



CARACTERIZACIÓN ÓPTICA DE CRISTALES FOTORREFRACTIVOS $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$: COEFICIENTE DE ABSORCIÓN LINEAL

OPTICAL CHARACTERIZATION OF PHOTOREFRACTIVE CRYSTALS $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$: ABSORPTION COEFFICIENT

¹ William Daniel Laguado Sierra

³ María Alejandra Guerrero Vanegas.

^{1,2} Programa de Física, Semillero Óptica Moderna

^{1,2} Universidad de Pamplona

RESUMEN

En este trabajo se determinó el espectro de absorción lineal de cristales de BSO, caracterización en la cual se tuvo en cuenta las pérdidas por reflexión. De otra parte, para estos mismos cristales se implementó una técnica basada en el método de análisis de Mueller-Stokes; la técnica implementada tiene la ventaja de que permite determinar de manera simultánea la actividad óptica y el coeficiente electro-óptico. Este estudio se hizo aplicando voltaje a cada cristal en configuración transversal. En esta caracterización observamos variación de la actividad óptica en función del voltaje aplicado, esto en una de las muestras de estudio. Se realizó el modelo teóricamente del arreglo óptico de la técnica implementada que consiste en obtener la matriz de Mueller de transferencia del arreglo óptico.

Palabras Claves: Coeficiente electro-óptico, Coeficiente de Absorción, Actividad Óptica, BSO

ABSTRACT

In this work, the linear absorption spectrum of BSO crystals was determined, characterization in which reflection losses were taken into account. On the other hand, for these same crystals a technique based on the Mueller-Stokes analysis method was implemented; The implemented technique has the advantage that it allows the simultaneous determination of the optical activity and the electro-optical coefficient. This study was done by applying voltage to each crystal in a transverse configuration. In this characterization we observe variation of the optical activity as a function of the applied voltage, this in one of the study samples. I know theoretically carried out the model of the optical arrangement of the implemented technique that consists of obtaining the Mueller matrix of transfer of the optical arrangement.

Key Words: Electro-optic Coefficient, Absorption Coefficient, Optical Activity, BSO



I. Introducción

El efecto fotorrefractivo se define como el cambio local del índice de refracción, que se produce por la variación espacial de la intensidad de la luz en el interior del material [2][5][19]. Tal efecto fue descubierto en el año de 1966 por A. Ashkin [1][2][5][13], unos años después de la invención del láser en 1960 cuando estudiaban las propiedades electro-ópticas de cristales ferroeléctricos, entre ellos el $LiNbO_2$ [5]. Lo denominaron inicialmente daño óptico [1][2] el cual es descrito como una “in-homogeneidad” reversible del índice de refracción inducida por luz, fácilmente producida por un haz visible y focalizado de varios mili watts [13], debido al cambio en el índice de refracción del material inducido por la propia luz, que destruía el ajuste de fase buscado para generación del segundo armónico [1].

El efecto fotorrefractivo es un efecto no lineal [2][5] y no local, pues el proceso de transporte de carga origina un cambio de índice desplazado espacialmente frente a la iluminación [1]; sin embargo, los fenómenos no lineales por efecto fotorrefractivo no son causados directamente por el campo eléctrico de la luz que perturba el material, como si sucede en los materiales no lineales puros; esta especial característica de los materiales fotorrefractivos permite generar efectos de orden superior con intensidades de la radiación electromagnética igual o inferior a $1mW/cm^2$ [1][2][19], así como para procesos de generación de segundo armónico o de tercer orden, el Kerr óptico necesitan potencias del orden de kW/cm^2 o mayores. Un aspecto más a destacar es la escala de tiempos en las que opera el efecto fotorrefractivo; normalmente, el tiempo de respuesta fotorrefractivo oscila entre 10^{-3} y 10^3 segundos para intensidades en el rango de mW/cm^2 a W/cm^2 , frente a los 10^{-14} segundos típicos en óptica no lineal convencional [1]. Estos tiempos pueden ser mayores o menores dependiendo de la intensidad de la luz incidente, tan bajo como los nano-segundos o mayores para altas intensidades a temperatura ambiente.

El efecto fotorrefractivo ha sido observado en muchos cristales electro-ópticos[5] incluyendo $KNbO_3$, $LiTaO_3$, $Sr_{1-x}Ba_xNb_2O_6$ (SBN), $Na_{2-x}Sr_xK_{1-y}Nb_5O_{15}$ (KNSBN), $GaAs$, InP , $CdTe$, [2][5]; algunos ferroeléctricos como $LiNbO_3$, $BaTiO_3$, y no ferroeléctricos como: $Bi_{12}SiO_{20}$ (BSO), $Bi_{12}GeO_{20}$ (BGO), $Bi_{12}TiO_{20}$ (BTO) [2][8][14]

1.1. MATERIALES FOTORREFRACTIVOS: FAMILIA SILENITAS. Los cristales más conocidos de esta familia son: $Bi_{12}GeO_{20}$ (BGO), $Bi_{12}SiO_{20}$ (BSO), y $Bi_{12}TiO_{20}$ (BTO) son cristales con una estructura cubica centrada en el cuerpo, pertenecientes al grupo I-23 [8] y son piezoeléctricos, electro y elasto-ópticos y ópticamente activos [17] [15]. Los primeros en determinar la estructura cristalina de los silenitas fueron Abrahams y colaboradores, resultando de sus investigaciones que esta familia cristaliza en el sistema cubico con simetría 23 y consta de una doble estructura de $Bi_{12}XO_{20}$ por celda unidad [30]. Además del efecto fotorrefractivo, estos materiales presentan otros dos efectos bajo la propagación de la luz: la birrefringencia, que describe la presencia de más de un índice de refracción en el material al ser sometido a la acción de un campo eléctrico externo y la actividad óptica que es una propiedad que hace girar el plano de polarización de la luz al viajar esta por el material. Se crecen en el laboratorio a partir de una mezcla estequiométrica de óxidos de Bi_2O_3 y XO_2 ($X = G, S, T$) en proporción 6/1 [14] [30]. Estos materiales presentan fotorrefractividad y son apropiados para holografía en tiempo real, usando



radiación de intensidad relativamente baja ($1mW/cm^2$) [2] [19] e Interferometría holográfica [21], han sido utilizados en el procesamiento óptico de señales, en holografía dinámica, en óptica de fase conjugada y en interconexión óptica de redes entre otras aplicaciones tecnológicas [8].

1.2. SILICATO DE BISMUTO $Bi_{12}SiO_{20}$ (BSO). El cristal fotorrefractivo $Bi_{12}SiO_{20}$ (BSO), pertenece a la familia de las silenitas [30] que son cristales con una estructura cubica centrada en el cuerpo, pertenecientes al grupo I23. Estos cristales poseen una respuesta muy rápida a la iluminación, alcanzan una alta foto sensibilidad (comparable a la de las placas fotográficas $300\mu Jcm^{-1}$) y el tiempo de almacenaje de la información grabada en ellos es relativamente alto, especialmente si se emplean técnicas de fijado. Así mismo, al igual que todos los cristales fotorrefractivos tienen reciclabilidad ilimitada. La capacidad de almacenamiento de información en estos materiales es mucho mayor ($\sim = 104$ veces) que en materiales magnéticos. [8]

El BSO es un material donde el silicio se reemplaza en el centro de la estructura cristalina[8], que en estado puro presenta una coloración amarillenta y una fuerte reflectividad, aproximadamente del 20 % a incidencia normal, ya que el índice de refracción de estos materiales oscila alrededor de 2,5 en la región del visible, debido a que su estructura cristalina cubica es ópticamente isótropo, es decir, presenta un único índice de refracción, aunque cuando se le aplica un campo eléctrico presenta birrefringencia inducida debido al efecto electro-óptico lineal. Este cristal presenta una amplia zona de alta transmisión entre el ultravioleta cercano ($430nm$) [14] y el infrarrojo por la absorción vibracional ($6\mu m$), también presenta alta fotoconductividad y una fuerte actividad óptica natural, propiedad que consiste en rotar el plano de polarización de la luz linealmente polarizada cuando esta atraviesa el medio, la medida de dicha actividad se da a través de un parámetro que mide el número de grados rotados por milímetro atravesado, que se denomina poder de rotación óptica en sentido dextrógiro -poder rotatorio positivo- o levógiro -poder rotatorio negativo-. El tipo de giro depende del crecimiento del cristal, dándose con igual probabilidad.

Tabla 1. Propiedades ópticas y eléctricas del BSO

Propiedades	Valores					
Longitud de onda (nm)	400	457	488	514	633	700
Índice de refracción	2.860	2.75	2.650	2.615	2.540	2.51
Actividad Óptica (grados/mm)	82	60	44	38	22	12
Simetría	23					
Coefficiente Electro-óptico	$3,4 \times 10^{-12}m/V - 4,1 \times 10^{-12} m/V$					
Tipo de Conducción	P					
Constante Dieléctrica	56					
Banda de Transmisión	450nm a 750nm					
Resistividad	$5 \times 10^{13}\Omega cm$ (en la oscuridad)					
Temperatura de Fundido	900 grados Celsius					
Densidad	$9,15g/cm^3$					

Fuente: Elaboración basado en [4] [21]

Estos cristales al tener en el centro de su estructura cristalina un átomo de **Si**, su dopaje suele ser de valencia tres (grupo III de la tabla periódica) como Al, B, Ga, In, Fe. Nuevamente, el átomo introducido es neutro, por lo que no modificara la neutralidad eléctrica del cristal, pero debido a que solo tiene tres electrones en su última capa de valencia, aparecerá una ligadura rota, que tendra a tomar electrones de los átomos próximos, generando finalmente más huecos que electrones, por lo que los primeros serán los portadores mayoritarios y los segundos los minoritarios.

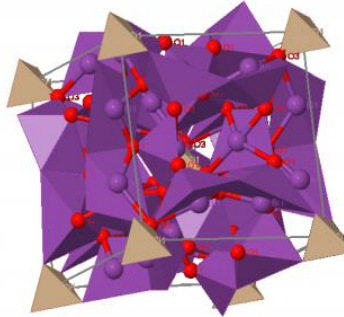


Figura 1. Estructura Cristalina 43m del cristal de BSO

Para el BSO, el índice de refracción varía desde 2,86 para el azul (400nm) hasta 2,51 para el rojo (700nm) [5] [14] [30]. El decrecimiento es continuo, lo que significa que no existe bandas de absorción en la región del visible. Los valores representados en la figura 1.1 para el caso del BSO coincide dentro del error experimental (+0,005) [5]

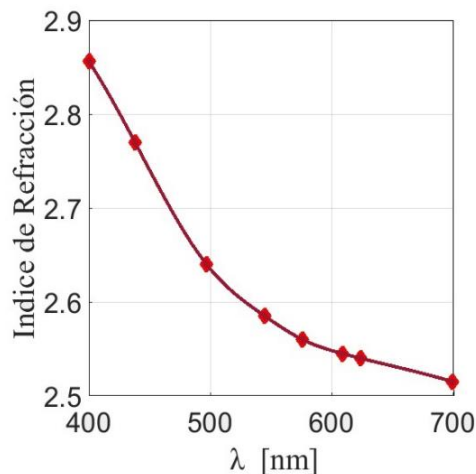


Figura 2: Valores del índice de refracción para un cristal BSO [29].
(Grafico obtenido por interpolación de los valores referenciados en la tabla 1)

Se observa una fuerte variación del índice de refracción del 35 % entre la longitud de onda 400 nm a 700 nm. Los valores del índice de refracción del BSO son altos y esto implica alta reflectividad; entonces podemos estimar que la reflectividad es del 23.21 % para 400 nm y de 18.51 % para 700 nm; esto implica que se hace necesario considerar esta situación cuando se mida el coeficiente de absorción. En un experimento de medida de la absorción a partir de la transmitancia, se debe considerar esta reflectividad como perdidas a tener en cuenta en el balance de la energía real que absorbe el material.

II. Montajes y toma de datos

2.1 MEDICION DEL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN LINEAL: El coeficiente de absorción representa la atenuación sufrida por los haces cuando atraviesan el material [3]; el espectro de absorción del BSO se usa para conocer la atenuación que sufrirán los haces al atravesarlo a las longitudes de onda de trabajo [5] y además la absorción en el rango óptico depende fuertemente del dopaje de los cristales. El espectro de absorción del BSO/BGO puro presenta una elevación (centrada en $2,8eV$) en longitudes de onda entre los 400 y 500 nm, muy próximo al borde de absorción ($3,25eV$) [5] [27] responsable de la fotoconductividad en el visible y de la coloración amarillenta que presenta el BSO/BGO.

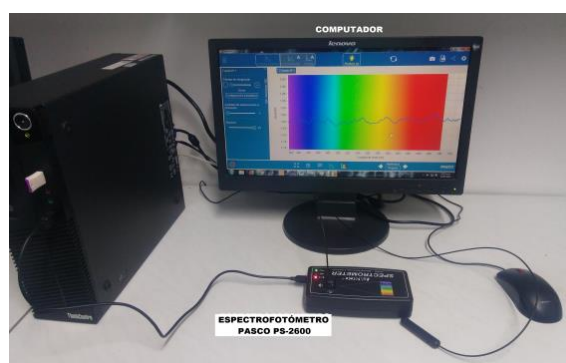


Figura 3. Montaje realizado en el Laboratorio de Óptica Moderna para hallar espectro de absorción de los cristales BSO

Para determinar el espectro de absorción de los cristales de BSO se empleó un espectrofotómetro PASCO PS-2600, su correspondiente software el cual nos permite observar las curvas de absorbancia de la muestra que es objeto de análisis y un computador (Figura 3).

Espectrofotómetro Inalámbrico PASCO PS-2600 Este dispositivo está específicamente diseñado para experimentos de espectroscopia introductoria. La conectividad Bluetooth y USB permite su uso con tabletas y computadoras. Con este aparato se puede medir la intensidad, la absorbancia, la transmitancia y la fluorescencia, lo que la convierte en una herramienta poderosa e intuitiva para experimentos referentes a espectroscopia. Para la medición de la absorbancia y transmitancia se usa una luz fuente de tungsteno impulsada por LED que pasa a través de la solución y una rejilla de difracción de alta calidad, que es detectada por un conjunto de cámara CCD para la recopilación y el análisis de los datos.



Figura 4. Espectrofotómetro inalámbrico PASCO PS-2600



Método: Tomamos los tres cristales de $Bi_{12}SiO_{20}$ (BSO) de $2mm$, $4mm$ y $6mm$ y ubicándolos en el compartimento de muestras del espectrofotómetro PASCO PS-2600, este incide sobre los cristales un haz de luz blanca proveniente de su fuente de Tungsteno, simultáneamente se observa en el software los valores de absorbancia en función de la longitud de onda. Se recopilaron valores de absorbancia para las longitudes de onda entre los $400nm$ y los $700nm$ cada $5nm$, para un total de 61 valores de absorbancia.

Mediante el espectrofotómetro PASCO PS-2600 se realizaron mediciones de absorbancia en el rango del visible para los tres cristales de BSO de espesores 2, 4 y 6 mm, luego mediante la ecuación (3.1) se calcularon las curvas del coeficiente de absorción en función de la longitud de onda para cada cristal. Como se observa en dicha ecuación nosotros consideramos las pérdidas por reflexión.

$$T = \frac{(1 - R)^2 e^{-\alpha d}}{1 - R^2 e^{-2\alpha d}} \quad (2.0)$$

donde R es el índice de reflexión; esta ecuación resulta del esquema de múltiples reflexiones [28][32], como se muestra en la figura 5.

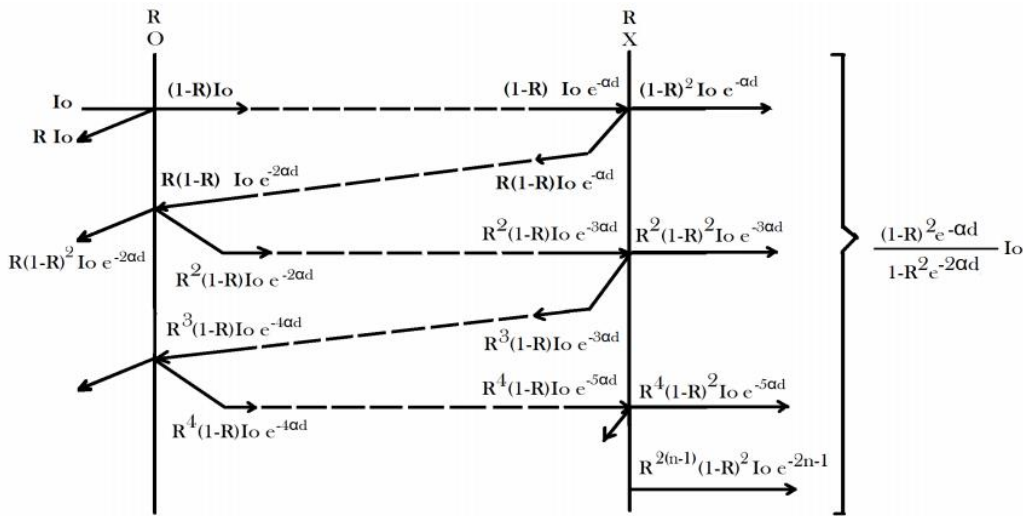


Figura 5. Esquema de las Múltiples Reflexiones Internas [28] [32]

Realizando el despeje de α , (Realizado con *WolframAlpha*) llegamos a una ecuación cuadrática y sus dos soluciones, tomaremos la solución positiva:

$$\alpha = \frac{\log\left(\frac{\sqrt{4R^2T^2 + (-R^2 + 2R - 1)^2} + R^2 - 2R + 1}{2T}\right)}{d} \quad (2.1)$$

Para graficar los valores de α en función de la longitud de onda, debemos contar con el índice de reflexión dado por la ecuación (1.1) y la transmitancia en función de la absorbancia dada por:

$$T = 10^{-A} \quad (2.2)$$



Experimentalmente obtuvimos 61 valores diferentes de absorbancia, entre los 400 y los 700 nm, debemos tener el mismo número de índices de reflexión para estos y de esta manera obtener los coeficientes de absorción; desde luego tomamos los índices de refracción de las longitudes de onda conocidos (Tabla 1.1 y Figura 2.2), en base de estos realizamos interpolación para todas las longitud de onda a las cuales corresponden los valores de absorbancia que obtuvimos para hallar sus índices de reflexión.

Experimentalmente obtuvimos 61 valores diferentes de absorbancia, entre los 400 y los 700 nm, debemos tener el mismo número de índices de reflexión para estos y de esta manera obtener los coeficientes de absorción; desde luego tomamos los índices de refracción de las longitudes de onda conocidos (Tabla 1 y Figura 2), en base de estos realizamos interpolación para todas las longitud de onda a las cuales corresponden los valores de absorbancia que obtuvimos para hallar sus índices de reflexión.

III. Resultado y discusión

La figura 6 relacionan los datos de absorbancia en función de la longitud de onda para cada uno de los cristales de BSO.

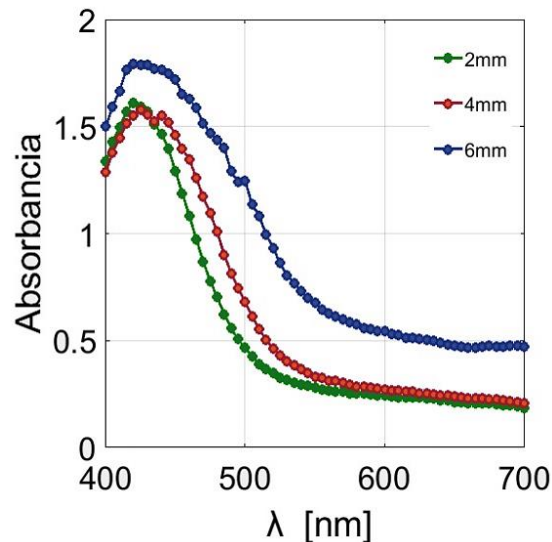


Figura 6: Curvas de Absorbancia de los cristales BSO.

La Figura 6 nos muestran que a mayor grosor de la muestra será mayor la absorbancia, el cristal de 6 mm refiere una mayor absorbancia, aunque no significativa con respecto a los otros dos cristales que tiene un comportamiento similar; y la mayor absorbancia se presenta en el rango de los 400 y 500 nm. A partir de estos datos de absorbancia hallamos la transmitancia correspondiente con la ecuación (2.2), de igual manera hallamos todos los valores del índice de reflexión con la expresión de Fresnel para la reflectividad en incidencia normal y sin considerar absorción

$$R = \frac{(n - 1)^2}{(n + 1)^2} \quad (2.3)$$

y los reemplazamos en la ecuación (2.1), obteniendo las siguientes curvas de absorción:

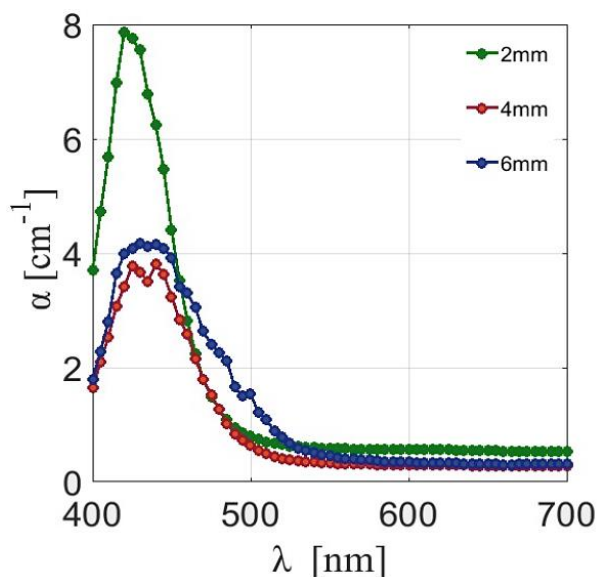


Figura 7: Curvas de Absorción para los Cristales de BSO.

Este resultado se acopla a la mayoría de valores referenciados en los antecedentes, como el que se menciona en la referencia [34] en donde está el valor máximo $3,8 \pm 0,4 \text{ cm}^{-1}$ en 488 nm ; a mayor longitud de onda este valor va disminuyendo; decae rápidamente antes de llegar a 500 nm .

De la figura 7 se infiere que el cristal de 2mm tiene características ópticas de absorción diferentes a los otros dos cristales de 4 y 6 mm; este comportamiento puede deberse al tipo y concentración de dopaje. Sin embargo es de tener en cuenta que los tres tienen comportamiento similar en absorción en cuanto a que la máxima absorción se presenta hacia frecuencias altas y mínima absorción o mayor profundidad de penetración hacia las longitudes de onda largas, que en general es el comportamiento de los cristales silenitas. De otra parte los valores encontrados están en el mismo orden de magnitud de los diferentes reportes que hemos revisado.

Este comportamiento espectral es de gran importancia debido a que permite registrar imágenes con longitudes de onda en el rango de $400 - 500 \text{ nm}$ y leerlas sin degradarlas en el rango de $600 - 700 \text{ nm}$. Según la referencia [28], podemos considerar que el denominador de la ecuación (2.0), se puede aproximar a 1 y así obtener una ecuación más sencilla. Tenemos el denominador dado por $1 - R^2 e^{-2\alpha d}$ por lo tanto requerimos de los coeficientes de absorción y los índices de reflexión en los límites de nuestro rango de longitudes de onda (400 y 700 nm). Esta aproximación se puede observar en la Tabla 2.



Tabla 2: Aproximación a 1 del denominador de la ecuación (2.0)

Longitud de Onda (λ)	400 nm	700 nm
Índice de Refracción (n)	2.86	2.51
Índice de Reflexión (R)	0.2321	0.1850
Cristal 2mm		
α	3.6935	0.5255
$1 - R^2 e^{-2\alpha d}$	0.9877	0.9723
Cristal 4mm		
α	1.6444	0.2739
$1 - R^2 e^{-2\alpha d}$	0.9855	0.9725
Cristal 6mm		
α	1.7872	0.3141
$1 - R^2 e^{-2\alpha d}$	0.9937	0.9765

De tal manera que la ecuación (2.0) nos quedará:

$$T = (1 - R)^2 e^{-\alpha d} \tag{2.4}$$

donde de igual manera quedan relacionados la transmitancia, índice de reflexión y el coeficiente de absorción y despejando α de dicha ecuación tendremos que:

$$\alpha = \frac{A + \text{Log}_{10}((1 - R)^2)}{d \text{Log}_{10}(e)} \tag{2.5}$$

Las curvas de absorción serán ahora:

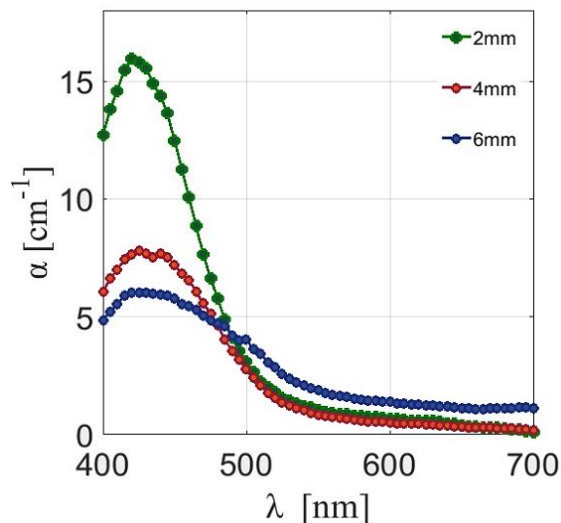


Figura 8: Curvas de Absorción para los Cristales de BSO con ecuación (2.5).



Aunque las curvas en la figura 8 tienen un comportamiento similar y se mantiene con respecto a la figura 7, los valores de α aumentan hasta en un 200 %; esto demuestra que lo que proponen en la Referencia [28] aunque es una aproximación que matemáticamente se puede hacer, afecta significativamente los resultados obtenidos, las pequeñas variaciones en el término del denominador tiene una inmensa repercusión en los resultados, por lo tanto, la aproximación no es recomendable para este caso.

IV Conclusiones

Este trabajo fue realizado a partir del estudio de los cristales fotorrefractivos BSO en donde se abordó la caracterización de estos materiales permitiendo obtener resultados para el coeficiente de absorción, actividad óptica y coeficiente electro-óptico y de esta manera cumplir con los objetivos propuestos. En primera instancia a partir del uso de un espectrofotómetro PASCO PS-2600 se hallaron las curvas de absorbancia de 3 diferentes muestras de cristales BSO y dentro del análisis de estos datos se determinaron las curvas de absorción en función de la longitud de onda (entre los 400 y los 700 nm) y del espesor de las muestras. Se partió de la ecuación de la transmitancia en función del coeficiente de absorción para obtener las curvas de absorción de nuestras muestras; porque incluye el índice de reflexión que representa las pérdidas ocasionadas por la reflexión, lo cual muchas de las referencias citadas no tienen en cuenta para sus cálculos. Destacamos la referencia [28], donde mencionan esta ecuación y realizan la aproximación a uno (1) del denominador basándose en los valores que toma el coeficiente de absorción, se demostró que esta aproximación no es conveniente hacerla en nuestro caso, debido a que afecta en gran medida las curvas de absorción, la escala de valores del coeficiente de absorción se duplica. Finalmente, los resultados obtenidos coinciden con la teoría y los antecedentes, muestran la mayor zona de absorción en el rango de los 400 – 500nm y la zona de mayor transmisión en el rango de los 600–700 nm.

Referencias

- [1] J. C. Gómez, “Niobio en sitio de litio y optimización del efecto fotorrefractivo en guías de LiNbO₃”, Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Madrid (España), 2009.
- [2] L. J. Herrera, J Rueda, “Estudio de la Mezcla de ondas en materiales fotorrefractivos”, Tesis de Maestría, Pamplona, 2008.
- [3] L. M. Castro, J Rueda, “Estudio de condiciones experimentales para la mezcla de ondas en cristales fotorrefractivos”, Tesis de Maestría, Pamplona, 2012.
- [4] J.E. Rueda, “Efecto Fotorrefractivo, Fenomenología, aplicaciones”, Tesis de pregrado, Universidad de Santander (Colombia), 1993.
- [5] M.C. Lasprilla, “Registros en Cristales Fotorrefractivos BSO. Aplicaciones al Procesamiento de Imágenes”, Tesis Doctoral, Universidad Nacional de la Plata, 1996.
- [6] R. Merlo, N Bolognini, “Cristales electro-ópticos: BSO, BTO Y BGO. Peculiaridades de la birrefringencia inducida”, Centro de investigaciones ópticas (CIOP) La Plata, Rosario, Argentina, 1993



- [7] J. Salcedo Pinzón, N. Bolognini, L.M. Zerbino, “Filtrado Espacial con cristales BSO”, Centro de investigaciones ópticos (CIOP) La Plata, La Plata (Argentina), 1990
- [8] I. R. Corrales “Efecto del ángulo de polarización en la eficiencia de la difracción en el cristal de BSO (caso perpendicular)”, Tesis de Pregrado, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Física y Matemáticas, 2009
- [9] H. Lorduy, A. Salazar, “Estudio experimental de la eficiencia de difracción para registro de speckle en un cristal BSO”, Grupo de óptica y espectroscopia (GOE), Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, 2006
- [10] P. Yeh; “Introduction to photorefractive nonlinear optics”, John Wiley & Sons, Inc., New York, (1993).
- [11] Yariv A, and Yeh.P., Optical waves in crystal, Propagation and control of laser radiation, USA: John Wiley and Sons Inc., New York (1984)
- [12] D. C. Ledesma, “Estudio de técnicas de Interferometría speckle en un cristal fotorrefractivo BGO (holografía convencional y doble apertura)”, Tesis de pregrado, Universidad de Santander, Bucaramanga, 2004
- [13] D. A. Capovilla, “Caracterización de cristales fotorrefractivos”, Tesis de maestría, Facultad de tecnologías, Universidad Estatal de Campiñas, Limeira, 2016.
- [14] G. F. Forte, “Estudio de generación de auto imágenes a partir de redes de volumen”, Tesis de Doctorado, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad de la Plata, mayo 2014.
- [15] D. Gulich, “Procesamiento Óptico en Tiempo Real Monografía: Óptica Fotorrefractiva”, Monografía, 2009
- [16] Rueda, P. J. E.; Lasprilla, M.C., “Interferometría por corrimiento de fase para caracterizar materiales electro-ópticos.”, Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas, vol. 4, núm. 1, 2006, pp. 10-14; Universidad de Pamplona.
- [17] Frejlich, J., “Photorefractive Materials: Fundamental Concepts, Holographic Recording and Materials Characterization”, Universidad Estatal de Campiñas, Instituto de Física, Laboratorio de Óptica, Editorial Wiley-Interscience.
- [18] J. E. Rueda, D. O. Pabón, P. E. Rueda; “Mediciones de actividad óptica por Técnica Interferometría - difracción: prueba con Cristales BSO.”, Grupo de Óptica Moderna, Universidad de Pamplona, 2014.
- [19] Rueda P. J. E., Mendoza L. J., “Solución Exacta de la Configuración Mezcla Contra Direccional de Dos Ondas en un Material Fotorrefractivo”, Facultad de Ciencias Básicas, Grupo Óptica Moderna, Universidad de Pamplona, 2007.
- [20] Montenegro P. R., “Caracterización óptica y eléctrica de materiales fotoconductores y fotorrefractivos”, Curso de maestría en física, Universidad Estatal de Campiñas, 29 de marzo de 2006.
- [21] L. A. Guerra H., “Holografía dinámica utilizando materiales fotorrefractivos de $Bi_{12}SiO_{20}$ y $LiNbO_3$ ”, Tesis de Maestría, Universidad de Pamplona, 2011.
- [22] D. Pereda Cubián, J.L. Aree Diego, R. Rentmeesters, “Caracterización de dispositivos ópticos mediante



la matriz de coherencia de Mueller”, Departamento TEISA, Universidad de Cantabria, España; University of Gent, Bélgica

[23] H. E. Saucedo Félix, “Manejo e Interpretación Polarimétrica de las matrices de Mueller”, Universidad Autónoma de Sinaloa, Escuela de ciencias Físico - Matemáticas, Culiacán Rosales, Sinaloa, Julio de 2008.

[24] R. E. Luna, S. H. Ruiz, G. A. Rubio, “Manejo e interpretación Polarimétrica de las matrices de Mueller”, Revista Mexicana de Física, junio 2009.

[25] “Polarized Light, Second Edition Revised and Expanded”; Denis Goldstein, Air Force Research Laboratory, Eglin Air Force Base, Florida, U.S.A.

[26] D. Arribas, M. Vergara, “Caracterización de pantallas de Cristal líquido para su utilización como moduladores de intensidad o fase”, Laboratorio de procesamiento de imágenes, Departamento de Física, Facultad de Ciencias exactas y naturales, Universidad de Buenos Aires, agosto, 2013.

[27] S. L. Hou, R. B. Lauer y R. E. Aldrich, “Transport processes of photoinduced carriers in $Bi_{12}SiO_{20}$ ”. J. Appl. Phys. 44, 2652 (1973); doi: 10.1063/1.1662629

[28] Jaques I. Pankove, “Optical Processes in semiconductors ”, DOVER SCIENCE BOOKS, Department of Electrical and Computer Engineering, Optoelectronic Computing Systems Center, University of Colorado. 1971

[29] R. E. Aldrich, S. L. Hou, y M. L. Harvill; “Electrical and Optical Properties of $Bi_{12}SiO_{20}$ ”, Journal of Applied Physics 42, 493 (1971); doi: 10.1063/1.1659638

[30] S. I. Grosz, “Aplicaciones del efecto fotorrefractivo del cristal BSO al procesamiento óptico de imágenes a tiempo real”, Tesis Doctoral, Departamento de Física, Facultad de ciencias naturales y exactas, Universidad de Buenos Aires, 1993

[31] G.F. Moore, P.V. Lenzo, A.A. Ballman, “Photoactivity and field induced changes in optical rotation in Bismuth Silicon Oxide ”, J. Appl. Phys. 40, 2361 (1969).

[32] M. Henry, These de Doctorat d’etat, “Proprietes opto-electroniques del’oxide de bismuth-silicium, photoconductivite, effect electro-optique, photorefringence”, Univ. Pierre et Marie Curie, Paris, (1984).

[33] A. Feldman, W.S. Brower Jr., D. Horowitz, “Optical activity and Faraday rotation in bismuth oxide compounds”, Appl. Phys. Lett. 16, 201-202 (1970).

[34] R.A. Mullen and RW. Hellwarth, “Optical measurement of the refractive parameters of BSO”, J. Appl. Phys. 58, 40-43 (1985)

[35] M. A. Guerrero Vanegas, “Implementación de un procesador Óptico-Virtual de encriptación de transformada conjunta para la generación de criptogramas camuflados.”, Tesis Pregrado, Departamento de Física, Universidad de Pamplona, Pamplona, 2018.

[36] A.G. Apostolidis, S. Mallik, D. Rouede, J.P. Herriau and J.P. Huignard, “Polarization properties of phase gratings recorded in a $Bi_{12}SiO_{20}$ crystal”, Opt. Comm. 56, 73-78 (1985).

[37] P. Pellat Finet, “Measurement of the electro-optics coefficient of BSO crystals”, Opt. Commun., 50, 275 (1984)



[38] J.P. Herriau, J. P. Huignard, P. Aubourg, “Some polarization properties of volume holograms in $Bi_{12}SiO_{20}$ crystals and applications”, Appl. Opt. 17, 1851-1852 (1978).

[39] E. Hecjt and A. Zajac, “Optics”, Addison Wesley Pub. Comp. Inc., (1974).

[40] J. E. Rueda, “Cristales fotorrefractivos: optimización teórica de la birrefringencia inducida en función del tallado. Pseudocoloreado y determinación del coeficiente electro-óptico r_{41} del gemanato de bismuto”. Tesis de Maestría, Facultad de ciencias, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 1996.

[41] Estrada-Rodríguez, C. A., Parra-Vargas, C. A., & Pimentel-Junior, J. L. (2017). Propiedades estructurales, eléctricas y magnéticas en el sistema $Na_{0.25}Ba_{0.75}CoO_3$. BISTUA Revista de la Facultad de Ciencias Básicas, 15 (1).

[42] Cubillos-Lobo, J. A., Albarracín-Galindo, A., Ortíz-Otálora, C., & Muñoz-Prieto, E. (2016). Síntesis de nanopartículas de óxido de titanio en fase rutilo para el desarrollo de un material compuesto de espuma de poliuretano. BISTUA Revista de la Facultad de Ciencias Básicas, 14 (2), 169-181