

Revista Electrónica Nova Scientia

**Thermoluminescence of indium titanate
europium activated
Termoluminiscencia de titanato de indio
activado con europio**

**I.C. Muñoz¹, F. Brown², F. M. Vázquez-Paz¹, J. Marcazzó³
and E. Cruz-Zaragoza⁴**

¹Departamento de Ciencias Químico-Biológicas, Universidad de Sonora,
Hermosillo, México.

²Departamento de Investigación en Polímeros y Materiales, Universidad de
Sonora, Hermosillo, México.

³IFAS - CIFICEN (CONICET - UNCPBA), Tandil, Argentina.

⁴Instituto de Ciencias Nucleares, Universidad Nacional Autónoma de México,
México.

México - Argentina

Resumen

El titanato de indio, In_2TiO_5 , es un buen aislante a temperatura ambiente debido a su ancho de banda prohibida que es de 3.2 eV. En este trabajo se reportan las propiedades termoluminiscentes de In_2TiO_5 activado con europio que fue sintetizado mediante reacción de estado sólido. El material fue caracterizado con microscopía electrónica de barrido, espectroscopia de dispersión de energía y por difracción de rayos X. La intensidad termoluminiscente del In_2TiO_5 activado con europio se incrementó cerca de seis veces respecto a la observada para In_2TiO_5 sin ion activador. La curva de brillo de $\text{In}_2\text{TiO}_5:\text{Eu}$, es una banda ancha y con un máximo en 382 K. Se realizó análisis de deconvolución a las curvas de brillo asumiendo el modelo de cinética de orden general. Se determinaron cinco picos con máximos en 372, 382, 432, 488 y 556 K, los cuales coinciden con los datos experimentales obtenidos con el método de blanqueo térmico Tm-Tstop. La respuesta termoluminiscente respecto a la dosis gama fue lineal entre 31 y 1200 Gy, seguido de una región de saturación a partir de 1400 Gy. La reproducibilidad de la señal termoluminiscente fue 5.7 % en su desviación estándar. El desvanecimiento de la señal TL a temperatura ambiente, fue significativamente influenciado por el pico de baja temperatura (382 K). Los resultados obtenidos sugieren que $\text{In}_2\text{TiO}_5:\text{Eu}$ podría ser considerado como un fósforo para dosimetría de alta radiación gamma.

Palabras Clave: Titanato de Indio, radiación gamma, termoluminiscencia, dosimetría

Recepción: 12-06-2015

Aceptación: 02-12-2015

Abstract

In_2TiO_5 is a good insulator at room temperature because it has a band gap of 3.2 eV. The thermoluminescent properties of europium activated In_2TiO_5 are reported in this work. This material was prepared by conventional solid state reaction, and its characterization was carried out by scanning electronic microscopy, energy dispersive spectroscopy and X-ray diffraction. The thermoluminescent intensity of the europium activated In_2TiO_5 increased nearly six times in comparison to In_2TiO_5 pure phosphor. The glow curve of $\text{In}_2\text{TiO}_5:\text{Eu}$ was a broad band and it shows a maximum at 382 K. Five peaks centered at 372, 382, 432, 488 and 556 K were obtained by deconvolution method assuming the general order kinetics model. These peaks are in agreement with those obtained by the thermal bleaching named T_M - T_{STOP} method. A linear dose-response was obtained between 31 to 1200 Gy followed by a saturation stage at 1400 Gy dose gamma radiation. The standard deviation of the thermoluminescent signal reproducibility was 5.7 %. The fading at room temperature was significantly influenced by the low temperature peak (382 K). Therefore, this material could be taken into account as a phosphor for high dose gamma dosimetry.

Keywords: Indium titanate, gamma radiation, thermoluminescence, dosimetry

Introducción

Existen reportes del uso de algunos óxidos y sus mezclas como sensores de radiación gamma. Por ejemplo, se han probado películas delgadas de TeO_2/MnO y $\text{In}_2\text{O}_3/\text{SiO}$ en aplicaciones de dosimetría de radiación gamma, resultando prometedoras particularmente para dosimetría personal, por su comportamiento estable de la dosis-respuesta (Arshak, Korostynska 2003, 48; Horowitz et al. 2003, 84). Varios grupos de investigación han probado con éxito algunos óxidos termoluminiscentes tales como los óxidos de aluminio, berilio y magnesio principalmente (Rieke, Daniels 1957, 629; Mehta, Sengupta 1976, 955; Moore 1957, 636; Kortov et al. 1993, 267; Thomas, Houston 1964, 953; Kirsh et al. 1977, 653). Otros óxidos metálicos tales como NiO , LaFeO_3 , CeO_2 , TeO_2 , In_2O_3 , SiO y MnO se han usado como el componente de activación en la preparación de sensores de alta sensibilidad a la radiación gamma (Arshak et al. 2004, 2250). Recientemente, nuestro grupo de investigación ha reportado la termoluminiscencia (TL) del óxido Sc_2O_3 (Brown et al. 2014, 820) y de los titanatos de magnesio $\text{Mg}_{1.5}\text{InTi}_{0.5}\text{O}_4$ (Brown et al. 2015, 126) y de escandio, Sc_2TiO_5 (Muñoz et al. 2015, 58) los cuales mostraron respuesta termoluminiscente adecuada a la exposición con radiación beta. El In_2TiO_5 , es un óxido ternario con una estructura cristalina abierta que ha sido ampliamente estudiada, debido a su resistencia al ambiente. Sus aplicaciones son principalmente como filtro, microcapacitor, cerámico refractario y como fotocatalizador (Pai et al. 2012, 1458; Weng-Deng et al. 2007, 74). El In_2TiO_5 es buen aislante a temperatura ambiente debido a su ancho de banda prohibida de 3.2 eV (Pai et al. 2012, 1458). Sin embargo, en la literatura científica no se encuentran reportes de sus propiedades termoluminiscentes. Cuando a la red cristalina se le introducen iones impurezas, se generan defectos tales como vacancias además de los posibles defectos puntuales como los iones intersticiales y los pares impureza-vacancia que pueden existir en la red (McKeever. 1985, 1). También se generan defectos electrónicos provocados por la radiación ionizante, que formarán pares electrón-hueco, y los electrones pueden atraparse en las vacancias que tienen un papel relevante en la emisión termoluminiscente. En general, esos defectos puntuales principalmente impureza-vacancias y pares electron-hueco, al ser estimulados por calor, se recombinan para la emisión de luz del material previamente irradiado.

Método

La síntesis de $\text{In}_2\text{TiO}_5:\text{Eu}$ se realizó en dos etapas. En principio, se utilizaron los reactivos In_2O_3 (99.9%) y TiO_2 (99.9%) comercialmente disponibles y en relación molar 1:1 para

synthetizar el In_2TiO_5 . Los óxidos se colocaron en un mortero de ágata y se pulverizaron hasta obtener un polvo fino. Posteriormente, se moldeó en una pastilla de 1 g usando una prensa hidráulica de la marca Carver. La pastilla obtenida, se sinterizó a 1523 K durante 48 h en un horno calibrado Thermolyne modelo 1300. Así, el In_2TiO_5 se obtuvo mediante el método convencional de estado sólido (Senegas et al. 1975, 1614). Se prepararon seis lotes del titanato de indio puro. Para lograr el material activado con europio, se mezclaron In_2TiO_5 con Eu_2O_3 (99.99 %) en concentración de 10 % molar. Se colocaron 0.4611 g de In_2TiO_5 y 0.03519 g de Eu_2O_3 en un mortero de ágata y se mezclaron mediante molienda fina de la cual el polvo se preparó en forma de pastilla y posteriormente se sinterizó a 1373 K durante 24 h. Los patrones de difracción se obtuvieron en un difractómetro de rayos X de polvos (Bruker Mod. D8 Advance) el cual consta de un ánodo de Cu y un monocromador de grafito. Las micrografías y los espectros de dispersión de energía se obtuvieron en un microscopio electrónico de barrido (MEB) marca JEOL modelo JSM-5410LV y equipado con un analizador Oxford X-ray Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) que opera a 15 keV. Las muestras utilizadas en el estudio TL se prepararon como pastillas de 60 mg de peso y se trataron térmicamente a 1373 K durante 2 h antes de ser utilizadas en los experimentos. Las curvas de brillo de las muestras se obtuvieron inmediatamente después de haber sido expuestas a la radiación gamma, para tal propósito, se usó un equipo TL Harshaw modelo 3500 con una razón de calentamiento de 2 °C/s y bajo un flujo constante de nitrógeno para evitar señales TL espurias. Las curvas de brillo de In_2TiO_5 y $\text{In}_2\text{TiO}_5:\text{Eu}$ se registraron desde 303 a 673 K. Se utilizaron dos pastillas en cada uno de los experimentos realizados. Para analizar el comportamiento de la respuesta TL a la dosis de exposición, las muestras fueron irradiadas a 31, 100, 200, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1100, 1200, 1400, 1500, 1600, 1700, 1800 y 1900 Gy. La reproducibilidad de las curvas TL de $\text{In}_2\text{TiO}_5:\text{Eu}$, se obtuvo irradiando las muestras a la dosis de 1200 Gy en diez ciclos consecutivos de irradiación-lectura. El desvanecimiento de la señal TL del titanato activado con europio se realizó a 1200 Gy y posteriormente se almacenaron por tiempos definidos en oscuridad y a temperatura ambiente. Periódicamente, entre 0 a 336 h, se fueron realizando medidas TL para analizar las señales. Se realizó un blanqueo térmico paulatino usando el método T_M-T_{STOP} (McKeever 1980, 331), las muestras se irradiaron a 300 Gy. El calentamiento se inició a la temperatura de 333 K con incrementos de 10 K en cada paso hasta alcanzar 673 K. Los valores de temperatura de los máximos obtenidos en cada curva de brillo T_M , se graficaron contra la temperatura T_{STOP} , para generar una curva en forma de escalera. Cada escalón en la curva se asoció a la posición de cada pico de brillo bajo la envolvente. Las posiciones de los picos de brillo (T_M), obtenidas

con el método T_M - T_{STOP} también se usaron como datos de entrada para calcular los valores de los parámetros cinéticos (E , s y b). Debido a la forma compleja de las curvas de brillo, se realizó el análisis de deconvolución utilizando el programa Mathcad 14® y del mismo se usó la función Minerr para las soluciones y valores que minimicen la diferencia entre la función teórica para la intensidad y su correspondiente curva de brillo. En la deconvolución se asumió el modelo de Cinética de Orden General (General Order Kinetic, GOK) (Horowitz, Yossian 1995, 1) modificado por Rasheedy (Rasheedy 1993, 663) en donde la ecuación para la intensidad TL incluye la relación n_0/N la cual tiene en cuenta la fracción de trampas ocupadas, esta ecuación es:

$$I(T) = n_0^b S \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) / N^{b-1} \left[1 + \frac{S(b-1)(n_0/N)^{(b-1)}}{R} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT' \right]^{b-1} \quad (1)$$

donde n_0 es la concentración inicial de cargas atrapadas, b es el orden de la cinética entre primer y segundo orden, S es el factor de frecuencia (s^{-1}), E es la energía de activación (eV), N es la concentración de trampas, y R es la razón de calentamiento (2 K/s). La exactitud del ajuste a la curva experimental de datos TL puede verificarse por la figura de mérito (FOM) (Balian, Eddy 1977, 145):

$$FOM = \sum_{j_i}^{j_f} \frac{100 |y_j - y(x_j)|}{A} \quad (2)$$

donde j_i y j_f son el primer y último valor, respectivamente, de la región de interés. Los términos y_j y $y(x_j)$ son respectivamente, la emisión TL y la correspondiente función del valor j , A es la integral de la curva TL en toda la región de interés. El valor del FOM menor a 5 % significa que es un ajuste preciso y aceptable (Horowitz, Yossian 1995,1).

Todas las muestras fueron irradiadas con rayos gamma en un irradiador de tipo alberca Gammabeam 651PT que aloja fuentes de ^{60}Co que se encuentra instalado en el Instituto de Ciencias Nucleares de la UNAM.

Resultados

El análisis de difracción de rayos X de polvos mostró el patrón de difracción de In_2TiO_5 obtenido en monofase. La ausencia de reflexiones provenientes de los materiales de inicio (Ti_2O_3 y In_2O_3) indicó que la reacción fue completa. Las micrografías obtenidas por MEB de muestras de In_2TiO_5 y In_2TiO_5 : Eu al 10 % molar, presentan granos polimórficos con bordes

redondeados cuyo tamaño varía de 5 a 80 μm . El análisis de dispersión de energía de rayos X mostró los elementos esperados: Ti, O, In para In_2TiO_5 y además de estos elementos se encontró europio para las muestras de $\text{In}_2\text{TiO}_5:\text{Eu}$. En la figura 1 se presenta una comparación entre la curva de brillo de In_2TiO_5 sin activadores y de $\text{In}_2\text{TiO}_5:\text{Eu}$, ambas fueron expuestas a 1200 Gy con radiación gamma.

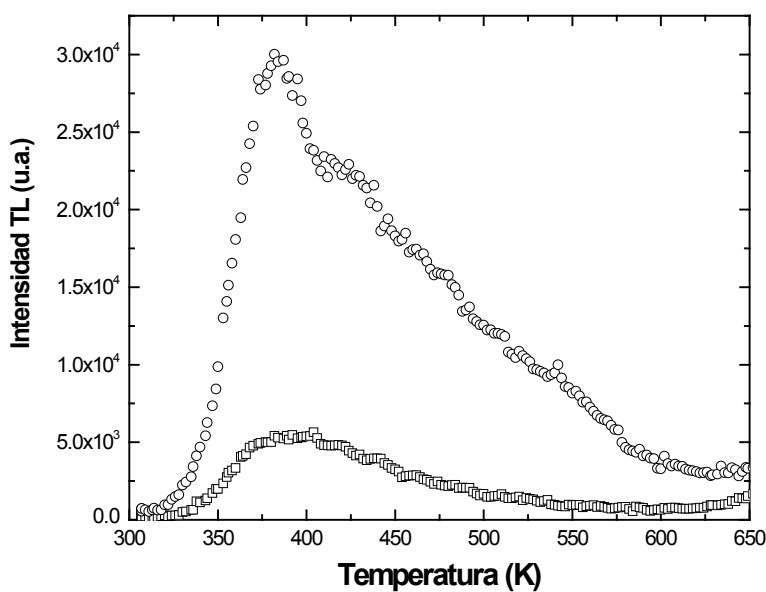


Figura 1. Curvas de brillo de In_2TiO_5 (□) sin impureza activadora y $\text{In}_2\text{TiO}_5:\text{Eu}$ (○), expuestas a la dosis de 1200 Gy de radiación gamma.

La intensidad TL se incrementó casi seis veces para $\text{In}_2\text{TiO}_5:\text{Eu}$ con respecto a In_2TiO_5 . Éste último, material puro, mostró una curva de brillo de menor intensidad TL con una banda ancha y sin definición del máximo del pico de brillo. El material al que se le han agregado impurezas con europio muestra en su curva de brillo la influencia de la impureza en la definición del máximo TL con alta intensidad. Así, resultó de mayor interés continuar la caracterización TL del titanato activado con europio. $\text{In}_2\text{TiO}_5:\text{Eu}$ exhibió una curva de brillo compleja, con un máximo centrado en 382 K y muy ancha hacia el lado de alta temperatura, este comportamiento fue muy similar para todas las dosis impartidas, como se muestra en la figura 2. El máximo en 382 K, no exhibe desplazamiento de su posición en el intervalo de dosis estudiado, pero incrementa su intensidad conforme aumenta la dosis de exposición, lo cual se asocia a una cinética de primer orden para el fenómeno TL observado. Después del pico máximo ubicado en 382 K, la banda TL incrementa su intensidad con el aumento de la dosis definiendo mejor su estructura compleja, típico de traslapes de picos bajo la curva TL

envolvente, que puede relacionarse a una distribución de trampas casi continuas (Gómez-Ros et al. 2006, 727) que todavía está en proceso de análisis. La estructura compleja de las curvas quedó evidenciada por la deconvolución de la curva de brillo donde se determinaron cinco picos con máximos en 372, 382, 432, 488 y 556 K. Al graficar T_M en función de T_{STOP} se obtuvo una curva con forma de escalera con cinco escalones que corresponden con valores de T_M en 383, 453, 526, 548 y 563 K, lo cual indica que las curvas de brillo se componen de picos traslapados.

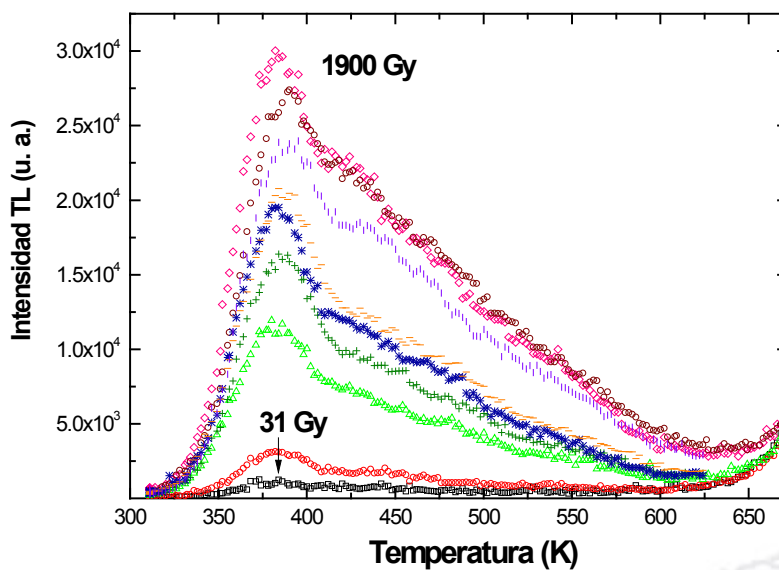


Figura 2. Curvas de brillo de la respuesta TL de $\text{In}_2\text{TiO}_5:\text{Eu}$ desde 31 a 1900 Gy.

Una característica importante del material, es que presentó linealidad en la dosis-respuesta entre 31 y 1200 Gy, como se muestra en la figura 3, iniciándose una región de saturación en 1400 Gy. Un comportamiento similar ha sido observado en el titanato Sc_2TiO_5 cuyo intervalo lineal abarca dosis de 50 a 500 Gy y a dosis mayores inicia la saturación de la señal TL (Muñoz et al. 2014, 58).

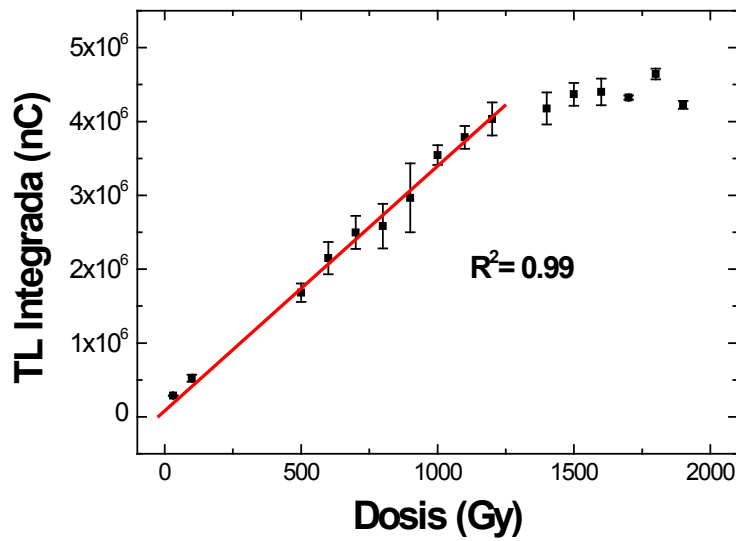


Figura 3. Respuesta TL integrada de $\text{In}_2\text{TiO}_5:\text{Eu}$ en el intervalo lineal desde 31 hasta 1200 Gy.

La figura 4 presenta las curvas de brillo del desvanecimiento de la señal TL, se puede apreciar como la curva de brillo exhibe un hombro del lado de alta temperatura cuyos máximos se desplazan hacia mayor temperatura conforme pasa el tiempo de almacenamiento y también la intensidad de las curvas de brillo disminuye. La figura insertada muestra el decaimiento de las curvas TL integradas desde 0 h hasta 336 h. Se observa la marcada disminución de la señal TL integrada que se ve muy influenciada en su decaimiento por el pico centrado a 382 K. Este pico desaparece transcurridas 2 h y después de 4 h el decaimiento es más lento. La pérdida del pico a 382 K es atribuida a la recombinación de los defectos superficiales cercanos a la banda de conducción. La señal TL se reduce 40 % en 24 h, después de este tiempo y hasta 336 h de almacenamiento la intensidad de la curva de brillo decrece más lentamente y se observa solo 15 % de decaimiento.

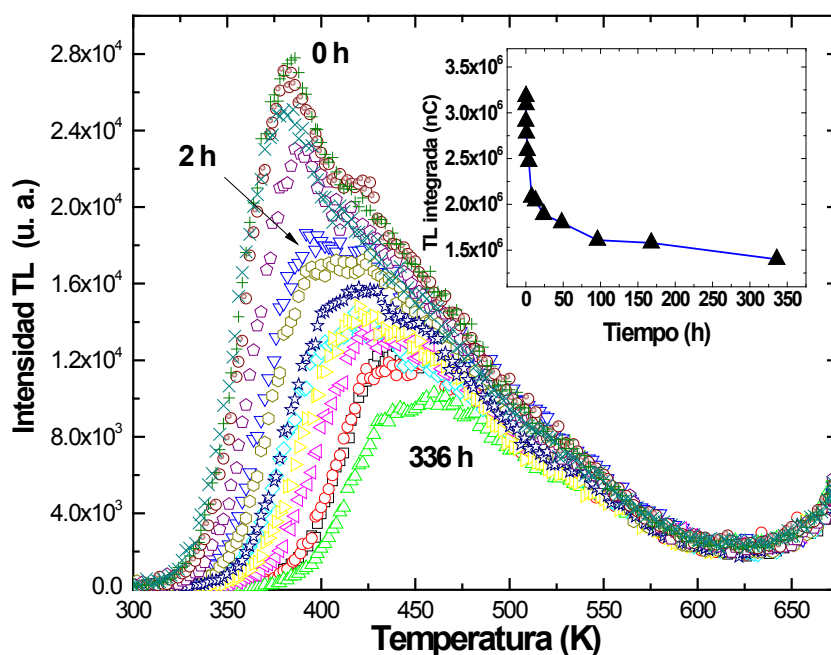


Figura 4. Curvas de brillo de desvanecimiento de la señal TL de $\text{In}_2\text{TiO}_5:\text{Eu}$ expuesto a 1200 Gy.

Adicionalmente, la reproducibilidad de la señal TL fue de 5.7% de desviación estándar, calculada a partir del promedio de dos lecturas para cada ciclo de irradiación-lectura de un total de diez ciclos.

Los parámetros cinéticos se calcularon para las curvas de brillo obtenidas a las dosis de 1000 Gy y 1200 Gy, y se analizaron considerando el modelo de cinética de orden general. El FOM de ajuste fue menor a 3 %, el cual es considerado como buen valor respecto al 5 % como límite aceptable (Balian, Eddy 1977, 145). La figura 5 presenta la deconvolución de las curvas de brillo de las muestras irradiadas del $\text{In}_2\text{TiO}_5:\text{Eu}$. En ambos casos, se resolvieron cinco picos de brillo con cinéticas de primer y segundo orden. Estos resultados coinciden con los que exhibe el método T_M-T_{STOP} en el que se encontró un evidente traslape entre los picos de brillo, principalmente entre los dos centrados en 383 y 453 K. Los valores de energía de activación E , se obtuvieron en el intervalo de 0.76 a 0.92 eV (tabla 1). Sin embargo, los valores de la energía de activación no corresponden a valores que crecen con el aumento de la temperatura de los picos, muy probablemente debido a la distribución de trampas que producen el traslape de los picos que conforman a la curva de brillo TL.

Tabla 1. Parámetros cinéticos de $\text{In}_2\text{TiO}_5:\text{Eu}$.

| Pico | $T_{max}[\text{K}]$ | E [eV] | $s[\text{s}^{-1}]$ | B | FOM |
|---------------|---------------------|----------|----------------------|-----|------|
| 1200Gy | | | | | 3.1% |
| 1 | 372 | 0.90 | 2.8×10^{11} | 1.0 | |
| 2 | 382 | 0.76 | 1.3×10^{13} | 2.0 | |
| 3 | 432 | 0.78 | 2.1×10^{12} | 2.0 | |
| 4 | 488 | 0.84 | 8.9×10^{11} | 2.0 | |
| 5 | 556 | 0.92 | 4.0×10^{11} | 2.0 | |
| 1000Gy | | | | | 2.7% |
| 1 | 370 | 0.90 | 3.3×10^{11} | 1.0 | |
| 2 | 388 | 0.76 | 9.7×10^{12} | 2.0 | |
| 3 | 444 | 0.78 | 1.2×10^{12} | 2.0 | |
| 4 | 506 | 0.84 | 5.5×10^{11} | 2.0 | |
| 5 | 568 | 0.92 | 3.9×10^{11} | 2.0 | |

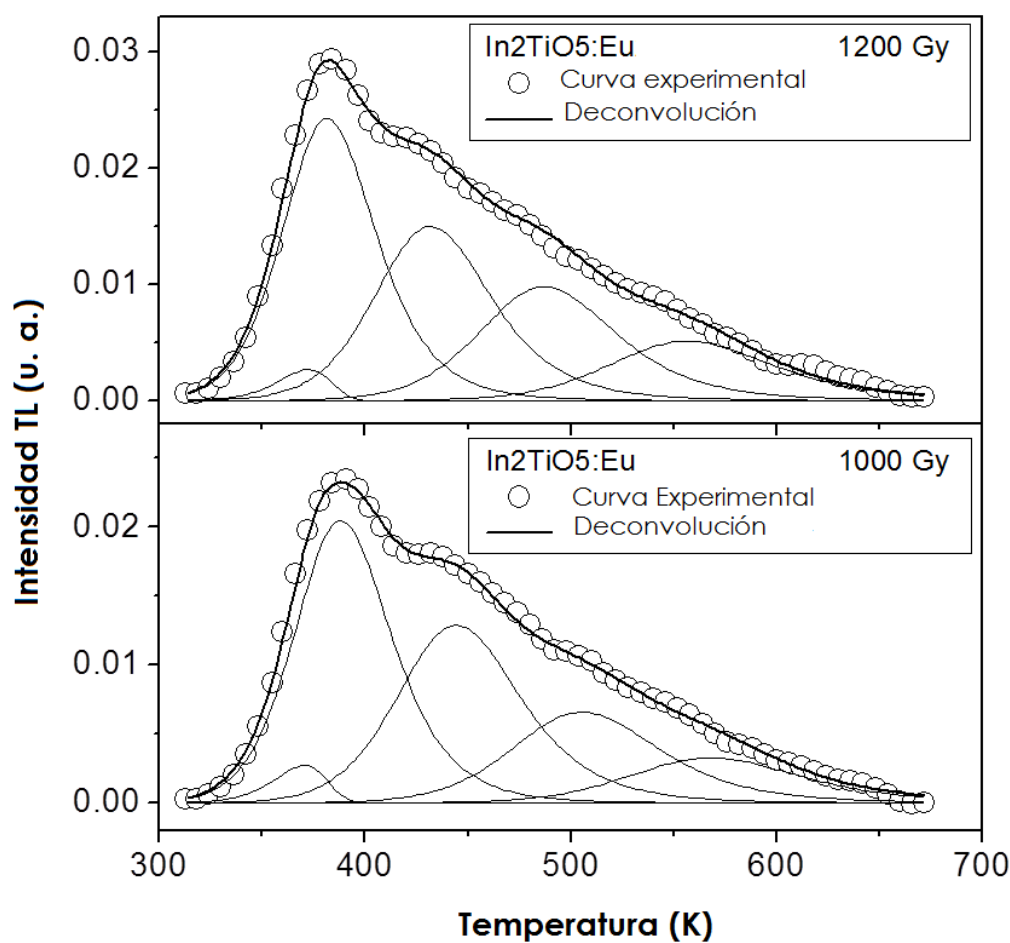


Figura 5. Deconvolución de las curvas de brillo asumiendo el modelo de cinética de orden general para $\text{In}_2\text{TiO}_5:\text{Eu}$ expuesto a dosis de 1200 y 1000 Gy de radiación gamma.

Conclusiones

El In_2TiO_5 : Eu fue sintetizado por reacción de estado sólido y mostró una respuesta TL seis veces mayor que el In_2TiO_5 puro. La respuesta en función de la dosis presentó buena linealidad desde 31 hasta 1200 Gy, seguido por la saturación de la señal TL a partir de 1400 Gy de dosis de radiación gamma. El desvanecimiento de la señal TL a temperatura ambiente fue significativamente influenciado por el pico de baja temperatura (382 K), éste desaparece al transcurrir 2 h. El máximo en la curva de brillo decrece muy lentamente a partir de 24 h y al final de 336 h (14 días) se reduce en 15 %. La reproducibilidad de la señal TL presentó 5.7% de desviación estándar en diez ciclos de irradiación-lectura. Los parámetros cinéticos obtenidos asumiendo el modelo de cinética de orden general para dos distintas dosis, 1000 Gy y 1200 Gy, son muy similares lo que evidencia la exactitud en la predicción del proceso TL descrito.

El In_2TiO_5 : Eu mostró características TL que lo hacen un material interesante para continuar estudiándose y una de sus aplicaciones puede ser en dosimetría de dosis altas de radiación gamma.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado gracias al apoyo de la Oficina de Colaboración Interinstitucional de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), y de la Dirección de Desarrollo Académico e Innovación Educativa de la Universidad de Sonora (UNISON) con el proyecto de colaboración anual UNAM-UNISON 2012 y CONACYT (México) proyecto número CB-2008-106041.

Referencias

- Arshak, K.I., Korostynska, O. (2003). Thin films of (TeO)(InO) as gamma radiation sensors. *Sens. Rev.* 23 (1), 48-54.
- Arshak, K., Arshak, A. Zleetni, S., Korostynska, O. (2004). Thin and thick films of metal oxides and metal phthalocyanines as gamma radiation dosimeters. *IEEE Trans. on Nucl. Sci.* 51 (5), 2250-2255.
- Balian, H. G. Eddy, N. W. (1977). Figure-of-merit (FOM), an improved criterion over the normalized chi-squared test for assessing goodness-of-fit of gamma rays spectral peak. *Nucl. Instrum. Methods.* 145, 389.

Brown, F., Alvarez, V.E., Bernal, R., Cruz Vazquez, C., BorbónNuñez, H., Muñoz, I.C., Castaño V.M. (2014). Thermoluminescence of Sc₂O₃ exposed to beta-particle irradiation. *Optical Materials*. (36) 820-822.

Brown, F., Hernandez-Perez, T.C., Muñoz, I.C., Alvarez-Montaña, V.E., Cruz-Vazquez, C., Bernal, R. (2015). Synthesis and thermoluminescence of a spinel-type oxide exposed to beta-particle irradiation. *Res. Soc. Symp. Proc. Vol 1769*. 2015 DOI.10.1557./opl.2015.126.

Fahim, F.K., Arshak, K.I., Korostynska, O. (2003). Hybrid oxide mixtures as γ -radiation sensors. *Sensors Proceedings of IEEE*.1, 84-87.

Gómez-Ros, J. M., Furetta, C., Cruz-Zaragoza, E., Lis, M., Torres, A., Monsivais, G. (2006). Dose dependence and thermal stability of the thermoluminescence emission in inorganic dust from mint and chamomile. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. 566, 727-732.

Horowitz, Y.S., Yossian, D. (1995). Computerised glow curve deconvolution: application to thermoluminescence dosimetry. *Radiat. Prot. Dosim.* 60, 1–114.

Kirsh, Y., Kristianpoller, N., Chen, R. (1977). Vacuum ultra-violet induced thermoluminescence in γ -irradiated and non-irradiated MgO powder. *Phil. Mag.* 35 (3), 653-661.

Kortov, V.S., Milman, I.I., Slesarev, A.I., Kijko, V.S. (1993). New BeO ceramics for TL ESR dosimetry. *Radiat. Prot. Dosim.* 47, 267-270.

McKeever SWS. (1980) On the analysis of complex thermoluminescence glow-curves: resolution in to individual peaks. *Phys. Status Solidi A*. (62), 331-339.

McKeever S. W. S. (1985) Thermoluminescence of solids. Cambridge. Chapter I, II. pp. 1-63.

Mehta, S.K., Sengupta, S. (1976). Gamma dosimetry with Al₂O₃ thermoluminescent phosphor. *Phys. Med. Biol.* 21 (6), 955-964.

Moore, L.E. (1957). Thermoluminescence of sodium sulfate and lead sulfate and miscellaneous sulfates, carbonates and oxides. *J. Phys. Chem.* 61 (5), 636-639.

Muñoz, I.C., Brown, F., Durán-Muñoz, H., Cruz-Zaragoza, E., Durán-Torres, B., V.E. Alvarez-Montaña, V.E. (2014). Thermoluminescence response and glow curve structure of Sc₂TiO₅ β -irradiated. *Appl. Rad. Isot.* (90) 58-61.

Pai R., Majeed J., Banerjee, A. M., Arya, A., Bhattacharya S., Rao, R., Bharadwaj, S. R. (2012). Role of Nd³⁺ ions in modifying the band structure and photocatalytic properties of substituted indium titanates, In₂(1-x)Nd_{2x}TiO₅ oxides. *J. Phys. Chem. C*. 116, 1458-1471.

Rasheedy, M.S. (1993). On the general-order kinetics of the thermoluminescence glow peak. *J. Phys. Condens. Matter* 5, 633–636.

Rieke, J.K., Daniels, F. (1957). Thermoluminescence studies of aluminum oxide. *J. Phys. Chem.* 61 (5), 629-633.

Senegas, P.J., Manaud, J.P., Galy, J. (1975). Sur un nouveau type d'oxides doubles $M+IVIn_2O_5$ ($M=Ti, V$): Etude Cristalochimique. *Acta Cryst.* B31, 1614-1618.

Thomas, B., Houston, E. (1964). Correlation of optical absorption and thermoluminescence curves for single crystals of magnesium oxide. *Br. J. Appl. Phys.* 15 (8), 953-958.

[Wen-Deng Wang](#), [Fu-Qiang Huang](#), [Cun-Ming Liu](#), [Xin-Ping Lin](#), [Jian-Lin Shi](#). (2007). Preparation, electronic structure and photocatalytic activity of the In_2TiO_5 photocatalyst. *Mat. Sci. & Eng. B.* 139, 74-80.