

Estudio de propiedades ópticas no lineales de materiales orgánicos

Autor M. Gaytán-Chávez¹, L. M. Díaz-Cortés¹, G. Bañales-Galván¹, J. A. Andrade-Lucio¹, E. Alvarado-Méndez¹

¹Universidad de Guanajuato, DICIS

m.gaytanchavez@ugto.mx¹, lm.diazcortes@ugto.mx², g.banalesgalvan@ugto.mx³, andrade@ugto.mx⁴, ealvarad@ugto.mx⁵.

Resumen

Se presenta un estudio óptico experimental y teórico de materiales orgánicos no lineales. Mediante la técnica experimental de Z-scan se analizaron materiales llamados rocaglamidas, usando un láser de argón a 514 nm de longitud de onda de potencia variable. Nuestros resultados muestran que el origen de la no linealidad es de origen térmico. Ajustamos teóricamente los datos experimentales mediante el modelo de formación de lente térmica, encontrando muy buena concordancia entre teoría y experimento.

Palabras clave: óptica no lineal; z-scan: materiales orgánicos.

Introducción

Óptica no lineal es el resultado de la interacción radiación-materia. Altas concentraciones de energía laser enfocadas mediante una lente en un material, modifican su índice de refracción, que depende no solo de la frecuencia, sino también de la intensidad. Esta no linealidad es conocida como de tercer orden. Debido a estas condiciones, la óptica no lineal brinda una enorme riqueza física por explorar e investigar. Es un gran reto descubrir nuevos materiales con propiedades ópticas no lineales. Los materiales pueden ser tanto orgánicos como inorgánicos, y se buscan aquellos que puedan tener no linealidades altas. Plantear nuevos modelos teóricos que puedan predecir o explicar el comportamiento de un material al modificar sus propiedades debido a la luz, es otro reto muy interesante. Algunas aplicaciones de no linealidades de tercer orden son contraste de fase no lineal¹, consiste en visualizar flujo de calor en tiempo real, limitadores ópticos² dispositivos capaces de desviar luz laser para evitar daños a los ojos o a sistemas de detección, entre otros.

Entre los fenómenos a estudiar se encuentran medir el índice de refracción no lineal, que no solo depende de la frecuencia, sino también de la intensidad. El índice de refracción no lineal se mide usando la técnica experimental Z-scan³, que ha sido ampliamente usada debido a su simplicidad y sencillez. En la figura 1 se

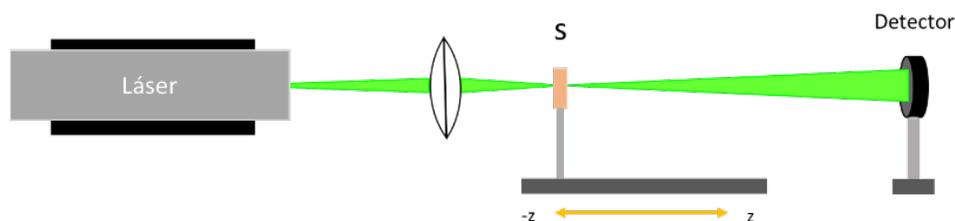


Figura 1. Arreglo experimental de la técnica Z-SCAN

ilustra el arreglo experimental implementado. Consiste en un láser de 514 nm de longitud de onda, una lente de 7.5 cm, un riel donde se coloca la muestra "S", y el riel se encarga de irlo desplazando, a lo largo de 5 m de distancia; la luz es captada mediante un fotodetector a una distancia de 1 m. del riel, para capturar la luz es la transmitida, se guardan los datos en un archivo para su posterior análisis. Los experimentos fueron realizados en el laboratorio de Fotónica No lineal de DICIS.

Modelo Teórico

El modelo teórico usado en nuestros ajustes experimentales es conocido como de formación de lente térmica⁴. Consiste en suponer la formación de una lente foto-inducida en el medio no lineal. Una característica de una lente es su distancia focal dada por la expresión,

$$f(z) = \frac{k\pi\omega^2(z)}{\frac{dn}{dT}\left[P\alpha d + \frac{4d\beta P^2}{\pi\omega^2(z)}\right]} \quad (5)$$

en donde k es la conductividad térmica del material, dn/dT es el cambio del índice de refracción dependiente de la temperatura, P es la potencia del haz láser, α es la absorción lineal, d es el grosor de la muestra, ω es el radio del haz en z .

El índice de refracción depende de la distancia focal de la lente auto-inducida,

$$n_2 = \frac{\lambda\omega_0^2(z_0/2f(z))}{2PL_{eff}} \quad (6)$$

en donde z_0 es la distancia de Raleigh, L_{eff} es llamada la longitud efectiva y está dada por,

$$L_{eff} = \frac{1-e^{-\alpha d}}{\alpha} \quad (7)$$

d es el grosor de la celda que contiene el material no lineal. En la siguiente sección se presentarán los resultados y su análisis.

Análisis y Resultados

La técnica Z-scan es un método utilizado para medir la refracción no lineal, la absorción no lineal y la transmitancia en una muestra dada que puede ser sólida o líquida. La refracción no lineal es una propiedad no lineal de tercer orden también conocida como n_2 y proporciona la razón a la cual el índice de refracción aumenta con un incremento en la intensidad óptica⁵. Dicho índice de refracción puede deberse a efectos térmicos o efectos electroópticos tales como el efecto Kerr y el efecto Pockels.

Efecto Kerr.

El índice de refracción de un material puede cambiar debido a un campo eléctrico incidente de una onda electromagnética, cuando este cambio es proporcional al cuadrado del campo eléctrico se le llama efecto Kerr.⁶

Efecto Pockels.

Al igual que el efecto Kerr, el efecto Pockels es el cambio del índice de refracción debido a la luz incidente sin embargo este solo se da en materiales que no son centro-simétricos y es linealmente proporcional al campo aplicado.⁶

Además, en consecuencia, a estos fenómenos se produce otro efecto dentro del material llamado auto-enfocamiento o auto-desenfocamiento⁶, es decir, el medio se comporta como una lente así para un haz Gaussiano, dependiendo del signo del índice de refracción no lineal en el material este puede actuar como una lente positiva (enfocando la luz) o negativa (desenfocando la luz)⁶(fig. 2).

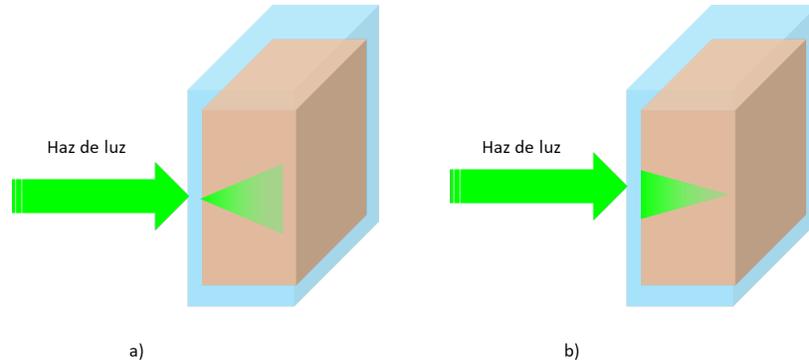


Figura 2. Representación de muestras siendo impactadas por un haz de luz; a) auto-desenfocamiento de haz, b) Auto-enfocamiento del haz de luz.

Otra razón por la que se dan efectos no lineales es el efecto térmico⁶. Este efecto suele provocar cambios en el índice no lineal debido a cambios en la temperatura de la muestra mientras que los cambios de temperatura se dan por la absorción de energía del material debido al haz incidente que posteriormente se transforma en calor⁶. Este efecto también suele ser el causante del efecto de enfocamiento y auto-desenfocamiento y es también debido a este efecto térmico el rompimiento de simetría en las curvas de Z-scan con el aumento de la potencia.

Otro de los efectos calculados por la técnica Z-scan es la absorción no lineal. Para un haz Gaussiano se puede definir como el cambio en la energía transmitida. La absorción es el fenómeno que se produce cuando una onda electromagnética pasa a través de un medio y parte de la energía de esta onda es transformada en un tipo de energía diferente, usualmente calor.

La transmitancia por otro lado es la razón de la luz transmitida respecto a la luz incidente. La técnica z-scan monitorea la transmitancia de la muestra en función de su posición z ⁷. Las gráficas obtenidas mediante este monitoreo, donde el cero en el eje z representa el foco de la lente utilizada entre la muestra y el láser, pueden presentarse de dos formas distintas: un pico prefocal seguido de un valle posfocal que implica un índice de refracción no lineal negativo ($n_2 < 0$) o un valle prefocal seguido de un pico posfocal lo que indica que el índice de refracción no lineal es positivo ($n_2 > 0$) (fig.3).

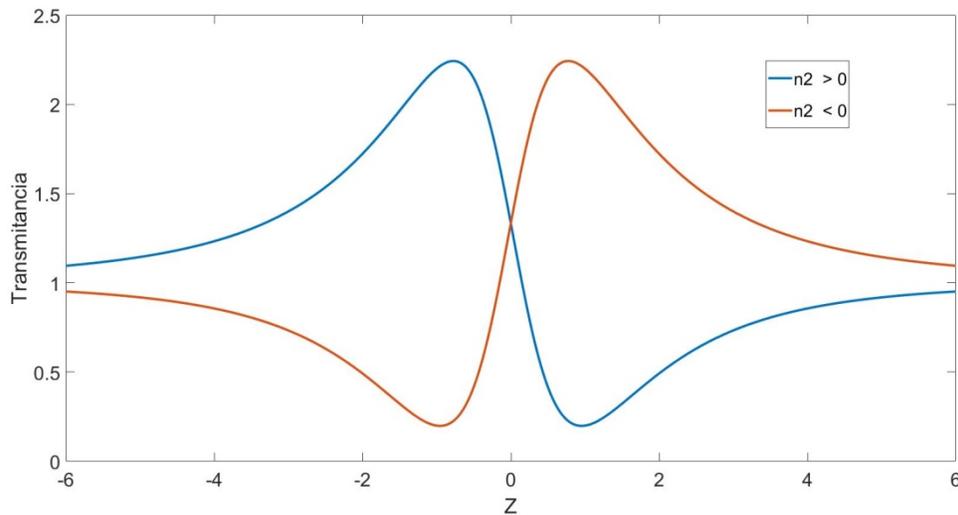


Figura 3. Curvas posibles de Z-scan para índices de refracción no lineal positivo y negativo.

La técnica z-scan no considera los efectos físicos involucrados, para ello se recurren a modelos teóricos tales como el de Bahae o el de Lente Térmica que nos permiten ajustar la curva de z-scan. En la siguiente figura e muestran resultados de diferentes rocamlamidas.

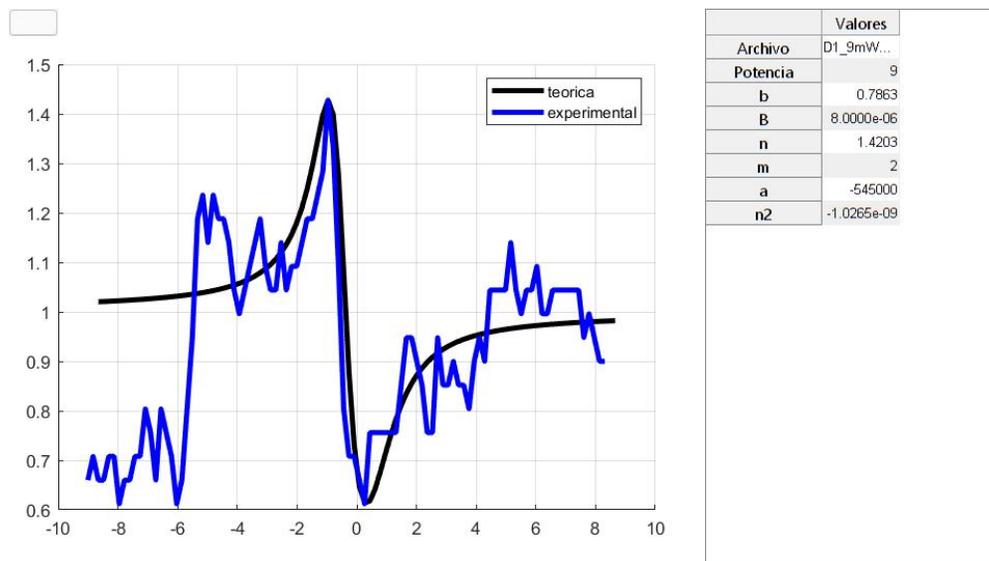


Figura 4. Curvas de Z-scan de la muestra de nomenclatura LI93 a 9 mW de potencia.

La figura 4 muestra datos experimentales (azul) de la muestra cuya nomenclatura de reconocimiento es LI93 a 9 mW de potencia. También se muestra en negro el ajuste teórico donde se busca que coincida el máximo y el mínimo, para poder calcular el índice de refracción no lineal, del lado derecho se muestra los valores para lograr el ajuste. El índice de refracción no lineal es de $n_2 = -1.0265 \times 10^{-9} W/cm^2$. El signo negativo se debe a que la pendiente es negativa, y el medio presenta un índice de refracción no lineal negativo.

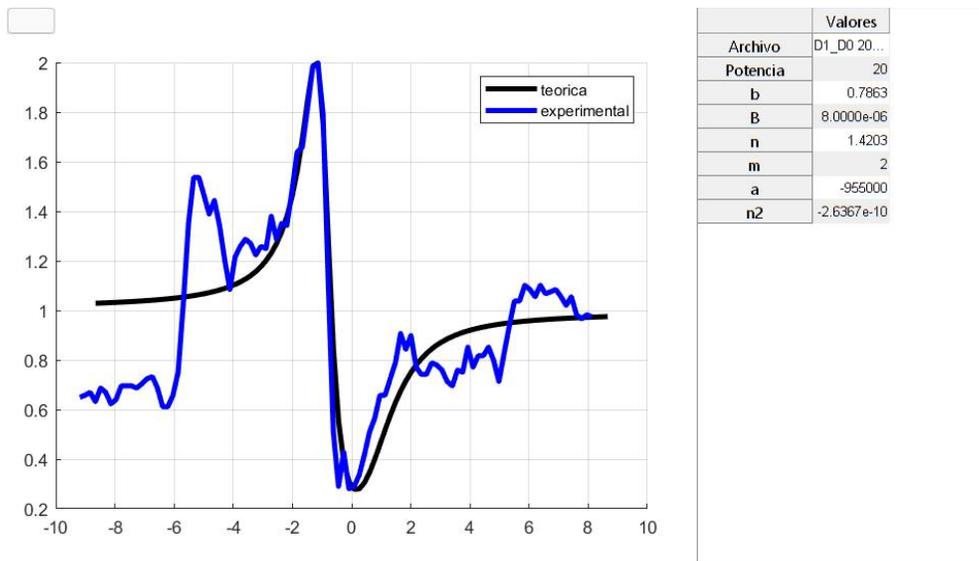


Figura 5. Curvas de Z-scan de la muestra de nomenclatura LI93 a 20mW de potencia.

La figura 5 representa la misma muestra pero a diferente potencia (20 mW) observamos que mejora mucho el ajuste, aunque hay ciertas variaciones al inicio y al final de la gráfica. Esto se debe a que al aumentar la potencia, se producen fenómenos físicos fascinantes como el llamado auto-modulación espacial de fase, y produce anillos de auto-difracción que modifican las curvas de z-scan. Este modelo teórico de ajuste consideramos que es más adecuado a la fenomenología producida. El índice de refracción no lineal es de $n_2 = -2.6367 \times 10^{-10} \text{ W/cm}^2$.

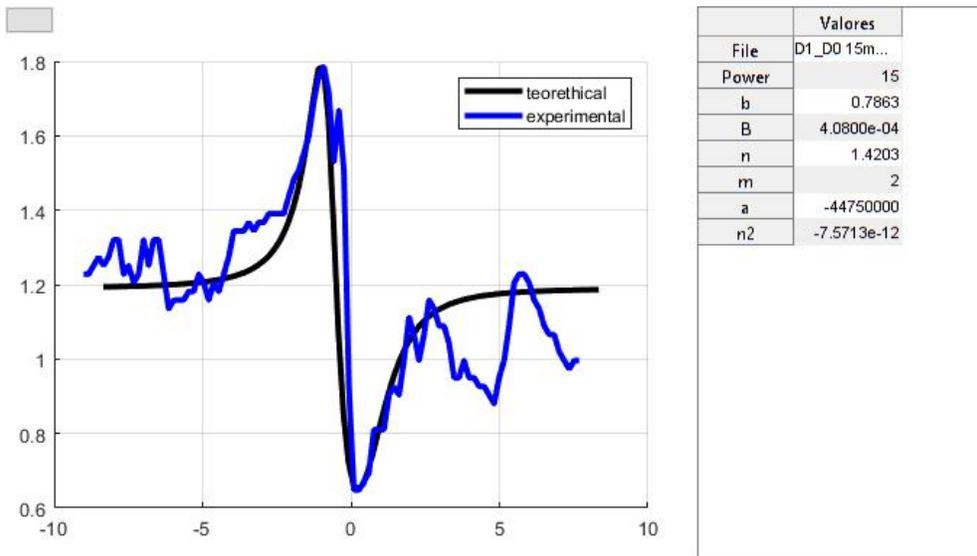


Figura 6. Curvas de Z-scan de la muestra de nomenclatura LI97 a 15mW de potencia.

La figura 6 representa la muestra LI97 a 15 mW de potencia, el valor del índice de refracción no lineal es de $n_2 = -7.571 \times 10^{-12} \text{ W/cm}^2$. En comparación con las figuras 5 y 6 presenta esta muestra un menor índice de refracción no lineal.

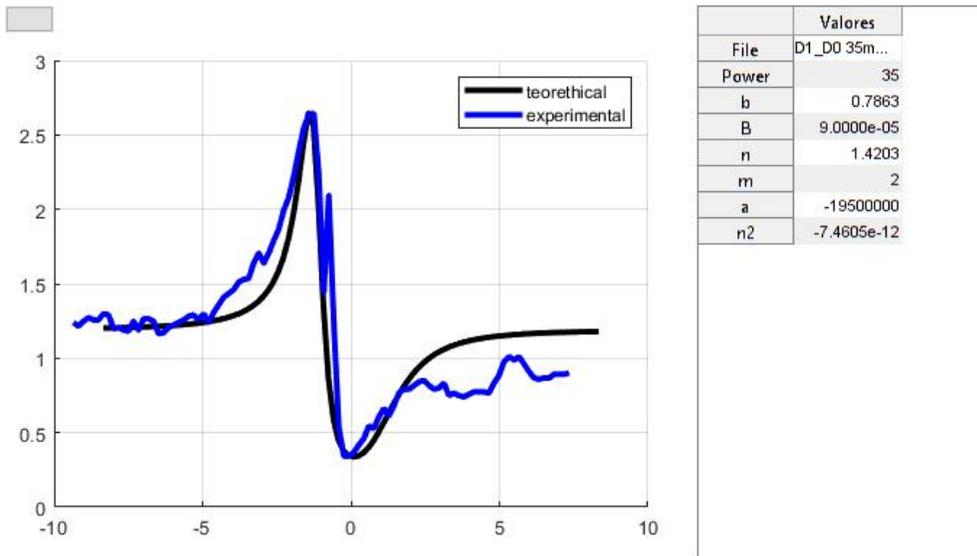


Figura 7. Curvas de Z-scan de la muestra de nomenclatura LI97 a 35mW de potencia.

La figura 7 representa la misma muestra LI97 a 35 mW de potencia, el valor del índice de refracción no lineal es de $n_2 = -7.571 \times 10^{-12} \text{ W/cm}^2$. En esta etapa se puede ya analizar qué muestra presenta una no linealidad alta, la cual corresponde a la muestra LI93. En la siguiente sección se darán algunas aplicaciones del estudio de estas muestras.

Aplicaciones

La física y en particular la óptica, es una de las disciplinas que actualmente nos ha dado un gran impulso en el desarrollo tecnológico y en la investigación, gracias a nuestro constante estudio de la luz hemos llegado a entender de mejor forma el universo.

Como ya mencionamos la óptica no lineal estudia el resultado de la interacción de luz-materia, John Wiley en su libro *Principio de óptica no lineal* nos menciona: "La física sería aburrida y la vida muy poco satisfactoria si todos los fenómenos físicos que nos rodean fueran lineales. Afortunadamente, vivimos en un mundo no lineal. Mientras que la linealidad embellece la física, la no linealidad aporta emoción a la física⁸. Realmente los efectos no lineales siempre presentan retos a nuestra forma de entender el comportamiento del universo, encontrar sentido en dichos comportamientos poco comunes que son obtenidos bajo ciertas condiciones específicas es un reto que áreas como la óptica no lineal pretende tomar.

En la actualidad, a partir de la invención del láser en 1960⁹ y la manipulación de radiación de luz coherente de alta intensidad se han desarrollado muchas tecnologías, tanto en comunicaciones, sistemas de detección de fallas, espectroscopia, etc. Todo este desarrollo vino acompañado por el descubrimiento de distintos fenómenos (auto-modulación de fase, difracción, auto-difracción, absorción, etc.) de los cuales se ha aprendido mucho durante las últimas décadas y han contribuido significativamente a nuestro desarrollo.

Garmire Thayer en su artículo, *Nonlinear optics in daily life* nos hace una pequeña observación considerando que gran parte del desarrollo generado a través del uso de los láseres se debe precisamente a fenómenos ópticos no lineales, pero a pesar de esto, son escasamente atribuidos estos desarrollos a la esta parte de la óptica como tal¹⁰. Thayer menciona que de una u otra forma, los descubrimientos en la

óptica no lineal han conseguido nueve premios nobel en física y química¹⁰, lo cual nos podría dar una idea del impacto que la materia podría tener en la vida diaria, ya que como lo hemos mencionado, vivimos en un universo donde los fenómenos no lineales pueden darnos mucha información.

Las aplicaciones donde interactúa la luz con la materia cambiando momentánea o permanentemente se denominan: mecanizado (donde el material cambia permanentemente), espectroscopia (donde los átomos y moléculas se modifican temporalmente) y herramientas de análisis (donde se modifican especies selectivas).¹⁰

Algunas aplicaciones en el campo de la medicina son, concentraciones de glucosa en la sangre a través del análisis las propiedades ópticas no lineales de esta¹¹. El nivel de glucosa se calcula midiendo el índice de refracción no lineal (n_2) de la muestra y los resultados se comparan con la medición realizada por el método colorimétrico convencional¹¹. Otra aplicación también la tenemos en el análisis de DNA¹² y sus propiedades, estas dos aplicaciones particularmente son obtenidas mediante el análisis de las muestras a través de la técnica de Z-scan.

Otra aplicación interesante es la formación de *rejillas de difracción*, estas son herramientas útiles en el análisis de la luz, son elementos ópticos de estructura periódica que permiten difractar en haces la luz que incide en ellos en diferentes direcciones¹³.

Estas rejillas de difracción son particularmente útiles en el campo de la astronomía, se utilizan ampliamente en los satélites espaciales para los instrumentos espectrógrafos o en los telescopios terrestres, con el objetivo de detectar la radiación electromagnética de los cuerpos celestes, filtrar por longitudes de onda y analizar los comportamientos, edad, intensidad, desplazamiento y distancia¹⁴. En la figura 1 se muestra un esquema de la óptica no lineal, su aparición a partir del descubrimiento del láser, algunos fenómenos ópticos no lineales descubiertos, la técnica experimental de Z-scan para medir el índice de refracción no lineal, obtención de n_2 a partir de modelo matemáticos y finalmente algunas aplicaciones.

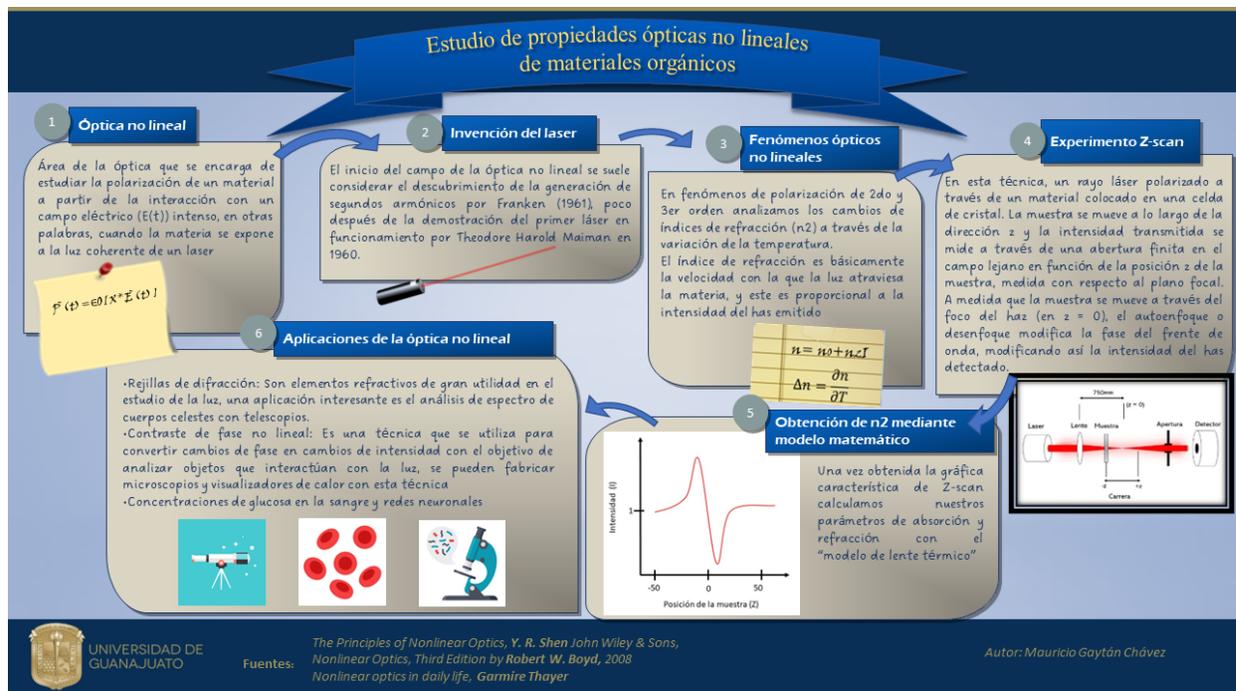


Figura X. Esquema de la óptica no lineal y el desarrollo de Z-scan.

Conclusiones

Hemos mostrado un estudio óptico no lineal de materiales orgánicos, en particular, rocaglamidas. El índice de refracción no lineal (n_2) fue determinado mediante la técnica experimental Z-scan, usando un láser continuo de Ar de potencia variable y una longitud de onda de 514 nm. Debido al fuerte efecto térmico producido por el láser, usamos el modelo teórico de formación de lente térmica, al ser el más adecuado y que mejor se ajusta a las condiciones experimentales. El rango obtenido del índice de refracción no lineal n_2 encontrado es de $10^{-9} W/cm^2$ a $10^{-12} W/cm^2$ la muestra LI93 es la que presenta una no linealidad alta.

Referencias

1. M. D. IturbeCastillo, et.al. "Real-time self-induced nonlinear optical Zernike-type filter in a bacteriorhodopsin film". Opt. Eng. 40, 2367-2368 (2003).
2. Richard C. Hollins, Materials for optical limiters, Current Opinion in Solid State and Materials Science, Volume 4, Issue 2, 1999, Pages 189-196,
3. M. Sheik-bahae, A.A. Said, E.W. Van Stryland, High-sensitivity, single-beam n_2 measurements, Opt. Lett. 14 (1989) 955
4. Severiano-Carrillo, E. Alvarado-Méndez, M. Trejo-Durán, M.M. Méndez-Otero, "Improved Z-scan adjustment to thermal nonlinearities by including nonlinear absorption", Optics Communications, Volume 397, 2017, Pages 140-146,)
5. M. Cano-Lara, I. Severiano-Carrillo, M. Trejo-Durán, E. Alvarado-Méndez, Evolution of diffraction and self-diffraction phenomena in thin films of Gelite Bloom/Hibiscus Sabdariffa, J. Mod. Opt. 64 (2017) 1793–1799
6. De La Cruz Quiroga, J. (s.f.). Estudio experimental de curvas de Z-scan de materiales orgánicos. Puebla, Pue.: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
7. Arredondo Santos, A. (2014). Caracterización de las propiedades ópticas no lineales de vidrios de telurio con nanocristales embebidos por medio de la técnica Z-scan. Centro de Investigaciones en Óptica.
8. Y. R. Shen, The Principles of Nonlinear Optics, John Wiley & Sons, New York, 1984
9. Nonlinear Optics, Third Edition by Robert W. Boyd, 2008
10. Nonlinear optics in daily life, Garmire Thayer OPTICS EXPRESS Volume: 21 Issue: 25 Pages: 30532 30544 Published: DEC 16 2013, School of Engineering, Dartmouth College, 14 Engineering Drive, Hanover, NH, 03755, USA
11. Z-Scan Technique as a Tool for the Measurement of Blood Glucose, A. N. Dhinaa, Ahmad. Y. Nooraldeen, K. Murali, and P. K. Palanisamy, Department of Physics, Anna University, Chennai-600 025, India, May 6, 2008
12. Z-scan and i-scan methods for characterization of dnd optical nonlinearities, I. DANCUS1, Romanian Reports in Physics, Vol. 65, No. 3, P. 966–978, 2013
13. Diffraction gratings, Daniel Maestre, Institut Fresnel, Université d'Aix-Marseille, Marseille, France, 2012 http://var.scholarpedia.org/article/Diffraction_gratings
14. Overview of diffraction gratings technologies for spaceflight satellites and ground-based telescopes, A. Cotel, A. Liard, F. Desserouer, P. Pichon, 17 November 2017 <https://www.spiedigitallibrary.org/proceedings/Download?urlId=10.1117%2F12.2304240>