson, C.C.  
Appl. Opt. v-3, No. 10 (1964) 1163-1166.
2. Borrelli, N.F.  
The Journ. chem. Phys. v-41, No. 11 (1964) 3289-3293.
3. Tabor, W.J. et al  
Journ. Appl. Phys. v-41, No. 7 (1970) 3018-3021.
4. Jerrard, H.G.  
Surf. Sci., v-16 (1969) 137-146.
5. Wilmanns, I.  
Surf. Sci., v-16 (1969) 147-154.
6. Layer, H.P.  
Surf. Sci., v-16 (1969) 177-192.
7. Mathieu, H.J. et al  
Rev. Sci. Inst. v-45, No. 6 (1974) 798-802.
8. Muller, R.H. and J.C. Farmer  
Rev. Sci. Inst. v-55, No. 3 (1984) 371-374.
9. Fajer Ávila, V.; R.A. Díaz Delgado; A. Combarro Romero; J.L. Díaz Morera; J. Ravelo Triana  
Rev. Cub. Fis. v-4, No. 2 (1984) 59-69.
10. Ebert, H.  
Kratkij sprabochnik po fizike, Gos-oe Izd. Fiz.-Mat.-oj Literaturi (1963), Moskva, 238-239.
11. Jaecklin, A.A.  
Laser Focus No. 6 (1970) 35.
12. ————— and M. Lietz  
App. Opt. v-11, No. 3 (1972) 617-621.
13. Cartaya Saíz, O.  
Introducción al Laboratorio de Física. Fundamentos de la Teoría de Errores. Taller de Ediciones del ISPJAE, La Habana (1982) 18.
14. Sivujin, D.V.  
Obschi kurs fiziki, Optika, Izd. Nauka, Moskva (1980) 579.
15. Landsberg, G.A.  
Optika, Izd. Nauka, Moskva (1976) 620.
16. Optisches Glas mit den Vorzugsglasern des VEB JENAER GLASWERK, JENA, DDR.