

Determinación experimental de los índices de refracción complejos de metales



DOI: <http://dx.doi.org/10.23857/dc.v7i5.2227>

Ciencias de técnicas y aplicadas
Artículo de investigación

Determinación experimental de los índices de refracción complejos de metales

Experimental determination of complex metal refraction indices

Determinação experimental de índices de refração complexos de metais

Marco Alejandro Rojas-Rojas ^I
marco.rojasr@ucuenca.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-2644-1344>

Freddy Patricio Guachún-Lucero ^{II}
patricio.guachun@ucuenca.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-1421-7804>

Irma Alicia Rojas-Rojas ^{III}
alicia.rojas@educacion.gob.ec
<https://orcid.org/0000-0002-8675-7367>

Richard Eduardo Lata-Reino ^{IV}
richardlatha@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-5823-2475>

Correspondencia: marco.rojasr@ucuenca.edu.ec

***Recibido:** 23 de julio 2021 ***Aceptado:** 20 de agosto de 2021 * **Publicado:** 09 de septiembre de 2021

- I. Universidad de Cuenca, Ecuador.
- II. Universidad de Cuenca, Ecuador.
- III. Unidad Educativa Presidente Jaime Roldós, Ecuador.
- IV. Colegio Hermano Miguel de la Salle, Ecuador.

Determinación experimental de los índices de refracción complejos de metales

Resumen

En este trabajo se describe el proceso seguido para determinar los índices de refracción complejos de los metales, mediante un proceso experimental sencillo, de modo que se pueda realizar en un laboratorio de óptica de una universidad. Esto es como un método alternativo a los procesos tradicionales que implican materiales sofisticados y de alto costo que en muchas ocasiones no se cuenta en un laboratorio convencional. Para el proceso se utilizó una lámina de oro y dos fuentes de diferentes longitudes de onda, una lámpara de sodio y un láser de Helio-Neón. Los resultados experimentales coinciden aceptablemente con los datos que se encuentran en los libros especializados de óptica. Entre las conclusiones destaca: Se ha puesto de manifiesto que el espectrogoniómetro es un dispositivo muy útil para poder realizar experiencias sobre óptica en la que los ángulos jueguen un papel relevante. Su manejo y puesta a punto ha sido en sí misma una buena clase de repaso de conceptos ópticos.

Palabras clave: Índices de refracción; complejos; ejes ópticos; laboratorio de óptica.

Abstract

This work describes the process followed to determine the complex refractive indices of metals, by means of a simple experimental process, so that it can be carried out in a university optics laboratory. This is as an alternative method to traditional processes that involve sophisticated and high-cost materials that are often not counted in a conventional laboratory. For the process, a gold foil and two sources of different wavelengths were used, a sodium lamp and a Helium-Neon laser. The experimental results agree acceptably with the data found in specialized books on optics. Among the conclusions, it stands out: It has been shown that the spectrogoniometer is a very useful device to be able to carry out experiments on optics in which angles play a relevant role. Its handling and fine-tuning has in itself been a good kind of refresher on optical concepts.

Keywords: Complex refractive indices; optical axes; optics laboratory.

Determinación experimental de los índices de refracción complejos de metales

Resumo

Este trabalho descreve o processo seguido para determinar os índices de refração complexos de metais, por meio de um processo experimental simples, de forma que possa ser realizado em um laboratório de óptica universitária. É um método alternativo aos processos tradicionais que envolvem materiais sofisticados e de alto custo que muitas vezes não são contados em um laboratório convencional. Para o processo, foram utilizadas uma folha de ouro e duas fontes de comprimentos de onda diferentes, uma lâmpada de sódio e um laser de Hélio-Néon. Os resultados experimentais concordam de forma aceitável com os dados encontrados em livros especializados em óptica. Dentre as conclusões, destaca-se: Foi demonstrado que o espectrogoniômetro é um dispositivo muito útil para poder realizar experimentos em óptica em que os ângulos desempenham um papel relevante. Seu manuseio e ajuste fino já foram, por si só, um bom tipo de atualização nos conceitos ópticos.

Palavras-chave: Índices de refração complexos; eixos ópticos; laboratório de óptica.

Introducción

El estudio de la óptica ha evolucionado desde los inicios de la física, dándonos contribuciones imprescindibles para nuestra vida cotidiana. Su estudio abarca fenómenos relacionados con reflexión, refracción y las interacciones de la luz con la materia, es decir, estudiar la luz es saber cómo se comporta en la materia. Para analizar el comportamiento de la luz al desplazarse entre dos medios que tienen índices de refracción distintos se necesita un conjunto de relaciones matemáticas que relacionen las amplitudes de las ondas; reflejada y transmitida en función de la amplitud de la onda incidente, para ello hay que valerse de las fórmulas de Fresnel que son las que estudian este fenómeno. La actividad experimental es una actividad indispensable en el estudio de la física, pues mediante es donde se relaciona la teoría con la práctica. El hecho de aprender mediante la experimentación resulta beneficioso puesto que manipular los instrumentos y realizar los desarrollos experimentales implica a la vez un avance en la adquisición de conceptos teóricos. También, una vez aprendidos los procedimientos y métodos, resulta fácil resolver problemas conceptuales o inclusive puede llevar al estudiante a reflexionar sobre nuevas situaciones y descubrir nuevos fenómenos.

El objetivo principal de este trabajo consistirá en proponer experiencias de laboratorio que permitan descubrir y/o entender cómo es la respuesta óptica de diferentes materiales. Para su consecución será necesario llegar a desarrollar los siguientes hitos:

Determinación experimental de los índices de refracción complejos de metales

- Se revisará para eso las conocidas Fórmulas de Fresnel, las mismas que permitirán identificar posibles experiencias realizables en el laboratorio que se intentará realizar y comparar con los resultados experimentales para verificar su buen ajuste y las posibles dificultades experimentales que puedan aparecer. Las Fórmulas de Fresnel va a permitir identificar ciertos ángulos de incidencia de la luz muy particulares (ángulo de Brewster, ángulo principal, etcétera) que hacen que la luz tras interactuar con el medio adquiera propiedades de polarización o desfases muy concretos. Entender cuándo y cómo aparecen estos ángulos y sus efectos permitirá identificar experiencias muy didácticas sobre la respuesta óptica de los materiales.
- La aparición de estos ángulos particulares como claves en este trabajo ha obligado a buscar un aparato capaz de medir ángulos con precisión y poder llevar a cabo alguno de las experiencias planteadas. Se trata del espectrogoniómetro, un aparato que permite medir con mucha precisión ángulos en el laboratorio y cuyo manejo se explicará dentro de este trabajo.
- También se podrá realizar experiencias con materiales metálicos. En este caso lo primero que se debe hacer es caracterizar el metal, es decir, proponer alguna estrategia para caracterizar la respuesta óptica del metal en cuestión. Aquí podremos hacer uso de los efectos que aparecen en el caso de incidir en el ángulo de Brewster, ángulo principal, etc.

Desarrollo

Estudiar la caracterización de la respuesta óptica de diferentes materiales mediante el estudio de las modificaciones de las características de la luz una vez que haya interactuado con ellos es un trabajo que requiere conocimientos de las leyes de reflexión, refracción, ecuaciones de Fresnel, etc. Por lo tanto, se explicará qué ocurre con los materiales cuando interactúan con la luz, y podremos adoptar estos conceptos teóricos para el desarrollo experimental del presente trabajo.

Las ecuaciones de Fresnel

Si se tiene una onda polarizada, sea cual sea su polarización, podemos descomponer su campo eléctrico E y magnético B en componentes paralelas y perpendiculares al plano de incidencia. Recordemos que el plano de incidencia es el plano formado por el rayo incidente y la normal en el punto de incidencia. Se utilizará una interdependencia compartida por las amplitudes del campo eléctrico E_{0i} , E_{0r} y E_{0t} en la frontera. Lo más usual es trabajar con dieléctricos donde las

Determinación experimental de los índices de refracción complejos de metales

permeabilidades son $\mu_i \approx \mu_t \approx \mu_0$, entonces las ecuaciones de Fresnel de una forma más común son [1]:

$$r_{\perp} = -\frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \quad (1)$$

$$r_{\parallel} = \frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)} \quad (2)$$

$$t_{\perp} = \frac{2 \sin \theta_t \cos \theta_i}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \quad (3)$$

$$t_{\parallel} = \frac{2 \sin \theta_t \cos \theta_i}{\sin(\theta_i + \theta_t) \cos(\theta_i - \theta_t)} \quad (4)$$

Donde, r_{\parallel} es el coeficiente de reflexión para la amplitud, y t_{\parallel} es el coeficiente de transmisión para la amplitud. Notar que en el caso en que el campo eléctrico E es paralelo al plano de incidencia utilizamos el subíndice \parallel y \perp cuando el campo eléctrico E es perpendicular al plano de incidencia.

Reflectancia y Transmitancia. La reflectancia R y transmitancia T son las capacidades que tienen las superficies de reflejar o transmitir la luz respectivamente. Para el análisis de la reflectancia R y transmitancia T en términos de las componentes sus campos reflejado y transmitido. La expresión para representar la conservación de energía es [1]:

$$R + T = 1 \quad (5)$$

Esto es válido en situaciones ideales donde no haya absorciones.

Reflexión en metales. Supongamos que tenemos una onda plana que inicialmente se encuentra en el aire y la hacemos incidir en una superficie conductora o metal. Ahora en un buen conductor la onda

Determinación experimental de los índices de refracción complejos de metales

transmitida se propaga en dirección perpendicular a la interfaz sin importar el ángulo de incidencia θ_i .

La reflectancia que es igual a $R = r^2$, donde el índice de refracción del medio de incidencia será el aire $n_i = 1$ y del medio transmitido $n_t = \tilde{n}$ (\tilde{n} es el índice complejo). De esta forma solo necesitamos reemplazar el índice complejo que se expresa de la siguiente manera.

$$\tilde{n} = n_R + in_I \quad (6)$$

Donde,

$$n_R = -\cos 2\alpha \sin \bar{\theta} \tan \bar{\theta} \quad (7)$$

$$n_I = +\sin 2\alpha \sin \bar{\theta} \tan \bar{\theta} \quad (8)$$

n_R : Índice real

n_I : Índice imaginario [5]

Propuesta de práctica experimental

Para la caracterización de la respuesta óptica de materiales se debe conocer el comportamiento de la luz cuando interacciona con ellos. En este trabajo se utilizarán dos fuentes de luz, una lámpara de sodio y un láser de Helio-Neón, cada uno con diferente longitud de onda. Para conocer las propiedades ópticas de los materiales haremos uso de la respuesta conocida de la luz en algunos ángulos, por ejemplo, el ángulo de Brewster, el ángulo incidencia principal, etc. Para poder medir con precisión estos ángulos y así poder determinar la respuesta óptica de los materiales tendremos que hacer uso de materiales e instrumentos específicos como: polarizadores lineales, láminas $\lambda/4$, el espectrogoniómetro, etc.

Puesta a punto del Espectrogoniómetro

El espectrogoniómetro es un instrumento que permite medir ángulos con gran precisión. Se utiliza para realizar medidas precisas de cualquier ángulo que esté definido por un haz de luz. Al igual que todos los instrumentos de medición, antes de cualquier experimento es necesario conocer sus características y calibrarlo correctamente. Las componentes principales del espectrogoniómetro son un anteojo móvil, una plataforma giratoria y un colimador fijo.

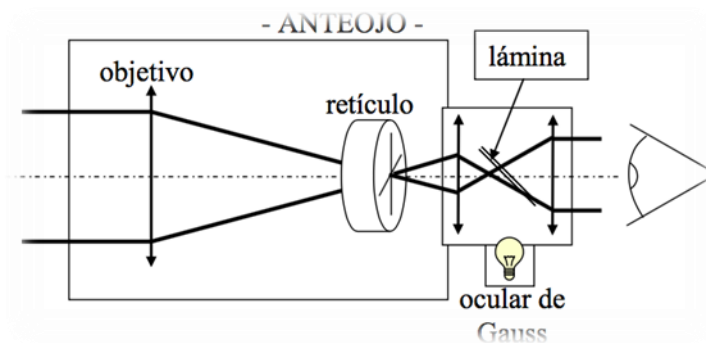
Determinación experimental de los índices de refracción complejos de metales

Figura 1: Componentes principales del espectrogoniómetro



Anteojo: Consta de un retículo, un ocular de Gauss y de un objetivo. El ocular está formado por dos lentes y situado entre ellas una lámina de vidrio a 45° con el eje. Esta lámina de vidrio tiene como objetivo reflejar la luz que recibe de una bombilla adosada al ocular. Esta luz que se refleja en el vidrio va a iluminar el retículo y de esta forma se puede ajustar en anteojo.

Figura 2. Marcha de rayos en un anteojo. [5]



Se debe enfocar el retículo desplazando el ocular respecto al objetivo con una ruedecita situada al lado del tubo del anteojo. Además, el anteojo tiene en su base dos tornillos de diferente tamaño para modificar la posición del anteojo con respecto al eje de giro del espectrogoniómetro. El tornillo pequeño sirve para fijar o dejar libre el anteojo y el tornillo grande sirve para realizar movimientos finos, este tornillo grande sirve solo cuando el pequeño está apretado.

Plataforma giratoria: Sirve para colocar los materiales a estudiar. Para su regulación en altura y nivelación horizontal lleva tres tornillos a 120° . Además, en la base de la plataforma giratoria hay dos tornillos de diferentes tamaños, un pequeño que la fija o deja libre y otro grande que permite realizar solo movimientos finos.

Determinación experimental de los índices de refracción complejos de metales

Colimador: Consta de una lente colimadora y una rendija. El tamaño de la rendija es variable. El colimador lleva dos tornillos de diferente tamaño que le permiten tener movimiento sobre su eje. Cabe recalcar que el espectrogoniómetro tiene una escala principal de 360° con precisión de 30 segundos, y dos escalas secundarias auxiliares diametralmente opuestas que permiten apreciar una medición con mayor exactitud al complementar la escala principal. Esta escala secundaria o nonio permite que los valores sean leídos con una precisión de la medición de 30 segundos.

Obtención de las constantes ópticas del metal experimentalmente con una lámpara de sodio de longitud de onda 589,3 nm

Se va a medir las constantes ópticas de un metal a partir de los efectos que produce la reflexión metálica en el estado de polarización de la luz. Para esta actividad se utiliza un espectrogoniómetro iluminado con una lámpara de sodio de longitud de onda 589,3 nm, en su plataforma se colocará la lámina metálica que será estudiada. Además, dos polarizadores lineales acoplados al colimador y al antejo, y una lámina $\lambda/4$. Cabe recalcar que todos los valores serán validados mediante la comparación con los análisis obtenidos teóricamente.

Ahora se miden las constantes ópticas de un metal a partir de los efectos que produce la reflexión metálica en el estado de polarización de la luz. Se verifica que el espectrogoniómetro esté calibrado. Luego se determinan los ejes de transmisión de los polarizadores lineales mediante la incidencia con ángulo de Brewster sobre el prisma, de modo que la luz reflejada quede polarizada linealmente y perpendicularmente al plano de incidencia. Seguidamente se coloca la lámina $\lambda/4$ para la lámpara de sodio después del polarizador del colimador y se determinan los ejes de la lámina (está correctamente ubicada cuando la luz es extinguida). Finalmente se gira el polarizador del colimador 45 grados para tener luz circular. La luz incidente debe ser circular porque reflejada en el metal con un ángulo de incidencia principal se transforma en lineal y podemos extinguirla con un polarizador.

Recordemos que el ángulo de Brewster θ_B existe cuando hacemos incidir un haz linealmente polarizado en dirección paralela al plano de incidencia, el haz reflejado se anula en el ángulo de Brewster y se produce una transmisión total. Este ángulo es igual a $\theta_B = \tan^{-1}(n_t/n_i)$ [2]. Ahora en la plataforma del espectrogoniómetro se coloca la lámina metálica y se halla el ángulo de incidencia

Determinación experimental de los índices de refracción complejos de metales

principal. Sabemos que es el ángulo de incidencia principal cuando la luz circular incidente se transforma en lineal al reflejarse en el metal, con lo que podemos ver una extinción clara al actuar sobre el polarizador P1 del antejo. Para todos los demás casos la luz que llega es elíptica y no podemos extinguirla mediante el polarizador P1. El ángulo obtenido en P1 es el azimut Ψ'' , y de las ecuaciones anteriores deducimos que $\alpha = \frac{\pi}{2} - \Psi''$.

Finalmente, se mide el ángulo de incidencia principal y el azimut de la luz reflejada para luego calcular la parte real y la parte imaginaria del índice de refracción complejo de la lámina metálica utilizando las fórmulas presentadas anteriormente.

Los resultados que se obtuvieron son los siguientes:

Tabla 1: Valores del azimut y α para diferentes ángulos principales.

$\bar{\theta}$ (grados)	$\bar{\Psi}''$ (grados)	α (grados)
70,705	32,1	57,2
69,545	38,4	51,6
68,635	41,3	48,7
68,000	41,3	48,7
67,525	41,3	48,7
66,610	41,7	48,3
$\bar{x} = 68,503$	$\bar{x} = 39,3$	$\bar{x} = 50,6$

De esta manera se consiguieron los valores del ángulo principal ($\bar{\theta}$) y α . En el experimento se obtuvieron seis medidas del ángulo de incidencia principal que se interpretaron como válidas, pero para el análisis se realizará con el valor de solo un ángulo de incidencia principal para ello se obtiene el promedio de los valores experimentales. Finalmente utilizando las fórmulas anteriores podemos encontrar la parte real e imaginaria del índice de refracción complejo de la lámina metálica.

Parte real:

$$n_R = -\cos 2\alpha \sin \bar{\theta} \tan \bar{\theta} = -\cos(2 \cdot 50,65) \sin(68,5) \tan(68,5) = 0,4801$$

Determinación experimental de los índices de refracción complejos de metales

Parte imaginaria:

$$n_I = +\sin 2\alpha \sin \bar{\theta} \tan \bar{\theta} = +\sin(2 \cdot 50,65) \sin(68,5) \tan(68,5) = 2,3054$$

Entonces el índice de refracción complejo de la lámina metálica es:

$$\begin{aligned}\tilde{n} &= n_R + i \cdot n_I \\ \tilde{n} &= 0,4801 + 2,3054 \cdot i\end{aligned}$$

Al revisar [4] que es una fuente donde se presentan los índices de refracción de metales a determinadas longitudes de onda se obtiene que este índice de reflexión complejo pertenece a una lámina de oro. El índice de refracción teórico del oro a una longitud de onda 589,3 nm es similar a los obtenidos experimentalmente, este valor es:

$$\tilde{n} = 0,2734 + 2,9479 \cdot i$$

Se puede concluir que los índices complejos no son del todo iguales ya que experimentalmente se pueden tener errores en las mediciones o no sabemos con certeza qué tipo de oro tenemos y quizá, en función de la pureza, puede que la respuesta óptica sea algo diferente.

A. Obtención de las constantes ópticas del metal experimentalmente con un láser de Helio-Neón de longitud de onda 633 nm

Se utiliza una fuente de luz es un láser de Helio-Neón de 633 nm y se analiza la reflexión de la luz al incidir en la misma lámina metálica de la experiencia anterior, de modo que la puesta a punto del experimento es idéntica a la anterior. La diferencia es que sustituimos la fuente de luz de la lámpara de sodio por el láser de Helio-Neón, además se cambia la lámina retardadora $\lambda/4$ para el sodio por una específica para el láser de Helio-Neón de 633 nm. La dificultad que presenta esta situación es que se debe reducir la potencia del láser con polarizadores lineales. Además, como del láser sale un haz muy estrecho de luz se debe colocar un objetivo de microscopio después del láser para generar un haz divergente que llega a la rendija del colimador.

De forma similar a la anterior, se varía el eje de la lámina metálica y del anteojito hasta obtener la incidencia con el ángulo principal ($\bar{\theta}$), que es cuando llega la luz lineal. Seguidamente con el

Determinación experimental de los índices de refracción complejos de metales

polarizador P1 se extingue la luz y se procede a tomar las medidas del ángulo principal y su acimut principal $\bar{\Psi}$. Para todos los demás ángulos de incidencia la luz que llega es elíptica y no se puede extinguir con el polarizador P1.

Entonces considerando estas modificaciones se obtienen los siguientes valores.

Tabla 2: Valores del azimut y α en dependencia del ángulo principal.

$\bar{\theta}$ (grados)	$\bar{\Psi}$ (grados)	α (grados)
71,417	43,3	46,7
71,675	41,5	48,5
72,617	41,3	48,7
73,670	41,1	48,9
$\bar{x} = 72,344$	$\bar{x} = 41,8$	$\bar{x} = 48,2$

En el experimento se tomaron cuatro medidas del ángulo de incidencia principal que se interpretaron como válidas. Para el análisis se utilizará la media de estas medidas para hallar las constantes ópticas de la lámina metálica.

Haciendo uso de las fórmulas deducidas anteriormente se calcula el índice de refracción complejo de la lámina metálica.

Parte real:

$$n_R = -\cos 2\alpha \sin \bar{\theta} \tan \bar{\theta} = -\cos(2 \cdot 48,2) \sin(72,34) \tan(72,34) = 0,3384$$

Parte imaginaria:

$$n_I = +\sin 2\alpha \sin \bar{\theta} \tan \bar{\theta} = +\sin(2 \cdot 48,2) \sin(72,34) \tan(72,34) = 2,9818$$

Entonces el índice de refracción complejo de la lámina metálica es:

$$\begin{aligned}\tilde{n} &= n_R + i \cdot n_I \\ \tilde{n} &= 0,3384 + 2,9818 \cdot i\end{aligned}$$

Determinación experimental de los índices de refracción complejos de metales

El valor obtenido experimentalmente es similar al valor teórico del oro para una longitud de onda igual a 633 nm, véase en [4]. Este valor teórico es:

$$\tilde{n} = 0,1834 + 3,4332 \cdot i$$

Esta experiencia es mucho mejor ya que se obtiene mayor exactitud en el índice de refracción complejo. El motivo por el que no se obtuvo un valor de índice de refracción complejo igual al valor teóricos puede deberse a que la lámina del laboratorio no tiene la superficie totalmente lisa, o pueden existir impurezas en la lámina de oro, por lo que sus constantes ópticas no coinciden con la del oro puro. Además, hay errores experimentales, por ejemplo, poner a punto el experimento, determinar a ojo la posición de la extinción de la luz, exactitud de medidas tomadas de los ángulos, etc.

Conclusiones

Las conclusiones más relevantes de este trabajo son:

- Se ha puesto de manifiesto que el espectrogoniómetro es un dispositivo muy útil para poder realizar experiencias sobre óptica en la que los ángulos jueguen un papel relevante. Su manejo y puesta a punto ha sido en sí misma una buena clase de repaso de conceptos ópticos.
- La experiencia relacionada con la caracterización de la respuesta óptica del metal ha sido algo más compleja. La identificación del ángulo principal no es tan clara con lo que la caracterización del metal lleva un error asociado no despreciable.
- Como intento de mejora se planteó el uso de una fuente más monocromática (un láser de He-Ne en vez de una lámpara de Sodio) obteniendo una clara mejora en el resultado, aunque manteniendo todavía cierta ambigüedad en la determinación del ángulo principal.
- Los experimentos de este trabajo pueden desarrollarse en un laboratorio convencional sin la necesidad de utilizar materiales costosos y sofisticados.

Referencias

1. [1] Hecht, Eugene. “Óptica”, 3ra ed. Addison Wesley Iberoamericana. pp. 113-134. 2000.
2. [2] Francis A. Jenkins y Harvey E. White. “Fundamentals of optics”, 3ra ed. Aguilar S. A. de ediciones. Pp. 534-535-559-569-573. 1964.
3. [3] Vendrell, Mario. “Óptica cristalina”. Disponible en: <http://www.fempatrimoni.cat/www-crista/OPTICA/8-dielectrics.PDF>. Consultado el 05/05/2021.
4. [4] MN Polyanskiy. "Base de datos de índice de refracción". Disponible en: <https://refractiveindex.info>. Consultado el 07/05/2021.
5. [5] Isabel Arias, Rocio Borrego y Ana García González. “Proyecto de innovación docente: elaboración de guiones de prácticas para el laboratorio de óptica”. Salamanca. Disponible en: https://gedos.usal.es/jspui/bitstream/10366/120530/1/MID_11_075.pdf. Consultado el 03/05/2021.
6. [6] Wolfram, Stephen. “Wolfram computation meets knowledge”. Disponible en: <https://www.wolfram.com/mathematica/>. Consultado 02/04/2021.
7. [7] Petre Catalin Logofatu. “Simple method for determining the fast axis of a wave plate”. Opt. Eng. 41(12) 3316-3318 (2002).

©2021 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

[\(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).