

Respuesta Colosal de óptica no lineal en cristal líquido 5CB foto inducida por películas finas de PVA dopadas con complejos de rutenio

Oscar Baldovino Pantaleón

UAM Reynosa-Rodhe, Universidad Autónoma de Tamaulipas, Reynosa, Tam., México, CP 88779,
teléfono (899) 9 21 33 00
obaldovino@uat.edu.mx

Jonathan Rodríguez Pérez

UAM Reynosa-Rodhe, Universidad Autónoma de Tamaulipas, Reynosa, Tam., México, CP 88779,
teléfono (899) 9 21 33 00

Rubén Ramos García

Departamento de óptica, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Tonanzintla, Pue., México,
CP 72840, teléfono (222) 247 29 40
garcia@inaoep.mx

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados del estudio en las propiedades ópticas no lineales del cristal líquido nemático (5CB) fotoinducidas por películas finas de polímeros dopados. Las películas finas se preparan a partir de la mezcla de alcohol polivinílico (PVA) con complejos metálicos de rutenio, las cuales, también, funcionan como capas de alineamiento molecular. La determinación de la respuesta óptica no lineal se realizó con técnica de barrido en Z (Z-scan) y láser Argón ($\lambda=532$ nm), las mediciones obtenidas indican cambios de índice de refracción no lineal colosales ($16 \text{ cm}^2/\text{W}$). Estos dispositivos también fueron utilizados como filtro de fase sintonizables en contraste de fase.

Palabras Claves: barrido en Z, cristal líquido, óptica no lineal, complejos de rutenio

1. Introducción

Los cristales líquidos son materiales anisótropos que tienen propiedades que dependen de la dirección en que se miden. La viscosidad de estos compuestos es menor en la dirección paralela a las moléculas que en la dirección perpendicular. Estas moléculas grandes y alargadas necesitan menos energía para deslizarse unas respecto a las otras a lo largo de sus ejes que para moverse lateralmente. Los compuestos isótropos son materiales cuyas propiedades no dependen de la dirección en que se miden. Por ejemplo, los líquidos normales son isótropos: sus viscosidades son las mismas en cualquier dirección. Los cristales líquidos se convierten en líquidos isótropos cuando se calientan por encima de una temperatura característica, entonces las moléculas tienen la suficiente energía para superar las atracciones que restringen su movimiento [1].

Los complejos de rutenio con ligando de bipyridina $[\text{Ru}(\text{bpy})_3]$ han sido muy estudiados debido a sus propiedades espectroscópicas, fotofísicas, fotoquímicas y electroquímicas. Específicamente estos complejos han sido investigados como fotosensibilizadores o generadores de fotocarga. El tiempo de vida del estado excitado del $(\text{bpy})_3^{2+}$ es muy largo que puede conducir a la transferencia de electrones, y actuar como un aceptador de electrones [2,3].

En este trabajo se presentan las mediciones de cambio de índice de refracción no lineal y absorción no lineal obtenidos en dispositivos construidos con placas de vidrio, donde se depositan películas delgadas de polímeros dopados con compuestos de rutenio, y contienen cristal líquido nemático 5CB. Estos dispositivos fueron utilizados como filtro de fase sintonizables en contraste de fase.

2. Desarrollo

2.1. Síntesis de complejos metálicos de Rutenio(II) $[\text{Ru}(\text{bpy})_3]\text{Cl}_2$ y $[\text{Ru}(\text{bpy})_3](\text{BF}_4)_2$

La síntesis del dicloruro de *tris*-bipyridina rutenio(II) $[\text{Ru}(\text{bpy})_3]\text{Cl}_2$ ha sido ampliamente documentada y desde entonces se han reportado varios métodos [4], aquí se describe

brevemente la preparación del compuesto con el método de mayor rendimiento y pureza [5]. El complejo metálico $[\text{Ru}(\text{Bpy})_3]\text{Cl}_2$ se obtiene mediante calentamiento a reflujo de una disolución acuosa conteniendo el precursor metálico $\text{RuCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (1.9 mmol) y tres equivalentes de 2,2-bipiridina (5.7 mmol); a esta mezcla oscura se le añade NaH_2PO_2 recién preparado. El calentamiento se mantiene durante 3 horas, con agitación constante, hasta que se torna rojiza indicando la formación del compuesto. La purificación se realiza mediante sucesivas recristalizaciones en medio acuoso. El compuesto $[\text{Ru}(\text{Bpy})_3]\text{Cl}_2$ se obtiene en rendimiento de 98%, como cristales rojos (ver Fig. 1), el cual fue caracterizado completamente con técnicas espectroscópicas: ^1H -RMN, ^{13}C -RMN, UV-Vis, FT-IR, EM(FAB+). El derivado *bis*-tetrafluoroborato de *tris*-bipiridina de rutenio(II) $[\text{Ru}(\text{bpy})_3](\text{BF}_4)_2$, se obtiene disolviendo en agua destilada el compuesto $[\text{Ru}(\text{bpy})_3]\text{Cl}_2$ y se agrega una cantidad equimolar de NH_4BF_4 ; se forma inmediatamente un precipitado de color naranja que se lava con etanol y se purifica con recristalización. Caracterizado por espectroscopia de ^1H -RMN, ^{13}C -RMN, UV-Vis, FT-IR, EM(FAB+).



Fig. 1. Cristales puros de $[\text{Ru}(\text{Bpy})_3]\text{Cl}_2$.

El siguiente paso fue mezclar el complejo de rutenio con alcohol polivinílico (PVA), se disuelve 0.060 g de PVA en 3.0 ml de agua destilada y se agita durante 3 horas. A continuación se disuelve 0.120 g de $[\text{Ru}(\text{Bpy})_3]\text{Cl}_2$ en la solución de PVA. Se realiza el mismo procedimiento para la mezcla $[\text{Ru}(\text{Bpy})_3](\text{BF}_4)_2/\text{PVA}$. La formación de películas finas del complejo de rutenio/PVA, se lleva a cabo colocando un portaobjeto de vidrio en el centro del spin coater, posteriormente se deposita, con una pipeta volumétrica, 0.2 ml de la solución de $[\text{Ru}(\text{bpy})_3]\text{Cl}_2/\text{PVA}$ (ver Fig. 2). Enseguida se enciende el spin-coater

y se permite que gire durante 60 segundos. El portaobjeto con la película fina se seca durante 20 minutos. En seguida se hizo pasar unidireccionalmente una tela de lino (rayado) para el alineamiento molecular.

2.2. Construcción de dispositivos PVA/Ru/CL

El dispositivo fue construido con dos cubreobjetos de vidrio recubiertas con la mezcla del complejo de rutenio con PVA, posteriormente fueron ensambladas en forma de “sándwich” de tal manera que el rayado coincida en la misma dirección y se acomodaron entre estos espaciadores de aproximadamente 25 μ m. A este dispositivo se introdujo, vía capilaridad, cristal líquido 5CB que se calentó previamente a su temperatura de transición isotrópica-nemática para facilitar el llenado, y finalmente se cerró herméticamente el dispositivo con pegamento epoxi (Esquema 1) [6].

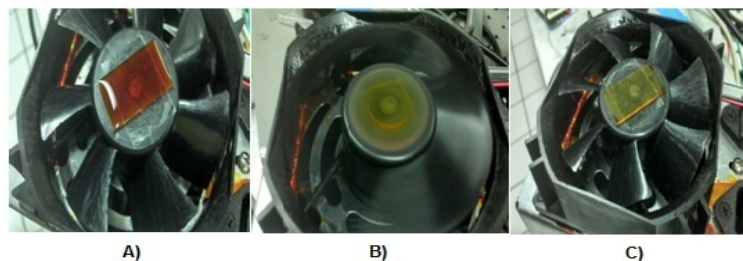
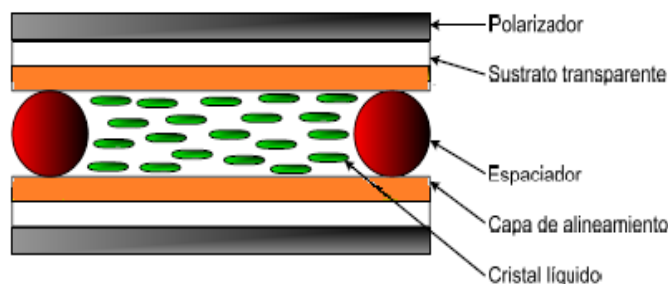
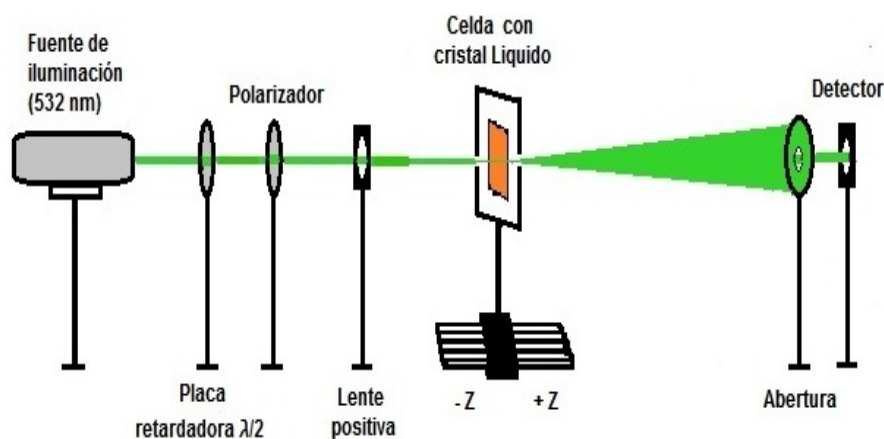


Fig. 2. A) Depósito de la mezcla, B) distribución radial uniforme y C) película delgada uniforme.



Esquema 1. Estructura de la celda con cristal líquido.

El experimento de barrido en Z (Z-scan) se configuró con el siguiente arreglo experimental mostrado en el Esquema 2; como fuente de iluminación se utilizó un láser de Argón ($\lambda=532$ nm) linealmente polarizado, retardador $\lambda/2$ y polarizador para controlar la potencia y plano de polarización. Se coloca una lente positiva de 3.5 cm de distancia focal para obtener una cintura mínima de 15 μm . El dispositivo con cristal líquidos nemático (5CB), se colocó y se mantuvo fijo en el plano focal. La base de translación del barrido en Z tiene una distancia de 40 mm. Para obtener la información se coloca un fotodetector a campo lejano con abertura cerrada o abierta según sea el caso [7].

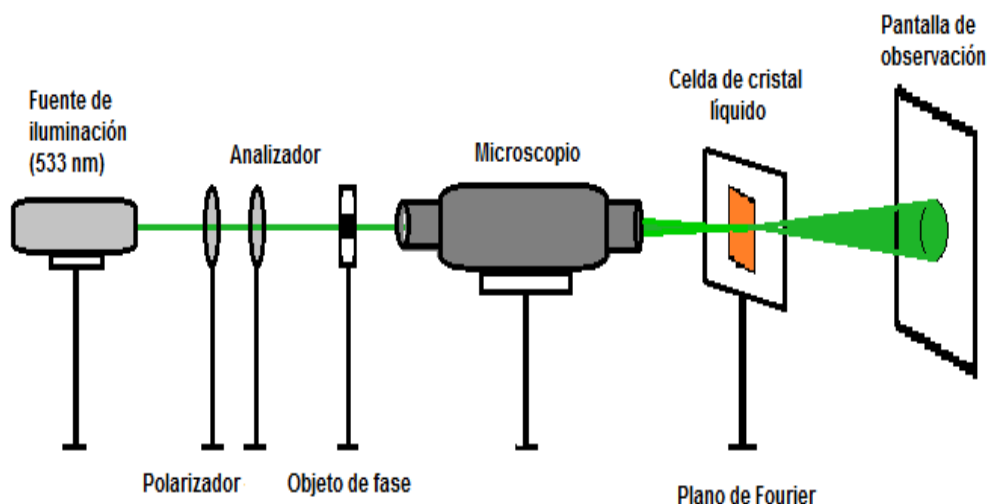


Esquema 2. Sistema óptico para la técnica Z-Scan.

Para el arreglo experimental para microscopio de contraste de fase, Esquema 3, se usó el láser de argón como fuente de iluminación, además, microscopio con objetivos de 5x y ocular 10x, dando una magnificación total de 150x. El dispositivo fue colocado en el plano de Fourier [8].

3. Resultados

Con el propósito de caracterizar las propiedades optoeléctricas de los dispositivos fabricados con PVA/Ru/CL se realizaron las siguientes mediciones.

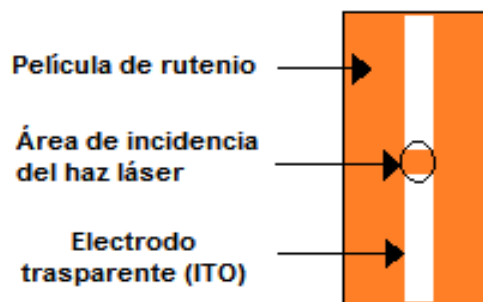


Esquema 3. Microscopio de contraste de fase.

3.1. Medición de fotoconductividad en películas finas.

Para llevar a cabo mediciones de fotoconductividad fue necesario realizar un proceso litográfico sobre la superficie del sustrato de vidrio con ITO; aplicando una solución ácida se remueve el ITO dejando solamente una pequeña tira de este mismo a los laterales del sustrato formando un espacio en el centro de aproximadamente 0.03141 cm^2 (Esquema 4), sobre este sustrato se deposita la película de rutenio/PVA de aproximadamente $5 \mu\text{m}$ de espesor mediante la técnica spin coating.

Para las pruebas de fotoconductividad en películas finas, es decir, el cambio de la conductividad eléctrica debida a la absorción de fotones de la radiación electromagnética incidente sobre dicha película [2], fue necesario montar un arreglo experimental. Se usó un láser de Argón ($\lambda=532 \text{ nm}$) como fuente de iluminación, que se hace incidir en la muestra, justo en el área entre los electrodos de ITO. En seguida se conectan los electrodos para aplicar voltaje desde 5 V hasta un voltaje máximo de 70 V . Se utilizó un electrómetro para determinar la variación en conductividad con respecto al voltaje.



Esquema 4. Configuración de la película de rutenio para el proceso de fotoconductividad.

Bajo iluminación con intensidad de 0.54 W/cm^2 , las mediciones en películas PVA/Ru a diferentes porcentajes de Ru (0.5, 1.0, 1.5, 2.0 y 2.5%) muestran variaciones en la curva corriente-voltaje y un incremento importante en conductividad. La conductividad crece casi exponencialmente con el incremento del voltaje como se observa en la Fig. 3. Las variaciones de corriente-voltaje están en el orden de 20.0 nanoamperes (nA).

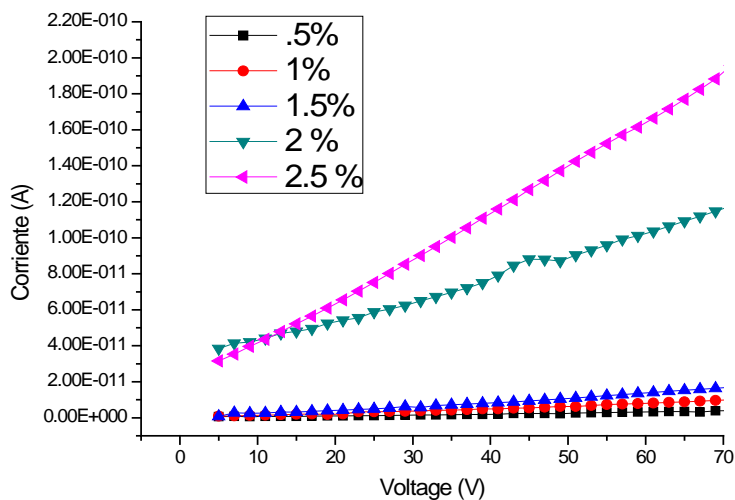


Fig.3. Conductividad de las películas de rutenio a diferentes porcentajes.

3.2. Medición de UV-vis

Por otra parte, una vez contruidos los dispositivos Ru/PVA/CL, se obtuvieron espectros de UV-Vis para los dos tipos complejos de rutenio, en ambos casos se observó que las bandas de absorción máxima se ubican aproximadamente en 460 nm, que se debe a transferencia de carga metal-ligando (MLCT) (Fig. 3). Con esta información se determinó usar láser con $\lambda = 530$ nm para provocar excitación en las moléculas de los complejos metálicos e inducir cambios en el alineamiento molecular del cristal líquido.

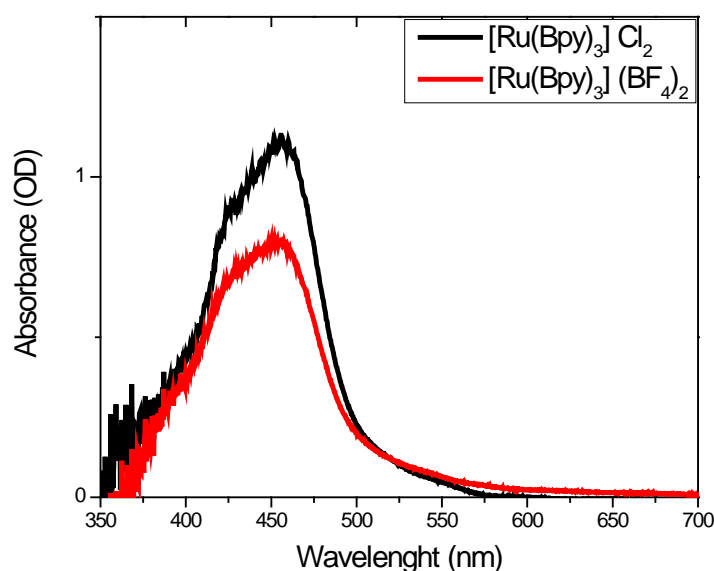


Fig. 3. Espectros de absorción para las muestras de Ru/PVA/CL, $[\text{Ru}(\text{Bpy})_3]\text{Cl}_2$ (línea negra) y $[\text{Ru}(\text{Bpy})_3](\text{BF}_4)_2$ (línea roja).

3.3. Prueba de autoenfoco

Una de las pruebas más sencillas y rápidas para determinar cualitativamente las características de óptica no lineal de materiales es el autoenfoco (auto-desenfoco), el cual se produce cuando se hace incidir un haz láser en un medio no lineal de tercer orden (efecto Kerr). Esta prueba fue aplicada al dispositivo ITO/Ru/CL, para ello fue

necesario enfocar con un objetivo de 5x un láser ($\lambda=532$ nm) con una potencia de 17 mW sobre dicha muestra, donde se pudo observar el fenómeno de autoenfoco (Fig. 4), esto ocurre cuando la celda de CL está situada justo en el área de mayor intensidad del haz laser dentro del plano de Fourier. Como se puede apreciar este fenómeno se caracteriza por la presencia de unos anillos concéntricos que se conoce como fase, cada anillo representa un cambio de fase equivalente a un valor de 2π .



Fig. 4. Fenómeno de autoenfoco.

4. Discusión

La evaluación de la respuesta de óptica no lineal del dispositivo PVA/Ru/CL se realizó con la configuración básica del Z-scan. Los resultados obtenidos fueron ajustados a la teoría de Z-scan [9], en donde se usa un láser a $\lambda=532$ para determinar el cambio de índice de refracción no lineal, el cual está asociado con la absorción no lineal por la ecuación 1.

$$n = n_0 + \frac{n_2}{2} |E|^2 \quad (1)$$

En donde n_0 es el índice de refracción lineal y n_2 es el índice de refracción no lineal, $|E|^2$ es la intensidad de campo eléctrico aplicado. Asumiendo una haz gaussiano, con cintura mínima de radio w_0 propagándose en la dirección $+z$, podemos escribir la siguiente ecuación 2.

$$z_0 = \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda} = k \omega_0^2 \quad (2)$$

Donde z_0 es la distancia de Rayleigh, ω_0 es el radio mínimo, $k = 2\pi/\lambda$ es el número de onda y λ la longitud de onda. Y a su vez, el radio mínimo está dado por ecuación 3.

$$\omega_0 = \frac{2\lambda F}{\pi D} \quad (3)$$

Donde F es la distancia focal y D el diámetro del haz.

La magnitud de la no linealidad, expresada en el valor del índice de refracción, se obtiene a partir de la amplitud de la diferencia de transmitancia de pico-valle, que para medios delgados (menores a la distancia de Rayleigh) está dada por las ecuaciones 4 y 5.

$$\Delta T_{p,v} = (0.406)(1 - s)^{0.27} |\Delta \phi_0| \quad (4)$$

$$\Delta \phi_0 = k \Delta n_0 L_{eff} \quad (5)$$

Donde $L_{eff} = (1 - \exp(-\alpha_0 L))/\alpha_0$, L es el espesor de la muestra y α_0 el coeficiente de absorción lineal, Δn_0 es el cambio inducido en el índice de refracción.

La detección de los datos de transmitancia normalizada a la transmitancia normal son usualmente realizadas en la dirección del eje óptico a través de una abertura finita pequeña colocada sobre un detector a campo lejano. La intensidad es obtenida en función de la posición (z) de la muestra. El espesor de la muestra ($d=25 \mu\text{m}$) es usualmente considerado más pequeño que la longitud de difracción del haz enfocado

$Z_0 = \pi \omega_0^2 / \lambda$, donde $\omega_0 = 15 \mu\text{m}$ es el radio de la cintura mínima, y $2Z_0 = 0.84 \mu\text{m}$ es la distancia de Rayleigh y la muestra es considerada como una lente delgada fotoinducida de longitud focal variable [8]. La relación de los valores de transmitancia en función de la posición de la muestra nos proporciona el signo y la magnitud de la no linealidad.

4.1. Medición de índice de refracción no lineal mediante Z-scan

Para la caracterización óptica no lineal realizada en celdas de PVA/Ru/CL conteniendo cristal líquido con $25 \mu\text{m}$ en espesor y usando un láser de Argón a $\lambda = 532 \text{ nm}$, se recurrió a la técnica de Z-scan ligeramente modificada; en la cual se colocó un polarizador antes de la muestra para cambiar la dirección del plano de polarización respecto al vector director formando el ángulo θ . Se colocó la celda de tal manera que el vector director fuera perpendicular a la dirección de propagación de la luz, en este caso el plano de polarización es paralelo ($\theta = 0^\circ$) al vector director. Con estas especificaciones se hicieron los barridos en Z de apertura cerrada aplicando una intensidad de 290 W/cm^2 en el que se obtuvo la respuesta óptica no lineal negativa y cuando el plano de polarización es perpendicular ($\theta = 90^\circ$) al vector director, se obtuvo la respuesta óptica no lineal positiva [8,10], Como se observa en la Fig. 5.

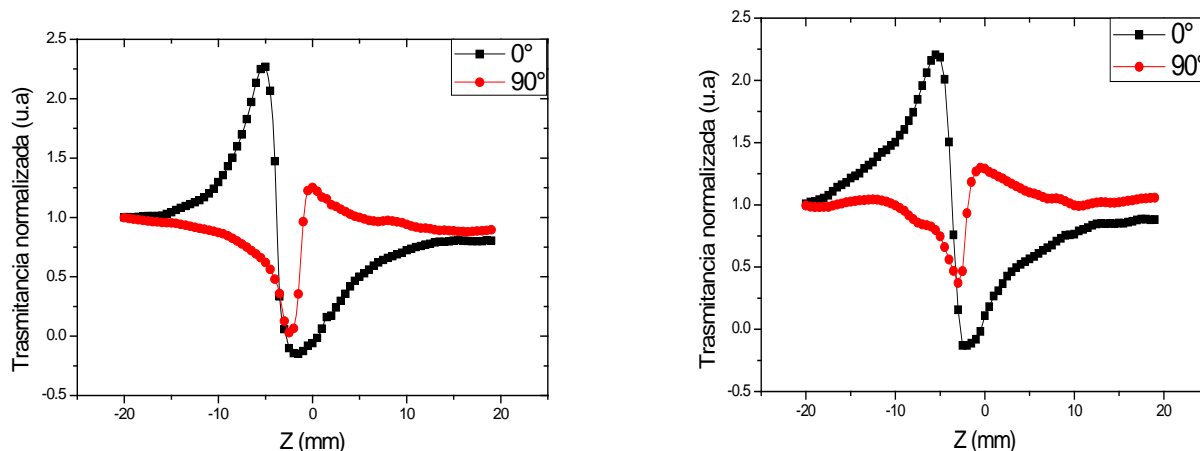


Fig. 5. Curvas de transmitancias obtenidas en muestras de PVA/Ru/CL. Dos tipos de complejos: $[\text{Ru}(\text{Bpy})_3]\text{Cl}_2$ (izquierda) y $[\text{Ru}(\text{Bpy})_3](\text{BF}_4)_2$ (derecha). Plano de polarización $\theta = 0^\circ$ (negra), y $\theta = 90^\circ$ (roja). La intensidad aplicada es de 290 W/cm^2 .

El estudio de la no linealidad de un material depende en gran parte de intensidades altas, en el cristal líquido además de tener respuesta óptica no lineal debido a esta intensidad se tiene un cambio de respuesta óptica no lineal negativa a no lineal positiva debido a cambios de dirección del plano de polarización respecto al vector director [11,12].

Al observar que la respuesta óptica no lineal negativa es más grande que la no lineal positiva aun teniendo la misma intensidad, se optó en aumentar la intensidad para conocer el comportamiento de las amplitudes de ambas respuestas. En la Figura 6 se muestra las curvas de barrido en Z cuando el plano de polarización de entrada es paralelo al vector director ($\alpha=0^\circ$). Como se puede observar conforme se aumentó la intensidad, la amplitud pico-valle se satura en el valle y la respuesta óptica no lineal es negativa.

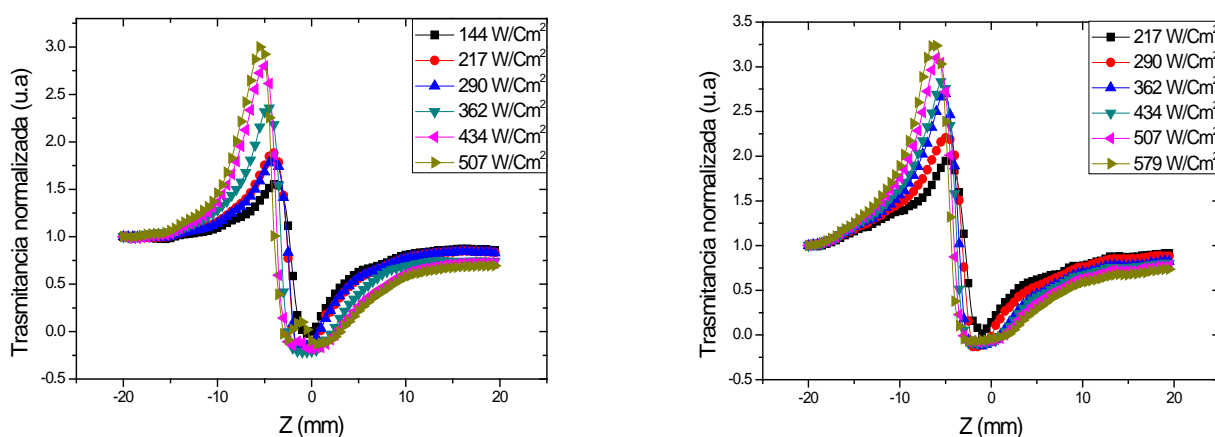


Fig. 6. Curvas de transmitancia para las muestras PVA/Ru/CL con $[Ru(Bpy)_3]Cl_2$ (izquierda) y $[Ru(Bpy)_3](BF_4)_2$ (derecha), el plano de polarización es paralelo (0°) al vector director a diferentes intensidades.

En la Fig. 7 se muestran las curvas del barrido en Z cuando el plano de polarización se mantiene a $\alpha=90^\circ$ (perpendicular) respecto al vector director y se aumenta la intensidad, y se observa como la respuesta óptica no lineal positiva sigue siendo menor que la

negativa, al aumentar la intensidad se observa que la amplitud pico-valle suaviza la curva característica de la técnica de Z-scan para respuestas ópticas no lineales positivas.

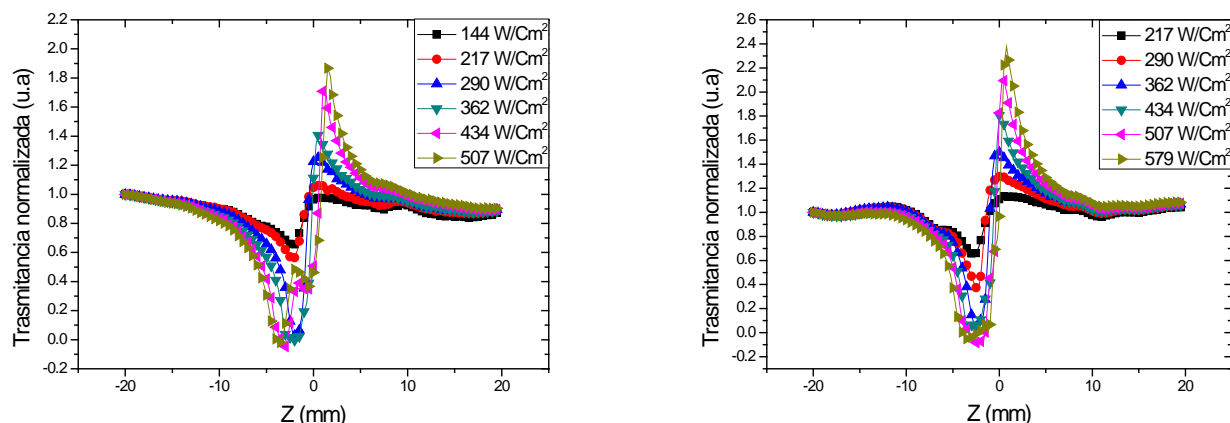


Fig. 7. Curvas de transmitancia para muestras PVA/Ru/CL con $[\text{Ru}(\text{Bpy})_3]\text{Cl}_2$ (izquierda) y $[\text{Ru}(\text{Bpy})_3](\text{BF}_4)_2$ (derecha), con plano de polarización perpendicular (90°) al vector director a diferentes intensidades.

En la Fig. 8 se observan las curvas de absorción no lineal para las muestras de PVA/Ru/CL empleando la misma técnica de barrido en z, en este caso con apertura abierta. Se comprueba de esta manera que en el material además de refracción no lineal está presente la absorción no lineal. Conforme aumenta la intensidad, la amplitud del valle aumenta en ambos planos de polarización ($\square=0$, $\square=90$), teniendo la mínima transmisión en el valor mínimo del valle [9].

Como se mencionó anteriormente, para obtener el índice de refracción no lineal (IRNL) es necesario hacer un cociente entre los datos normalizados de refracción no lineal (apertura cerrada) y los datos de las curvas de absorción no lineal (apertura abierta). En la Fig. 9 se observa la extracción del IRNL.

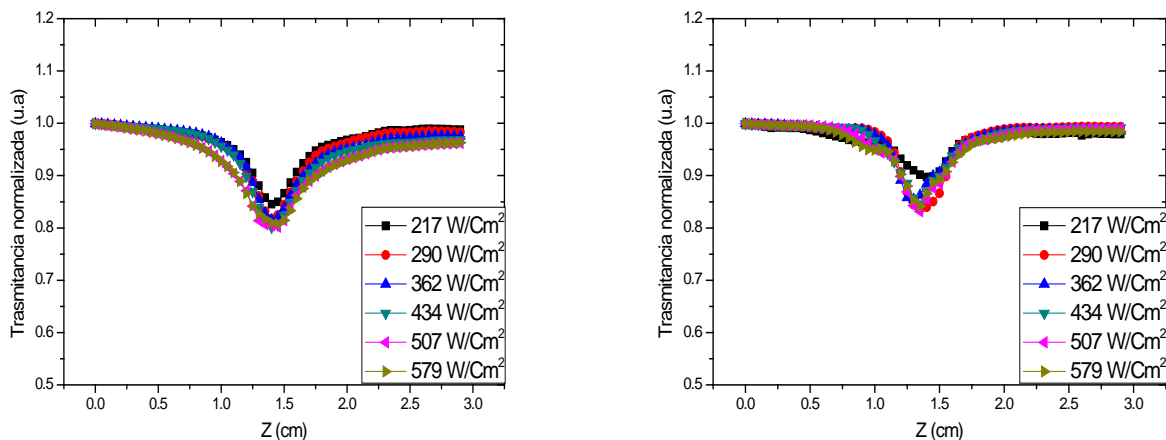


Fig. 8. Curvas de absorción no lineal para muestras de PVA/Ru/CL con $[\text{Ru}(\text{Bpy})_3]\text{Cl}_2$ (izquierda) y $[\text{Ru}(\text{Bpy})_3](\text{BF}_4)_2$ (derecha) a diferentes intensidades.

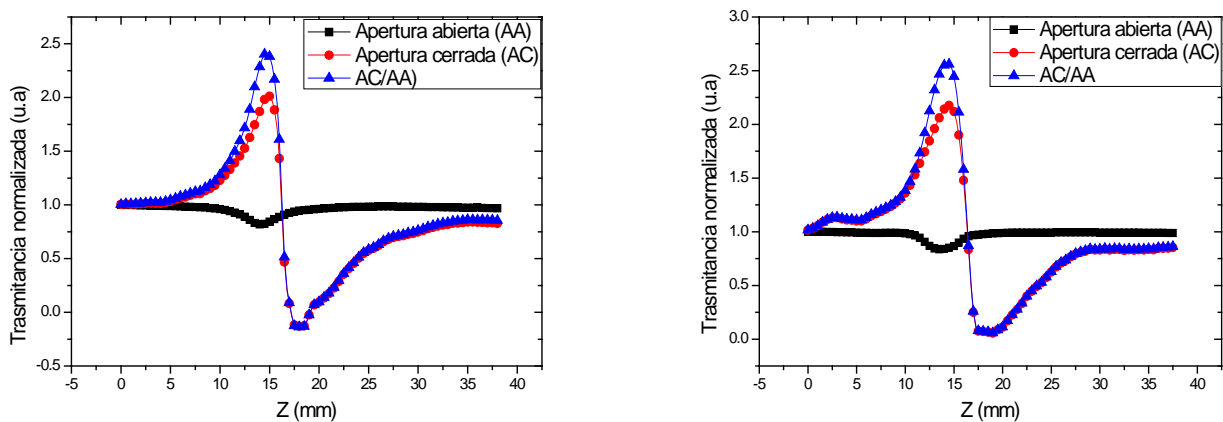


Fig. 9. Extracción del índice de refracción no lineal (cociente entre curvas de refracción y absorción no lineal). Muestras de $[\text{Ru}(\text{Bpy})_3]\text{Cl}_2$ (izquierda) y $[\text{Ru}(\text{Bpy})_3](\text{BF}_4)_2$ (derecha).

Utilizando la fórmula para n_2 , descrita previamente, se calcularon los IRNL en el que se pudo observar un cambio muy significativo. En la siguiente tabla I se muestra el valor máximo obtenido para las dos muestras PVA/Ru/CL cuando se les hizo incidir un láser con intensidad de 217 W/Cm².

Tabla I. Índices de refracción no lineal de las muestras de CL dopadas con rutenio.

Muestra de PVA/Ru/CL	n_2 (cm ² /W)
[Ru (Bpy) ₃] Cl ₂	16.02
[Ru (Bpy) ₃] (BF ₄) ₂	16.55

Con estos resultados obtenidos se deduce que el medio no lineal de los cristales líquidos contenidos dentro del dispositivo con película fina dopado con complejos de rutenio, presentan índices de refracción no lineal en magnitudes colosales; aunque ya se había reportado IRNL en el orden de 10³Cm²/W [12], el sistema usado depende de la mezcla de cristal líquido con dopado con colorantes orgánicos y se induce la no linealidad con mayor potencia que el determinado en este trabajo. En la tabla II se presenta resultados representativos donde se comparan los IRNL obtenidos en diferentes trabajos [13-15].

Tabla II. Índices de refracción no lineal obtenidos en diferentes trabajos.

AUTOR	n_2 (cm ² /W)
Lucchetti[13]	10 ³
Ramos-García[14]	50
En este trabajo	16.55
Zeldovich[15]	10 ⁻⁵

4.2. Aplicación de las muestras PVA/Ru/CL como filtro de fase

Para demostrar el funcionamiento de las muestras *PVA/Ru/CL* como filtros no lineales de contraste de fase (CF) para ello se implementó el arreglo de contraste de fase descrito en sección anterior. Usando la técnica de polarizadores entrecruzados se determinó la dirección de frotamiento y el vector de polarización del haz de laser de tal manera que fueran paralelas entre sí. Para la polarización 0° (no linealidad negativa) se observó que el objeto de fase parece brillante con un fondo oscuro, mientras que para la polarización 90° (no linealidad positivo) el contraste de la imagen se invierte [8], tal como lo muestra la Fig. 10 y 11.

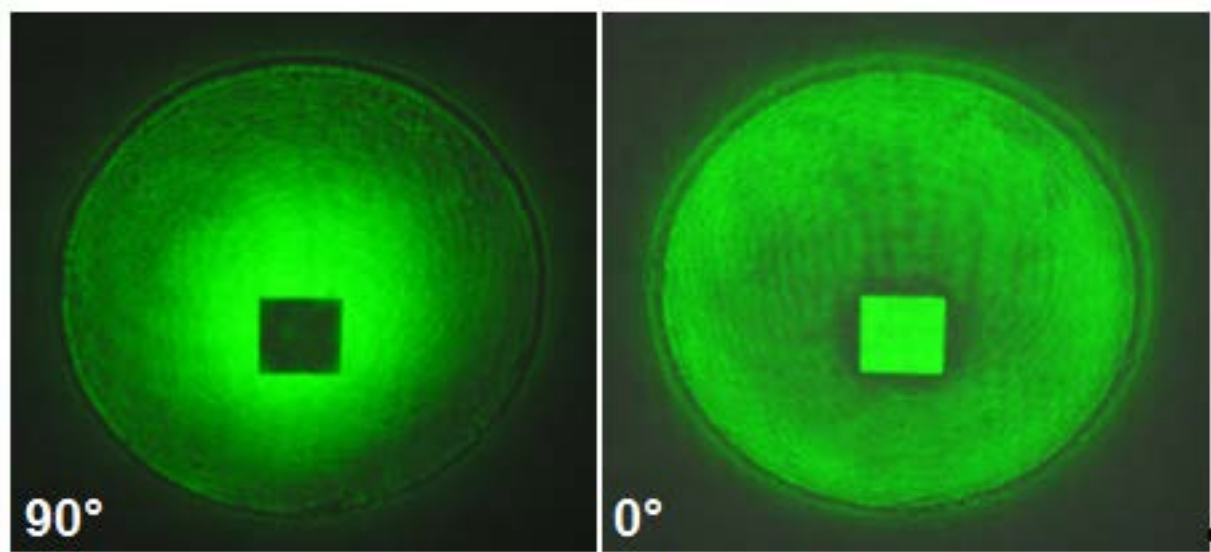


Fig. 10. Contrastes del objeto de fase utilizando la celda de CL dopada con $[\text{Ru}(\text{Bpy})_3]\text{Cl}_2$.

5. Conclusiones

Se fabricaron celdas de cristal líquido nemático (5CB) con una película de alineación fotoconductor con complejos de Rutenio en la cual se obtuvo una respuesta no lineal colosal. Mediante la técnica z-scan, controlando la polarización de entrada se determinó el signo y la magnitud del índice de refracción. También se demostró que estos

dispositivos de CL funcionan como filtros de fases aplicados en un microscopio de contraste de fases.

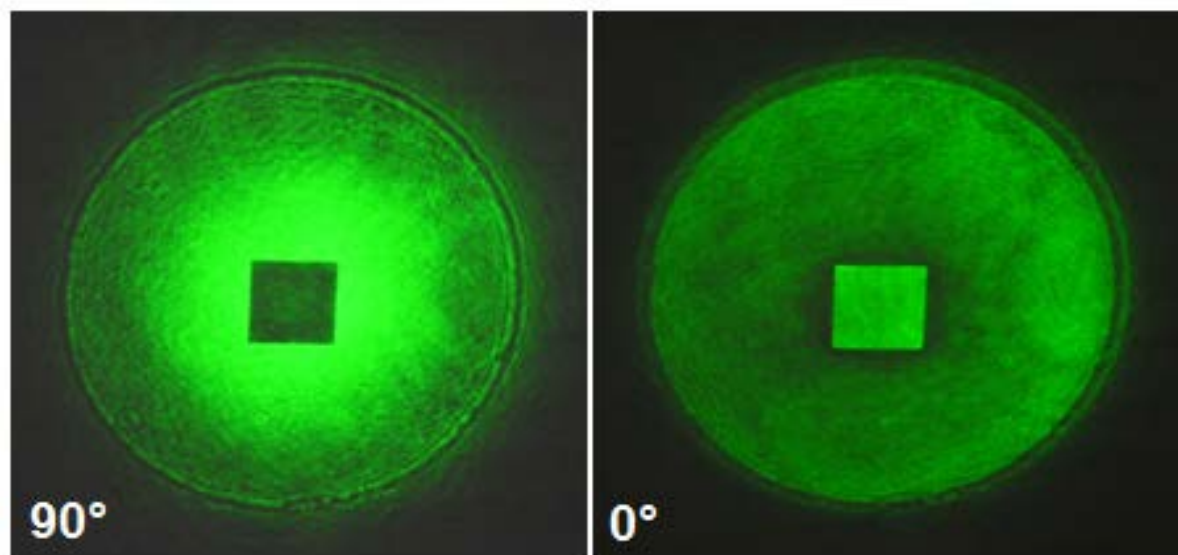


Fig. 11. Contrastes del objeto de fase utilizando la celda de CL dopada con $[\text{Ru}(\text{Bpy})_3](\text{BF}_4)_2$.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y tecnología por el apoyo financiero otorgado para la realización de este trabajo al través del proyecto SEP-CONACyT-2010-156529.

7. Referencias

- [1] A) S. Chandrasekhar, "Liquid Crystals", 2nd Ed. 1994. Great Britain, Cambridge University Press. B) I.C. Khoo, "Liquid crystals: *physical properties and nonlinear optical phenomena*", Wiley: New York, USA.1995.
- [2] S. Gil Moreno, "*Síntesis y caracterización de complejos moleculares de rutenio que incorporan el ligando py4Im en su estructura*". Tesis, Universidad Autónoma de Barcelona. 2012, España.

- [3] J.-W. Oh, C.-S. Choi, Y. Jung, C. Lee, and N. Kim, "*Photoconducting polymers containing covalently attached ruthenium complexes as a photosensitizer*", J. Mater. Chem., 19, 2009, 5765-5771.
- [4] B.P. Sullivan, D.J. Salmon, and T.J. Meyer, "Mixed phosphine 2,2'-bipyridine complexes of ruthenium", *Inorg. Chem.*, 17, 1978, 3334.
- [5] J. A. Broomhead, C. G. Young, "Tris(2,2'-bipyridine)ruthenium(II) dichloride hexahydrate" *Inorg. Synth.*, 28, 1990, 338-340.
- [6] J.C. Torres, "*Caracterización, Modelado eléctrico y desarrollo de nuevas aplicaciones de dispositivos basados en cristales líquidos*", Tesis, 2009. Universidad Carlos III de Madrid. España.
- [7] S.-T.Wu, D.-K. Yang, "*Fundamentals of liquid crystal devices*", Great Britain,Wiley, 2006.
- [8] R. Porrás-Aguilar, J.C. Ramírez-San-Juan, O. Baldovino-Pantaleón, D. May-Arriola, M. L. Arroyo-Carrasco, M. D. Iturbe-Castillo, D. Sánchez-de-la-Llave, R. Ramos-García, "*Polarization-controlled contrasted images using dye-doped nematic liquid crystal*", *Opt. Express*, 17, 2009, 3417-3423.
- [9] M. Sheik-Bahae, A. A. Said, T. Wei, D. Hagan, and E. W. Van Stryland. *IEEE J. Quantum Electron.* QE-26, 1990, 760.
- [10] A. Rosales-Rodríguez, R. Ortega-Martínez, E. Reynoso-Lara, M. L. Arroyo-Carrasco, C. G. Treviño-Palacios, O. Baldovino-Pantaleón, R. Ramos-García, M. D. Iturbe-castillo, "*Neither Kerr nor Thermal nonlinear response of dye doped liquid crystal characterized by the Z-scan technique*". *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 489, 2008, 9/[335]-21/[347].
- [11] R. Linares García, M. E. Nicho Diaz, P. A. Marquez Aguilar, "*Determinación del signo y la magnitud del índice de refracción óptico no lineal en poli-(3-alkil tiofenos)*", *Superficies y Vacío*, 23, 2010, 85-89.

- [12] V. F. Marañón-Ruiz, J. Castañeda-Contreras, M. Mora-González, H. P. Ladrón de Guevara, R. Chiu-Zarate, D. E. Ledesma-Carrión, L. Tellez-Jurado. "Películas de silicio dopadas con cristal líquido y rojo de metilo que presentan propiedades ópticas no lineales con potencial aplicación en optoelectrónica", *Superficies y Vacío*, 23, 2010, 15-20.
- [13] L. Lucchetti, M. Di Fabrizio, O. Francescangeli, F. Simoni, "Colossal optical nonlinearity in dye doped liquid crystals", *Opt. Commun.*, 233, 2004, 417-424.
- [14] a) R. Ramos-García, I. Lazo-Martínez, I. Guizar-Iturbide, A. Sánchez-Castillo, M. Buffety, P. Rück, "Colossal nonlinear optical effect in dye-doped Liquid Crystals", *Mol. Cryst. & Liq. Cryst.*, 454, 2006, 179-185. b) O. Baldovino-Pantaleón, R. Porras-Aguilar, A. Sánchez-Castillo, J.C. Ramírez-San-Juan, R. Ramos-García, E. A. González, "Anchoring of 4-dimethylamino substituted azobenzene dyes doped liquid crystals on substrates". *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 488, 2008, 1-10.
- [15] B. Zeldovich, N.F. Pilipetskii, A.V. Sukhov, N. V. Tabiryan, "Giant optical nonlinearity in the mesophase of a nematic liquid-crystal (NLC)", *JETP Letters*, 31, 1980, 263-269.

Autores

Dr. Oscar Baldovino Pantaleón es egresado de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla; Maestría en Físicoquímica y Doctorado en Ciencias Químicas por la UNAM. Realizó estancia posdoctoral en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica en Puebla. Visitas científicas al Liquid Crystal Institute en Kent State University, Oh, USA. y en University of California en Riverside, Cal. USA. Actualmente es Profesor Investigador en el Departamento de Ingeniería Electrónica en unidad académica Reynosa-Rodhe, Universidad Autónoma de Tamaulipas.

Ing. Jonathan Rodríguez Pérez, obtuvo el título en Ingeniería electrónica por la Universidad Autónoma de Tamaulipas en la unidad académica Reynosa-Rodhe.

Dr. Rubén Ramos García es egresado del Instituto Nacional Politécnico; Maestría en Óptica en el Centro de Investigaciones Ópticas, México y PhD por el Imperial College London, Eng. Realizó estancia posdoctoral en la University of California en Santa Mónica, Cal. USA. Visitas científicas al Liquid Crystal Institute en Kent State University, Oh, E.U. Actualmente es Investigador TC en el Departamento de Óptica en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.