

Efecto Faraday

Amaro Colín Alan Gabriel

Espinoza Merino Angel

Resumen

Este reporte está enfocado en el estudio de la teoría y el registro de las propiedades magneto-ópticas de vidrio Flint SF-5 y F-2. Se utilizó un diseño experimental en el que se hacen variaciones del campo magnético y se contrasta su influencia en la rotación del plano de polarización de la luz linealmente polarizada al pasar por la muestra birrefringente contribuyendo a la determinación de la constante de Verdet que la caracteriza. Como resultado se obtiene que el valor de la constante de Verdet del material se obtiene con un error inferior a 5 unidades del valor internacionalmente reportado acorde al montaje experimental empleado para dos tipos de fuente de luz monocromática (541 y 644) nm. A su vez se observa una alta correlación lineal entre la diferencia angular y la intensidad del campo empleado, junto con la variación de la constante en función de la longitud de onda.

Palabras clave: Efecto Faraday, Constante de Verdet.

Abstract

This report is focused on the study of the theory and the recording of the magneto-optical properties of Flint SF-5 and F-2 glass. An experimental design was used in which variations of the magnetic field are made and its influence on the rotation of the polarization plane of the linearly polarized light is contrasted when passing through the birefringent sample, contributing to the determination of the Verdet constant that characterizes it. As a result, it is obtained that the value of the Verdet constant of the material is obtained with an error of less than 5 units of the internationally reported value according to the experimental setup used for two types of monochromatic light source (541 and 644) nm. In turn, a high linear correlation is observed between the angular difference and the intensity of the field used, together with the variation of the constant as a function of the wavelength.

Keywords: Faraday Effect, Verdet Constant.

1. Introducción

1.1. Efecto Faraday

El Efecto Faraday fue descubierto en 1845 por Michael Faraday. Este efecto describe como el plano de polarización de la luz puede cambiar y muestra como su alteración es proporcional a la intensidad de la componente del campo magnético en la dirección de propagación de la onda luminosa, tal como se observa en la figura 1. Para poder determinar el

grado de giro del plano de polarización en los diferentes materiales, se emplea una relación lineal de la forma:³¹⁴

$$\beta = VBd \quad (1)$$

- β , el ángulo de rotación.
- B , flujo de densidad magnética en la dirección de propagación.
- d , la longitud de camino óptico.

- V , la constante de Verdet.

Para calcular la constante tenemos:

$$\theta = -\frac{e}{2mc^2} \cdot H \cdot \lambda \frac{dn}{d\lambda}$$

La constante de Verdet será:

$$V = \frac{e\lambda}{2mc} \frac{dn}{d\lambda} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \theta}{\partial \lambda} \quad (2)$$

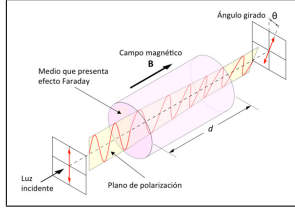


Figura 1: Representación del Efecto Faraday.

Para describir este efecto,⁵ el vector de polarización de los electrones en el material será:

$$\vec{P} = \frac{\vec{E} \left(\frac{Ne^2}{m} \right)}{\omega_0^2 - \omega^2 \mp eB\omega/m}$$

El vector de desplazamiento nos da:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$

Definimos la permitividad:

$$\epsilon = \epsilon_0 + \frac{\left(\frac{Ne^2}{m} \right)}{\omega_0^2 - \omega^2 \mp eB\omega/m}$$

Recordamos la definición del índice de refracción:

$$\eta = \sqrt{\epsilon/\epsilon_0}$$

Obtenemos los índices de refracción correspondientes a la polarización izquierda y derecha:

$$\eta_L^2 = 1 + \frac{\left(\frac{Ne^2}{m} \right)}{\omega_0^2 - \omega^2 + eB\omega/m}$$

$$\eta_R^2 = 1 + \frac{\left(\frac{Ne^2}{m} \right)}{\omega_0^2 - \omega^2 - eB\omega/m}$$

Finalmente, el vector de polarización será:

$$\vec{P} = \frac{\pi V}{c} L(\eta_R - \eta_L) \quad (3)$$

A partir de la deducción anterior, es importante observar los antecedentes para observar el fenómeno:

1. El medio a través del cual pase la luz debe ser un material birrefringente.
2. El campo magnético debe ser uniforme en el interior de la muestra.
3. El flujo de campo magnético debe estar en la dirección de la propagación de la luz.
4. La luz empleada debe ser monocromática.

Para satisfacer el requisito de un material birrefringente consideramos el vidrio Flint, el cual posee propiedades ideales al tener dos índices de refracción, translucidez y un alto valor de dispersión. Para la fuente de luz monocromática empleamos dos tipos de láser a 664 nm y 541 nm.

1.2. Bobinas de Helmholtz

Para garantizar un campo uniforme en el interior de la muestra empleamos la Bobina de Helmholtz.

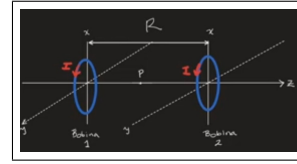


Figura 2: Bobina de Helmholtz.

Calculamos \vec{B} en p ubicado en el eje z , en $R/2$ como en la figura 2. Por superposición de campos tenemos:²

$$\vec{B}_p = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$$

$$B_1 = \frac{\mu_0 I N}{2(5/4)^{3/2} R} \vec{K}$$

$$B_2 = \frac{\mu_0 I N}{2(5/4)^{3/2} R} \vec{K}$$

Finalmente:

$$\vec{B}_p = \frac{\mu_0 I N}{(5/4)^{3/4} R} \vec{K} \quad (4)$$

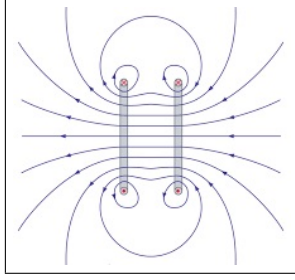


Figura 3: Líneas de campo de las bobinas de Helmholtz.

De la deducción anterior puede observarse que el campo B en el punto medio al interior del electroimán satisface ser constante. Dado que el electroimán puede alcanzar valores de 5KGs despreciamos la superposición con el campo magnético terrestre. De la figura 3 es importante realizar las mediciones de campo al interior del electroimán.

1.3. Datos teóricos

Para nuestro experimento, calculamos los valores teóricos:

λ (nm)	$V(\lambda)$ - SF5	$V(\lambda)$ - F2
541	16.14	13.54
664	12.51	10.38

2. Aplicación a la industria

- Radio: Las ondas de radio pasan por la ionósfera están sujetas a rotación del plano de polarización.⁷
- Ingeniería eléctrica: Es utilizado también como principio de funcionamiento de transformadores de corriente ópticos. El transformador es un transductor de corriente y/o voltaje utilizado para medir la corriente y el voltaje, para seguridad con la ventaja de no ser afectada por saturación e interferencias.⁷
- Telecomunicaciones: El uso de la fibra óptica en las telecomunicaciones trae consigo el uso del Efecto Faraday en la mejora de la eficiencia en la transmisión de datos, debido a la presencia de campos magnéticos y su efecto en la polarización de la luz transmitida.⁶

3. Metodología

Para recrear el efecto Faraday consideramos el montaje experimental presentado en la figura 4. La calibración de cada uno de los instrumentos empleados es descrita en mayor detalle en la información suplementaria S2 que puede consultarse en la sección 7.2. A manera de resumen; Es necesario desmagnetizar el **electroimán CESCO** alternando en polaridad y magnitud la corriente a través del mismo, este procedimiento se realiza para reducir posibles fuentes de ruido. A la **Fuente de poder BK-Precision** se le debe establecer un máximo de corriente (8A), el **multímetro STEREN 105** debe conectarse en serie y en medición de amperaje a 20 A - DC.

Posteriormente calibramos los polarizadores para observar un mínimo de intensidad, este mínimo es caracterizado por medio de luxómetro **STEREN HER-405**. El gaussímetro (calibrado) **5170** debe ser colocado en el interior del electroimán, la posición exacta puede variar acorde del modelo, sin embargo nosotros lo posicionamos donde detectamos mayor intensidad del campo.

En nuestro caso incorporamos **muestras de vidrio Flint**; F2 y SF5 de 3.05 cm y 4.04 cm. El vidrio Flint posee propiedades ideales para observar el fenómeno, tales como el ser un material translúcido birrefringente con un alto coeficiente de dispersión, estas muestras son posicionadas en el interior del electroimán y alineadas acorde al sistema Láser-Electroimán - Luxómetro.

Es importante notar que para sostener la muestra y el gaussímetro debe emplearse materiales diamagnéticos, en nuestro caso incorporamos una base de madera como soporte de las muestras y un sistema de pinza-soporte de aluminio para el gaussímetro.

Una vez que se cuenta con la calibración de los instrumentos y posicionamiento de las muestras comenzamos con las mediciones. Nosotros incorporamos dos fuentes de luz monocromática en forma de Láser (Verde y Rojo) de 541 nm y 664 nm. Partiendo de 7,6 A y un voltaje de 63 V aproximadamente vamos disminuyendo gradualmente la corriente en intervalos de 0,5 A, en cada descenso de corriente obtenemos la medición del campo magnético. Rotamos el polarizador móvil hasta observar un mínimo de intensidad (caracterizado por el luxómetro). Para una correcta caracterización de los mínimos

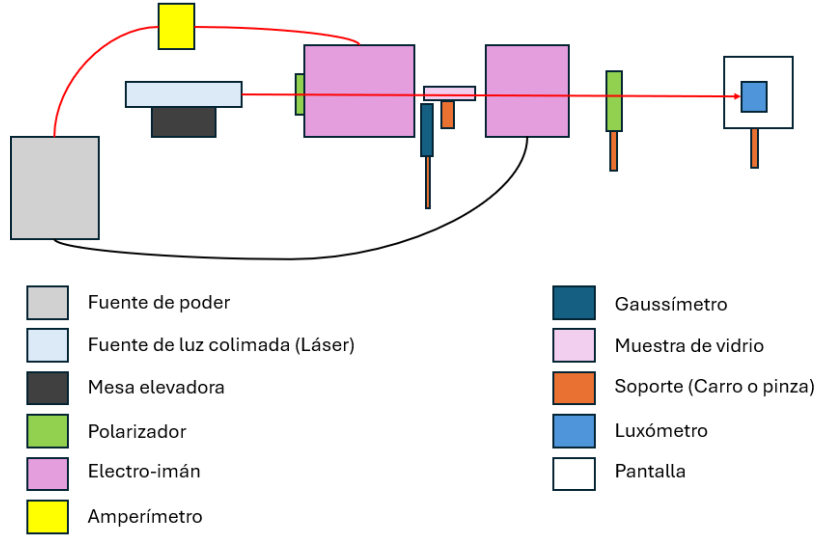


Figura 4: Montaje experimental

luminicos recomendamos realizar el experimento en un ambiente oscuro.

Realizamos este procedimiento hasta llegar al mínimo de corriente (1 A). Para la medición de la

siguiente muestra es necesario desmagnetizar nuevamente el equipo y re-caracterizar los máximos y mínimos de intensidad lumínica junto con la realineación del sistema.

4. Resultados

Los resultados completos obtenidos son de libre acceso y pueden consultarse en la información suplementaria I en la sección 7.1. En el mismo documento pueden consultarse las gráficas obtenidas de campo magnético en función de la corriente junto con una gráfica que representa la diferencia angular en función del campo aplicado. A continuación presentamos el resultado obtenido de la Constante de Verdet $V(\lambda)$ en unidades del Sistema Internacional rad/Tm . Para cada una de las muestras utilizamos el formato:

Tipo de vidrio - Espesor - Longitud de Onda - Método de obtención

De donde se obtienen:

- SF5 - 3.05 cm - 541 nm - Regresión lineal

$$V_{SF5}(541) = 10,67 \pm 43,37 \% \quad (5)$$

- SF5 - 4.04 cm - 541 nm - Promedio

$$V_{SF5}(541) = 12,34 \pm 24,65 \% \quad (6)$$

- F2 - 3.05 cm - 541 nm - Promedio

$$V_{F2}(541) = 14,86 \pm 30,14 \% \quad (7)$$

- F2 - 4.04 cm - 541 nm - Promedio

$$V_{F2}(541) = 10,71 \pm 41,22 \% \quad (8)$$

- SF5 - 3.05 cm - 664 nm - Regresión lineal

$$V_{SF5}(664) = 8,62 \pm 65,48 \% \quad (9)$$

- SF5 - 4.04 cm - 664 nm - Regresión lineal

$$V_{SF5}(664) = 8,92 \pm 65 \% \quad (10)$$

- F2 - 3.05 cm - 664 nm - Regresión lineal

$$V_{F2}(664) = 10,22 \pm 37,2 \% \quad (11)$$

- F2 - 4.04 cm - 664 nm - Regresión lineal

$$V_{F2}(664) = 9,06 \pm 65 \% \quad (12)$$

Para cada medición asignamos la incertidumbre más alta obtenida en el cálculo de la constante.

5. Discusión

Los resultados sugieren una alta correlación lineal entre la diferencia angular y el campo magnético aplicado. A su vez, notese que para cada una de las mediciones empleadas el campo magnético estuvo contenido en un régimen lineal.

Nuestro método para estimar la constante de Verdet a partir de muestras mediciones correspondió a asignar el valor más cercano al teórico entre el dado por la regresión lineal o por el valor promedio, dado que el error porcentual entre nuestro valor estimado y el teórico superaba las incertidumbres dadas por la desviación estándar, consideramos asignarle la incertidumbre más alta entre las mediciones recabadas.

Podemos observar que los resultados obtenidos para las muestras de vidrio SF-5 superan su incertidumbre porcentual con respecto a las obtenidas por las muestras de vidrio F2. Esto se repite para ambos láseres, lo cual puede ser un indicativo de que es mucho más complicado trabajar con el vidrio SF-5 y obtener mediciones confiables.

También observamos que la incertidumbre del polarizador es relativamente alta con respecto a las incertidumbres de los otros instrumentos de medición utilizados, en una cantidad no despreciable de datos la diferencia angular medida era menor a la incertidumbre de la diferencia, de tal manera que un punto de mejora podría utilizar un polarizador de mayor precisión o realizar las mediciones en un mayor orden de campo magnético. A su vez, notese que a partir de los instrumentos empleados únicamente es posible estimar el orden de la constante.

De los resultados puede observarse que el valor de la constante de Verdet para el mismo material varía acorde a la longitud de onda empleada, en concordancia con el marco teórico.

6. Conclusiones

Nuestros resultados sugieren una fuerte correlación lineal entre la diferencia angular y el campo

magnético empleado, de tal forma que la constante de proporcionalidad o constante de Verdet fue estimada para dos tipos de vidrio con alto índice de refracción, a su vez nuestros resultados sugieren una dependencia entre la constante de Verdet y la longitud de onda empleada. Los valores obtenidos difieren de los reportados internacionalmente en menos de 5 unidades. El vidrio SF-5 obtuvo incertidumbres porcentuales de más de 30 % en la mayoría de casos, por lo que su caracterización requiere de mediciones a mayores intervalos de campo magnético y durante mayor cantidad de tiempo de espera.

El desgaste del equipo durante el uso también afecta, esto debido al calentamiento de cables y de los dispositivos. Una oportunidad de mejora en la manera de trabajar es teniendo intervalos de tiempo prolongados para su enfriamiento entre cada serie de datos. De tal manera que nuestro montaje experimental permite una estimación en el orden de magnitud de la constante.

7. Información Suplementaria

7.1. Resultados de las mediciones

Cada uno de los resultados obtenidos es de libre acceso y puede consultarse en:

Resultados de las mediciones

7.2. Operación de los equipos

Una mayor descripción respecto a la operación de los equipos empleados y su incertidumbre es de libre acceso y puede consultarse en:

Operación de los equipos

Referencias

- [1] S Galindo and S Cruz. Aparato para la medición del efecto faraday. *Revista mexicana de física*, 48(5):475–484, 2002.
- [2] David J Griffiths. *Introduction to electrodynamics*. Cambridge University Press, 2023.
- [3] E. Hecht. *Optics*. Pearson, 2012.

- [4] Héctor Guerrero Padrón. *Desarrollo de dispositivos magnetoópticos por fibra óptica de plástico basados en el efecto Faraday*. PhD thesis, Universidad Complutense de Madrid, 1992.
- [5] Frank L Pedrotti, Leno M Pedrotti, and Leno S Pedrotti. *Introduction to optics*. Cambridge University Press, 2018.
- [6] A. W. Snyder and D. B. Mitchell. *Optical Waveguide Theory*. Springer, Berlin, 1983.
- [7] Amnon Yariv. Optical electronics in modern communications. *(No Title)*, 1997.