

Análisis Judd-Ofelt del sistema vítreo TeO_2 -ZnO dopados con Re^{3+} (Re=Yb, Tm, Er)

Judd-Ofelt analysis in Yb^{3+} - Um^{3+} - Er^{3+} Tridoped TeO_2 -ZnO glass

Recibido: agosto 08 de 2023 | Revisado: setiembre 09 de 2023 | Aceptado: noviembre 04 de 2023

J. CHACALIAZA - RICARDI¹

G. LOZANO C.¹

J.L. CLABEL H.¹

C.V. LANDAURO^{2,3}

V.A.G. RIVERA⁴

E. MAREGA JR.¹

RESUMEN

El análisis de Judd-Ofelt es importante porque indica la influencia del dopaje de iones de tierras raras en la matriz hospedera en la cuales se encuentran. En el presente trabajo se presentan los resultados de la caracterización óptica de vidrios zinc-telurito dopados con Yb^{3+} , variando las concentraciones de Tm^{3+} y Er^{3+} mediante espectroscopía de absorción UV-VIS y medidas de índice de refracción. A partir de dichos resultados se obtuvieron los parámetros de Judd-Ofelt, los cuales indicaron una modificación estructural con la adición de los iones de tierras raras en la matriz vítrea de telurito, debido al reordenamiento de la estructura vítrea y la ruptura de enlaces Te-O.

Palabras clave: vidrios teluritos, luminiscencia, iones de tierras raras

ABSTRACT

The Judd-Ofelt analysis is essential because it indicates the influence of rare earth ion doping on the host matrix in which they are found. In the present work, the results of the optical characterization of zinc-tellurite glasses doped with Yb^{3+} are presented, varying the concentrations of Tm^{3+} and Er^{3+} by means of UV-VIS absorption spectroscopy and refractive index measurements. From these results, the Judd-Ofelt parameters were obtained, which indicated a structural modification with the addition of rare earth ions in the tellurite glassy matrix, due to the rearrangement of the glassy structure and the breaking of Te-O bonds.

Keywords: tellurite glasses, luminescence, rare earth ions

- 1 Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil
- 2 Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú
- 3 Centro de Investigaciones Tecnológicas, Biomédicas y Medioambientales, Callao, Perú
- 4 Centre d'Optique, Photonique et Laser, Université Laval, Québec, Canada

Autor de correspondencia:
jchacaliaza@usp.br

© Los autores. Este artículo es publicado por la Revista Campus de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de San Martín de Porres. Este artículo se distribuye en los términos de la Licencia Creative Commons Atribución No-Comercial – Compartir-Igual 4.0 Internacional (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), que permite el uso no comercial, distribución y reproducción en cualquier medio siempre que la obra original sea debidamente citada. Para uso comercial contactar a: revistacampus@usmp.pe.

<https://doi.org/10.24265/campus.2023.v28n36.05>

Introducción

Los materiales vítreos tienen una amplia aplicación en la óptica, gracias a sus propiedades de absorción, emisión, refracción y reflexión, además es posible modificar su comportamiento dopándolo con iones de tierras raras (RE). En este sentido, su importancia en la vida cotidiana del ser humano ha llevado a que la Asamblea General de la Organización de las Naciones Unidas haya denominado al año 2022 como Año Internacional del vidrio.

Es importante mencionar que la estructura de un vidrio es desordenada, pero se puede notar cierto orden alrededor de cada átomo (denominado orden local y está en la escala nanométrico), pero careciendo periodicidad a largo alcance y los ángulos de los enlaces entre átomos tienen ligeras variaciones, las cuales se van acumulando a grandes distancias produciendo un desorden estructural (Yamane and Asahara, 2017) (Ojovan and Lee, 2010) (Mauro and Zanotto, 2014) (Mavračić et al., 2018).

La definición del término vidrio sigue siendo un tema discusión aún abierta en física de la materia condensada, por eso E.D. Zanotto & Jhon C. Mauro (Zanotto and Mauro, 2017) proponen dos definiciones modernas, la primera dice que el vidrio es un material que parece sólido a una escala breve de tiempo pero que va relajando continuamente hacia el estado líquido, y la segunda definición dice que el vidrio un estado de la materia condensada no cristalina y fuera del equilibrio, que exhibe una transición vítrea y su destino final, en el límite del tiempo infinito es cristalizar.

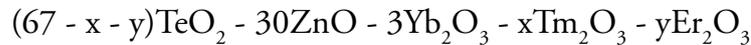
En ese contexto los vidrios teluritos están formados por dióxido de Telurio, TeO_2 , el cual es el más estable de los óxidos de Telurio (El-Mallawany, 2018), dentro de las principales propiedades de estos sistemas vítreos son la baja temperatura de fusión ($733\text{ }^\circ\text{C}$), estabilidad térmica, buena resistente a la corrosión, alto índice de refracción, tanto lineal ($-1,9 - 2,3$) como no lineal ($\sim 2,5 \times 10^{-19}\text{ m}^2\text{W}^{-1}$), y de transmitancia ($\sim 350\text{ nm} - 60000\text{ nm}$). Además de tener una energía de fonón relativamente baja y consecuencia de ello resulta en una tasa de transición no radiativa más baja entre niveles de energía adyacentes, lo que los hace buenos materiales hospederos para dopar con RE (Dousti et al., 2015; Jha et al., 2012; Kaur et al., 2010)

Por otro lado, debido a los diversos sitios que se forman dentro de la matriz vítrea de telurito, como TeO_4 , TeO_{3+1} y TeO_3 , estos vidrios son interesantes para la adición de óxidos de metales de transición, tales como el ZnO en la composición de la matriz vítrea aumentan la estabilidad térmica y altera las propiedades ópticas del vidrio [10–12], además de haberse reportado que son favorables para emisiones de azul, verde, rojo y en el IR (1.5 μm) (Rivera and Barbosa, 2014).

Nuestra investigación se centró en el estudio de la adición de dopaje de iones de tierras raras ($\text{RE}=\text{Yb}^{3+}$, Tm^{3+} y Er^{3+}) en la estructura vítrea de una matriz binaria de telurio-zinc. En la presente investigación se presentan los resultados de la caracterización óptica mediante medidas de índice de refracción y de espectroscopía de Absorción UV-Vis, y consecuentemente se obtienen los parámetros de Judd-Ofelt (J-O) de los vidrios $\text{TeO}_2\text{-ZnO}$.

Método

Las muestras de vidrio fueron sintetizadas bajo el método de melt-



donde x e y son las concentraciones de Tm_2O_3 y Er_2O_3 en mol% respectivamente y las dimensiones de las muestras fueron aproximadamente $2.0 \times 1.0 \times 0.2 \text{ cm}^3$. La densidad de las muestras fue determinada usando el principio de Arquímedes, midiendo el volumen desplazado de cada muestra sumergida en agua y siguiendo la relación:

$$\rho = \frac{m}{m - m'} \rho_{H_2O}$$

donde m y m' son las masas de las muestras de vidrio medidas en aire y en agua respectivamente, ρ_{H_2O} es la densidad del agua destilada, la cual está en función de la temperatura. Las medidas fueron realizadas en una balanza analítica marca Metler Toledo modelo AG285 con una precisión en gramos de 0.0001 y la temperatura del agua destilada fue de $23.0 \pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$. La concentración de RE se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$N_o = \%RE \frac{\rho N_A}{M_T}$$

donde N_o es el número de Avogadro, $\%RE$ es el porcentaje de la concentración del Tm_2O_3 o Er_2O_3 según sea el caso, ρ es la densidad del vidrio calculado a partir del principio de Arquímedes y es el peso molecular total. Los índices de refracción fueron medidos en un refractómetro Metricon modelo 2010 M-Line equipado con tres láseres en las longitudes de onda de 532.1, 632.8 y 1538 nm; los resultados

quenching y con los procedimientos establecidos por V.A.G. Rivera et al., 2017 (Rivera and Manzani, 2017). Los vidrios tienen la siguiente composición química:

fueron ajustados a la ecuación de Sellmeier (Ghosh, 1997):

$$n^2(\lambda) - 1 = \frac{A\lambda^2}{\lambda^2 - B} \quad (1)$$

donde n es el índice de refracción del vidrio, λ es la longitud de onda del láser, A y B son los coeficientes de Sellmeier determinados a partir de los datos obtenidos. Los espectros de absorción fueron obtenidos mediante espectrofotómetro UV/VIS Perkin-Lambda 900 en el rango de longitud de onda desde 350 hasta 1100 nm. Estas medidas fueron tomadas a temperatura ambiente. El cálculo de las intensidades de transición electrónica $4f \rightarrow 4f'$ en RE es descrita por la teoría de J-O y permite encontrar las probabilidades de transición entre los niveles de energía de los RE a partir de tres parámetros ($\Omega_2, \Omega_4, \Omega_6$), denominados como los parámetros de intensidad de J-O. Dichos parámetros son indicadores de la influencia sobre los RE sobre los cambios de la matriz hospedera. En general, Ω_2 depende de efectos de corto alcance, como la covalencia y los cambios estructurales locales, mientras que Ω_4 y Ω_6 son los parámetros de largo alcance relacionados con las propiedades estructurales de la matriz hospedera, además dichos parámetros son también indicadores de la viscosidad y rigidez del medio. De la ecuación de la fuerza de línea (line strenght):

$$S^{exp}_{ED}(J, J') = \sum_{\lambda=2,4,6} \Omega_{\lambda} |\langle f^N \psi || U^{(\lambda)} || f^N \psi' J' \rangle|^2 \tag{2}$$

$$= \frac{3 h \lambda_p (2J + 1)}{8 \pi^2 m_e c} \frac{9n}{(n^2 + 2)^2} f_{exp}$$

donde Ω_i son los parámetros de J-O, $i=2, 4, 6$ y $||U^{(\lambda)}||$ son los elementos de matriz doblemente reducidos para una transición $f^N \psi J \rightarrow f^N \psi' J'$ definidos en el artículo de Carnall (Carnall et al., 1968). En el segundo término, h es la constante de Planck, λ_p es la longitud de onda principal para la banda de absorción de la transición $f^N \psi J \rightarrow f^N \psi' J'$, J es el momento angular total del estado fundamental, $(2J+1)$ es la degeneración Stark, $n=n(\lambda)$ es el índice de refracción del material obtenido a partir de la ecuación de Sellmeier en λ_p , m_e , es la masa del

electrón, c es la velocidad de la luz y f_{exp} es la fuerza de oscilador experimental:

$$f_{exp} = \frac{m_e c}{\pi e^2 N_0} \int_{banda} \alpha(\nu) d\nu \tag{3}$$

donde N_0 es la concentración de RE y es $\alpha(\nu)$ el coeficiente de absorción en función del número de onda en unidades de cm^{-1} y la integral $\int_{banda} \alpha(\nu) d\nu$ se obtiene calculando el área bajo la curva de cada banda de absorción correspondiente a las transiciones electrónicas de los RE. La ecuación 2 se puede expresar de forma matricial:

$$S^{exp}_{ED} = \begin{pmatrix} ||U_1^2||^2 & ||U_1^4||^2 & ||U_1^6||^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ ||U_M^2||^2 & ||U_M^4||^2 & ||U_M^6||^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Omega_2 \\ \Omega_4 \\ \Omega_6 \end{pmatrix} \tag{4}$$

donde S^{exp}_{ED} es un vector $M \times 1$. En el caso que el número de ecuaciones es mayor que el número de incógnitas, se le conoce como sistema sobre-determinado. Reemplazando las ecuaciones 3 y 4 en 2 y aplicando el método estándar de mínimos

cuadrados para calcular los parámetros de J-O.

Resultados

Los datos obtenidos de las densidades y pesos moleculares de cada muestra de vidrio se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1

Valores de densidad (g/cm^3), peso molecular (g/mol) y volumen molar (cm^3/mol)

Muestra	Densidad	Peso molecular
Tm10Er00	5.62±0.05	143.377
Tm20Er00	5.56±0.06	143.603
Tm00Er03	5.61±0.02	143.217
Tm10Er03	5.58±0.02	143.444

Los valores de las concentraciones de los RE en iones/ cm^3 se presentan en la Tabla 2:

Tabla 2

Concentraciones del Yb^{3+} , Tm^{3+} y Er^{3+} en 10^{20} iones/ cm^3

Muestra	N_0 (Yb^{3+})	N_0 (Tm^{3+})	N_0 (Er^{3+})
Tm10Er00	7.081	0.236	-
Tm20Er00	6.993	0.466	-
Tm00Er03	7.076	-	0.075
Tm10Er03	7.027	0.235	0.070

Los índices de refracción obtenidos se presentan en la Figura 1 y fueron ajustados a la ecuación 1 y se consiguió un valor de $R^2 > 0.99$. Se obtuvieron los parámetros A (adimensional) y B (nm^2), reportados en la Tabla 3. Los valores de índice de

refracción obtenidos fueron altos (>2), lo cual hace a nuestros vidrios en potenciales candidatos para materiales de aplicación en las comunicaciones ópticas por el gran confinamiento de luz que proporcionan.

Figura 1

Medidas de índice de refracción en función de la longitud de onda

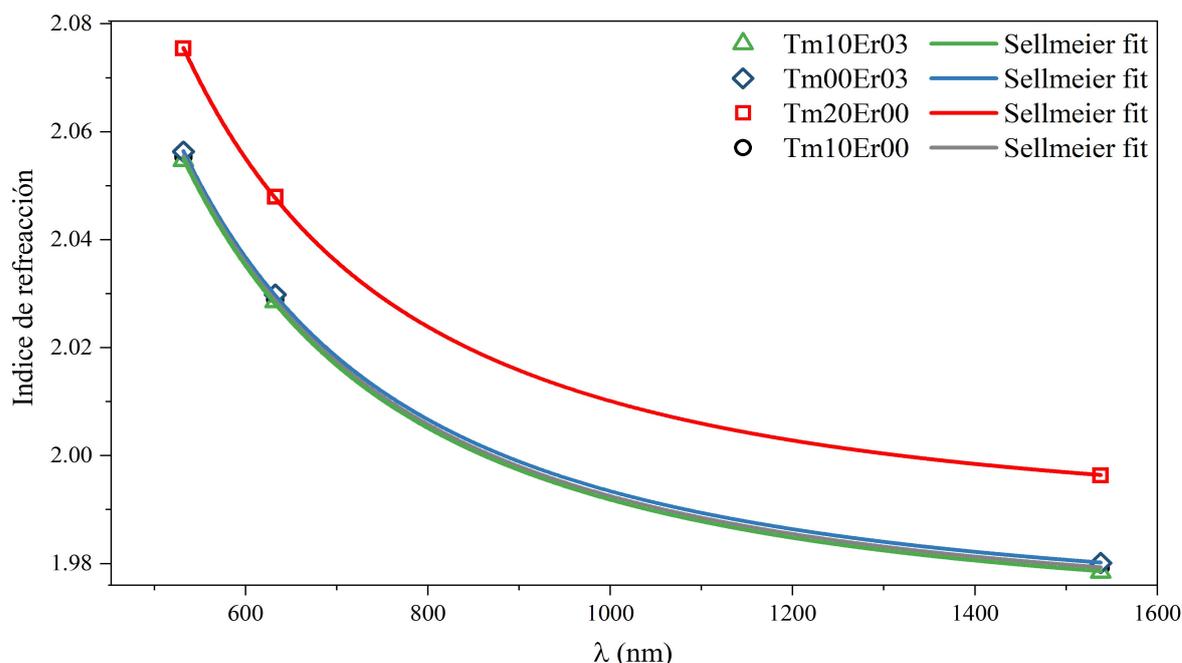


Tabla 3

Valores de índice de refracción y parámetros de Sellmeier A (adimensionales) y B (nm^2)

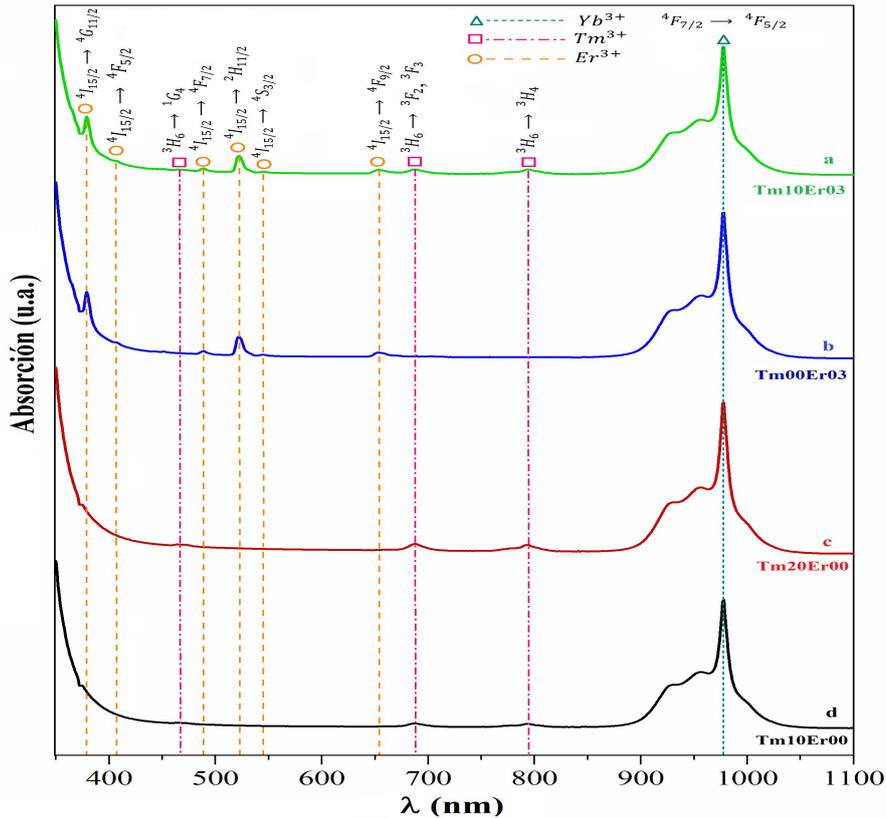
	Tm10Er00	Tm20Er00	Tm00Er03	Tm10Er03
532.0	2.0553	2.1754	2.0563	2.0546
632.8	2.0289	2.0479	2.0298	2.0289
1538	1.9792	1.9963	1.9855	1.9792
A	2.8773	2.9465	2.8837	2.8803
B	30334.1	30916.1	30252.7	30241.1

Las bandas de absorción observadas en el espectro de la Figura 2 son producidas por las transiciones electrónicas desde el estado fundamental a los estados excitados de: Yb³⁺: ⁴F_{7/2} a su nivel excitado ⁴F_{5/2} centrado en 978 nm; del Tm³⁺: ³H₆

a los niveles excitados ¹G₄, ³F₂, ³F₃ y ³H₄ centrados en 464, 683, 689 y 799 nm respectivamente; y del Er³⁺: ⁴I_{15/2} a los niveles excitados ⁴G_{11/2}, ⁴F_{5/2}, ⁴F_{7/2}, ²H_{11/2}, ⁴S_{3/2} y ⁴F_{9/2} centrados en 379, 452, 487, 521, 546 y 653 nm.

Figura 2

Espectros de absorción UV-Vis de a) Tm10Er03, b) Tm00Er03, c) Tm20Er00 y d) Tm10Er00



Para el cálculo de los parámetros de J-O, se debe de considerar las matrices doblemente reducidas correspondientes al Er³⁺ y al Tm³⁺, las cuales fueron tomadas de Carnall et al., 1965 (Carnall et al., 1968) y se presentan en la Tabla 4. El patrón de la elección de las bandas de absorción fue debido a la intensidad de las bandas de absorción, el caso de la banda de Er³⁺ ubicada en 976 nm no se pudo calcular debido a que está superpuesta con la banda del Yb³⁺ centrada en 978 nm, cabe resaltar que esa fue la única banda

identificada del Yb³⁺, por lo cual no fue posible calcular sus parámetros de J-O.

En las Tablas 5 y 6 se presentan los resultados de las fuerzas de oscilador de las transiciones del Er³⁺ y del Tm³⁺, donde se aprecia que los valores más intensos corresponden a las transiciones $^4G_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ y $^3F_3 \rightarrow ^3H_6$, respectivamente. Los errores presentan valores bajos, lo cual indica una buena aproximación entre las fuerzas de oscilador experimental y calculado.

Tabla 4

Intensidades espectrales del Er^{3+} y Tm^{3+} .

$S'LJ'$	Energía (cm^{-1})	$\ U^{(2)}\ ^2$	$\ U^{(4)}\ ^2$	$\ U^{(6)}\ ^2$
Er^{3+}				
$^4F_{9/2}$	15144	0	0.528	0.461
$^4H_{11/2}$	18305	0.0733	0	0.223
$^4F_{7/2}$	19211	0	0.422	0.092
1G_4	20300	0	0.147	0.628
Tm^{3+}				
3H_4	12636	0.230	0.103	0.588
3F_3	14280	0	0.316	0.841
3F_2	14996	0	0	0.261
1G_4	211421	0.001	0.036	0.208

Nota. Adaptado de (Carnall et al., 1968)

Los valores de Ω reflejan las mudanzas de la matriz hospedera donde se encuentran los RE. El parámetro Ω está relacionado con el grado de covalencia de los enlaces entre los RE y la matriz hospedera, además, también está relacionado a la asimetría entorno a los RE. El parámetro Ω está relacionado con el aumento de la intensidad del enlace covalente entre los RE y los iones de O^{2-} , la reducción de este parámetro corresponde al aumento de viscosidad a altas temperaturas y al aumento del factor

de empaquetamiento y el parámetro Ω tiene una relación con la rigidez del material (Silva et al., 2021), es decir, los parámetros Ω y Ω están relacionadas con las propiedades estructurales de largo alcance. El factor de calidad espectroscópica indica la magnitud de la emisión estimulada en un medio laser activo, para el caso del Er^{3+} disminuye cuando el vidrio este codopado (Tabla 5) y en el caso del Tm^{3+} aumenta en función del incremento de la concentración del Tm_2O_3 (Tabla 6).

Tabla 5

Fuerzas del oscilador del Er^{3+} (10^{-6})

λ (nm)	Bandas $^4I_{15/2} \rightarrow$	f_{exp}		f_{cal}	
		Tm00Er03	Tm00Er03	Tm10Er03	Tm10Er03
653	$^4F_{9/2}$	4.0911	4.0779	2.7359	2.7228
522	$^4H_{11/2}$	16.027	17.618	16.007	17.589
489	$^2F_{7/2}$	2.6272	2.6491	2.8944	2.9161
379	$^4G_{11/2}$	34.109	34.112	34.088	32.159
$\delta_{\text{rms}} (\times 10^{-6})$:		0.4126		0.4293	

Tabla 6

Fuerzas del oscilador del Tm^{3+} (10^{-6})

λ (nm)	Bandas $^4I_{15/2} \rightarrow$	f_{exp}		f_{cal}		f_{exp}		f_{cal}	
		Tm10Er00	Tm10Er00	Tm10Er03	Tm10Er03	Tm20Er00	Tm20Er00	Tm20Er00	Tm20Er00
799	3H_4	1.2063	1.2066	1.4283	1.4279	0.8598	0.8661	0.8598	0.8661
689	3F_3	1.2259	1.2366	1.6824	1.6618	0.8443	0.8861	0.8443	0.8861
683	3F_2	0.0266	0.0724	0.4685	0.3852	0.0145	0.1841	0.0145	0.1841
464	1G_4	0.4233	0.2661	0.2559	0.8598	0.8598	0.2763	0.8598	0.2763
$\delta_{\text{rms}} (\times 10^{-6})$:		0.1641		0.2987		0.6091		0.6091	

Los resultados obtenidos del análisis J-O se presentan en la Tabla 7 e indican altos valores del parámetro Ω_2 ($>1.510^{20} \text{ cm}^2$) para el Er^{3+} , lo que indica que los formadores de la red del vidrio y los iones de Er^{3+} tienen una buena covalencia, también se observa el aumento de Tm00Er03 a Tm10Er03, lo cual indica una variación de la simetría alrededor del

ion Er^{3+} debido a la adición del Tm^{3+} . El parámetro Ω_6 repite la misma tendencia que Ω_2 , lo cual indica un aumento de la rigidez de los materiales estudiados con la adición de los iones de Er^{3+} y Tm^{3+} . Por otro lado, se ve la disminución de Ω_4 con el aumento del Tm^{3+} , lo que indica la disminución de la covalencia entre O^{2-} y los iones de Er^{3+} .

Tabla 7

Parámetros de J-O del Er^{3+} y Tm^{3+} (10^{20} cm^2). Los valores de δ_{rms} están en (10^{-20} cm^2)

	Ω_2	Ω_4	Ω_6	Ω_4/Ω_6	δ_{rms}
Er^{3+}					
Tm00Er03	6.981	3.007	0.728	4.131	0.752
Tm10Er03	7.876	1.329	1.266	1.051	0.749
Tm^{3+}					
Tm10Er00	1.617	1.301	1.081	1.205	0.045
Tm10Er03	1.191	0.606	0.575	1.053	0.082
Tm20Er00	0.869	0.401	0.271	1.485	0.164

En la Tabla 7 también se muestran los valores de los parámetros de J-O para el Tm^{3+} , donde se reportó la disminución del parámetro Ω_2 con la adicción de Er^{3+} y de Tm^{3+} , lo cual indica la disminución de la covalencia entre los RE con la matriz hospedera, entonces los enlaces Te-O podrían ser rotos debido la adición de los RE.

Por otro lado, aumenta la asimetría alrededor del Tm^{3+} en función al aumento del dopaje. La misma tendencia se repite con el parámetro Ω_4 , lo que significa la disminución de la covalencia entre los iones de Tm^{3+} y los O^{2-} , caso similar al de los iones de Er^{3+} , lo que conlleva al aumento de los oxígenos no enlazados (NBO, del inglés non-bridging oxygens) en la matriz hospedera, y Ω_6 está relacionado con la rigidez del vidrio, la cual disminuye con la adición de Er^{3+} a la matriz, y con el incremento del porcentaje de Tm^{3+} .

Conclusiones

Los resultados del índice de refracción presentaron valores altos (>2.0), lo que hace a nuestros vidrios excelentes candidatos para las comunicaciones ópticas debido a que proporcionan un gran confinamiento de luz.

Se puede apreciar también que los valores del índice de refracción disminuyen conforme aumenta la longitud de onda y también varían con las variaciones del dopaje, esto debido a que las concentraciones de iones de Yb^{3+} , Er^{3+} y Tm^{3+} modifican la estructura de la matriz hospedera reordenando los átomos. Los parámetros de J-O están relacionados con la asimetría, estructura y covalencia, como es el caso del parámetro Ω_2 cuyo incremento representa una variación de la simetría y de la covalencia entre la matriz

hospedera y los iones de RE, mientras que los parámetros Ω_4 está relacionado con la covalencia entre los RE y los O^{2-} la cual disminuye al aumentar cantidad de dopaje de RE, generando así la ruptura de los enlaces Te-O que forman la red vítrea, formando así NBO, los cuales tienden a aumentar el valor de la polarizabilidad y del índice de refracción. Los parámetros de J-O obtenidos siguen la tendencia $\Omega_2 > \Omega_4 > \Omega_6$ reportada para los sistemas vítreos de telurito en la literatura.

Los resultados presentados son coherentes con los reportados anteriormente por Chacaliaza et al., 2021 (Chacaliaza Ricaldi et al., 2023), donde los valores de las energías de Urbach muestran un aumento del desorden de la estructura con respecto a la cantidad de concentración del dopaje de RE, lo cual indica una menor eficiencia de empaquetamiento cuando aumenta la concentración de RE alterando la matriz vítrea, lo cual indicaría el aumento del desorden estructural.

Referencias

- Carnall, W. T., Fields, P. R., and Rajnak, K. (1968). Electronic Energy Levels in the Trivalent Lanthanide Aquo Ions. I. Pr^{3+} , Nd^{3+} , Pm^{3+} , Sm^{3+} , Dy^{3+} , Ho^{3+} , Er^{3+} , and Tm^{3+} . *The Journal of Chemical Physics*, 49(10), 4424. <https://doi.org/10.1063/1.1669893>
- Chacaliaza Ricaldi, J., Lozano, G., Clabel H., J. L., Ferri, F. A., Rodrigues, A. D., Messaddeq, Y., Rivera, V. A. G., and Marega Jr., E. (2023). Influence of Pr^{3+} Ions On the Structural Properties of Er^{3+} -Doped Tellurite-Tungsten Glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 616.
- Dousti, M. R., Amjad, R. J., Sahar, M. R., Zabidi, Z. M., Alias, A. N., and de Camargo, A. S. S. (2015). Er^{3+} -doped zinc tellurite glasses revisited: Concentration dependent chemical durability, thermal stability and spectroscopic properties. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 429, 70–78. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2015.07.039>
- El-Mallawany, R. (2018). Some physical properties of tellurite glasses. *Tellurite*
- Glass Smart Materials: Applications in Optics and Beyond*, 1–16. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76568-6_1
- Ghosh, G. (1997). Sellmeier coefficients and dispersion of thermo-optic coefficients for some optical glasses. *Applied Optics*, 36(7), 1540. <https://doi.org/10.1364/AO.36.001540>
- Jha, A., Richards, B., Jose, G., Teddy-Fernandez, T., Joshi, P., Jiang, X., and Lousteau, J. (2012). Rare-earth ion doped TeO_2 and GeO_2 glasses as laser materials. *Progress in Materials Science*, 57(8), 1426–1491. <https://doi.org/10.1016/j.PMATSCI.2012.04.003>
- Kaur, A., Khanna, A., Pesquera, C., González, F., and Sathe, V. (2010). Preparation and characterization of lead and zinc tellurite glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 356(18–19), 864–872. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2010.01.005>
- Maoui, J., Lataoui, J., Gammoudi, H., Mghaieth, R., and Jaba, N. (2021). Spectral broadening of 1.0 μm

- emission in Nd³⁺/Pr³⁺-co-doped and Er³⁺/Nd³⁺/Pr³⁺ tri-doped zinc tellurite glass. *Optical Materials*, 117, 111140. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111140>
- Mauro, J. C., and Zanotto, E. D. (2014). Two Centuries of Glass Research: Historical Trends, Current Status, and Grand Challenges for the Future. *International Journal of Applied Glass Science*, 5(3), 313–327. <https://doi.org/10.1111/ijag.12087>
- Mavračić, J., Mocanu, F. C., Deringer, V. L., Csányi, G., and Elliott, S. R. (2018). Similarity between Amorphous and Crystalline Phases: The Case of TiO₂. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 9(11), 2985–2990. https://doi.org/10.1021/ACS.JPCLETT.8B01067/SUPPL_FILE/JZ8B01067_SI_001.PDF
- Nazrin, S. N., Halimah, M. K., Muhammad, F. D., Latif, A. A., Iskandar, S. M., and Asyikin, A. S. (2021). Experimental and theoretical models of elastic properties of erbium-doped zinc tellurite glass system for potential fiber optic application. *Materials Chemistry and Physics*, 259, 123992. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123992>
- Ojovan, M. I., and Lee, W. E. (2010). Connectivity and glass transition in disordered oxide systems. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 356(44–49), 2534–2540. <https://doi.org/10.1016/J.JNONCRY SOL.2010.05.012>
- Rivera, V. A. G., and Barbosa, L. C. (2014). Spectroscopic properties of Er³⁺-doped sodium-modified tellurite glasses for use as optical amplifiers at 1540 nm. *Journal of Luminescence*, 156, 116–123. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2014.07.023>
- Rivera, V. A. G., and Manzani, D. (2017). *Technological Advances in Tellurite Glasses* (V. A. G. Rivera and D. Manzani, Eds.; Vol. 254). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-53038-3>
- Silva, O. B., Rivera, V. A. G., Ledemi, Y., Messaddeq, Y., and Marega, E. (2021). Germanium concentration effects on the visible emission properties of Er³⁺ in tellurite glasses. *Journal of Luminescence*, 232, 117808. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2020.117808>
- Tabanlı, S., and Eryurek, G. (2019). Optical investigation of Er³⁺ and Er³⁺/Yb³⁺-doped zinc-tellurite glass for solid-state lighting and optical thermometry. *Sensors and Actuators A: Physical*, 285, 448–455. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.11.043>
- Yamane, M., and Asahara, Y. (2017). *Technological Advances in Tellurite Glasses* (V. A. G. Rivera and D. Manzani, Eds.; Vol. 254). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-53038-3>
- Zanotto, E. D., and Mauro, J. C. (2017). The glassy state of matter: Its definition and ultimate fate. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 471, 490–495. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2017.05.019>