



Artículo de investigación

Síntesis y caracterización de las aleaciones cuaternarias CuTaAlSe₃ y CuTaGaSe₃

Synthesis and characterization of quaternary alloys CuTaAlSe₃ and CuTaGaSe₃

Marcos Antonio Muñoz Pinto^a, Sonia del Valle Durán Piña^a
Pedro José Grima-Gallardo^b, Gerzon Eusebio Delgado Arciniegas^b

^aUniversidad Centroccidental Lisandro Alvarado, Barquisimeto, Venezuela.

^bUniversidad de los Andes, Mérida, Venezuela.

DOI: <http://doi.org/10.13140/RG.2.2.21301.83684>

Recibido: 05-01-2019

Aceptado: 20-03-2019

Resumen

Los lingotes de CuTaAlSe₃ y CuTaGaSe₃ se sintetizaron usando la técnica de fusión y recocido. Se usaron técnicas de difracción de Rayos X (DRX) y Análisis Térmico Diferencial (ATD) para la caracterización de las aleaciones. El análisis del patrón de difracción indica que ambas muestras están compuestas por dos fases: la fase promedio indexada como una estructura hexagonal y la fase secundaria indexada como una estructura tetragonal de tipo calcopirita. De la forma de los picos del ATD para las aleaciones CuTaAlSe₃ y CuTaGaSe₃ se deduce que la fusión es incongruente para ambos materiales de valor $\sim 1348\text{K}$ y $\sim 1235\text{K}$, respectivamente.

Palabras clave: Aleaciones; difracción de rayos x; análisis térmico diferencial.

Código UNESCO: 2211.01 - Física del estado sólido. Aleaciones.

Abstract

The ingots of CuTaAlSe₃ and CuTaGaSe₃ were synthesized using the melt and annealing technique. X-Ray Diffraction (XRD) and Differential Thermal Analysis (DTA) techniques were used for characterization of the alloy. The analysis of the diffraction pattern indicates that both samples are composed of two phases; the mean phase indexes as a hexagonal structure, whereas the second phase indexes as a tetragonal chalcopirite-like structure. From the shape of the DTA peaks for the CuTaAlSe₃ and CuTaGaSe₃ alloys, was deduced that the melting is incongruent for both materials, the value of $\sim 1348\text{K}$ and $\sim 1235\text{K}$, respectively.

Keywords: Alloys; x-ray diffraction; differential thermal analysis.

UNESCO Code: 2211.01 - Solid state physics. Alloys.

1. Introducción

Los calcogenuros de tantalio con estructuras de baja dimensión, frecuentemente muestran interesantes propiedades físicas tales como la superconductividad y la transición de metal-aislante. Por lo tanto, sus propiedades y su estructura química, tienen un interés considerable [1]. El estudio de los semiconductores magnéticos diluidos de base calcopirita (ChDMSs), es una continuación de la investigación sobre semiconductores magnéticos diluidos binarios, II-VI y III-V (DMSs) [2-11]. Trabajos recientes en ChDMSs, han reportado ferromagnetismo a temperatura ambiente y una alta solubilidad del átomo de metal, indicando un promisorio campo de investigación [12-22].

En trabajos anteriores, se ha reportado la preparación y caracterización de algunas aleaciones de ChDMSs: $(Cu-III-Se_2)_{1-x}(FeSe)_x$; (III: Al, Ga e In) [23,24], $(CuInSe_2)_{1-x}(CoSe)_x$ [25], $(I-InSe_2)_{1-x}(VSe)_x$ (I: Cu y Ag) [26,27], que conforman una investigación sistemática de la familia de aleaciones $(A^I B^{III} X^{VI})_{1-x}(MT-X^{VI})_x$, donde MT es un átomo de metal de transición.

En este trabajo se prepararon y caracterizaron las aleaciones cuaternarias CuTaAlSe₃ y CuTaGaSe₃, que pertenecen a la familia de aleaciones $(Cu-III-Se_2)_{1-x}(TaSe)_x$; (III: Al, Ga), con $x = 0.5$, o las aleaciones cuaternarias $(CuTaAl)_2Se_6$ y $(CuTaGa)_2Se_6$ con $x = 1/3$ en la nomenclatura alternativa $(Cu-III-Se_2)_{1-x} 2(TaSe)_x$; (III: Al, Ga).

2. Procedimiento experimental

Mediante la técnica usual de fusión y recocido, se preparó un lingote de cada una de las aleaciones cuaternarias CuTaAlSe₃ y CuTaGaSe₃ de aproximadamente 1g, partiendo de los elementos constituyentes (Cu, Ta, Al, Ga y Se), de una pureza nominal de (al menos) 99.99% en peso; depositándose en cantidades estequiométricas previamente pesadas, en una cápsula de cuarzo con sus paredes internas previamente carbonizadas (pirólisis), para evitar así la reacción química de los elementos constituyentes con el cuarzo, se sellaron al vacío y se introdujeron en un horno vertical. En el ciclo de fusión aumentamos la temperatura desde el ambiente hasta los 1500K a una velocidad de 20K/h, con una parada de 48h en aproximadamente 958K (temperatura de fusión del Se). La cápsula se agitó, usando un sistema mecánico durante todo el proceso de calentamiento para garantizar la mezcla completa de todos los elementos, se sigue con el calentamiento con la misma velocidad hasta alcanzar los 1500K donde se mantiene por 72h, luego en el ciclo de enfriamiento, se disminuye la temperatura a una velocidad de 10K/h hasta los 850K, manteniendo esta temperatura durante un mes, finalmente se enfría a temperatura ambiente. La experiencia previa indica, que este procedimiento generalmente proporciona materiales que muestran buenas condiciones de equilibrio térmico.

Los datos de difracción de rayos X, se recolectaron por medio de un difractómetro (Siemens D5005) equipado con un monocromador de grafito ($CuK\alpha$, $\lambda=1.54059 \text{ \AA}$) a 40 kV y 30 mA. Se utilizó una rendija fija y una rendija de divergencia de 1mm, un monocromador de 1 mm de hendidura y un detector de 0,1 mm de abertura. Se le hizo a la muestra un barrido y registro de los máximos en el intervalo angular de 10° hasta 100° en 2θ , utilizando un tamaño de paso de 0.02° y un tiempo de conteo de 40s por paso.

El análisis térmico diferencial (ATD) se llevó a cabo en un aparato Perkin-Elmer totalmente automático con termopares Pt/Pt-Rh. Se usa el elemento oro (Au), como muestra de referencia estándar. Las velocidades de calentamiento y enfriamiento se controlaron a 20 K/h. La temperatura de transición se obtuvo manualmente del gráfico ΔT vs T con el criterio que la transición se produce en la intersección de la línea de base con la pendiente del pico de transición térmica. El error máximo cometido en la determinación de las temperaturas de transición por este método se estimó en $\pm 10K$.

Es rutina en nuestro laboratorio, comprobar la estequiometría de toda la muestra en varias partes externas del lingote. Los valores experimentales, en promedio, están muy cerca de los valores nominales, todos se encuentran dentro del intervalo del error experimental ($\pm 5\%$).

3. Resultados

3.1 Mediciones de Difracción de Rayos X (DRX)

En las **Figura 1** y **Figura 2**, se muestran los patrones de difracción del CuTaAlSe₃ y el CuTaGaSe₃, junto con sus ternarios CuAlSe₂ y CuGaSe₂, respectivamente. Dos fases se identificaron claramente para ambas aleaciones. La fase media se indexó como una estructura hexagonal y la otra se indexó como una estructura tetragonal de tipo calcopirita. En las **Figura 1** y **Figura 2** se indican con una línea punteada los índices de Miller (hkl), correspondientes al compuesto ternario, presentes en las aleaciones cuaternarias como segunda fase. La indexación se realizó utilizando el programa DICVOL06 [28] y los resultados se presentan en los **Cuadro 1**, **Cuadro 2**, **Cuadro 3** y **Cuadro 4**.

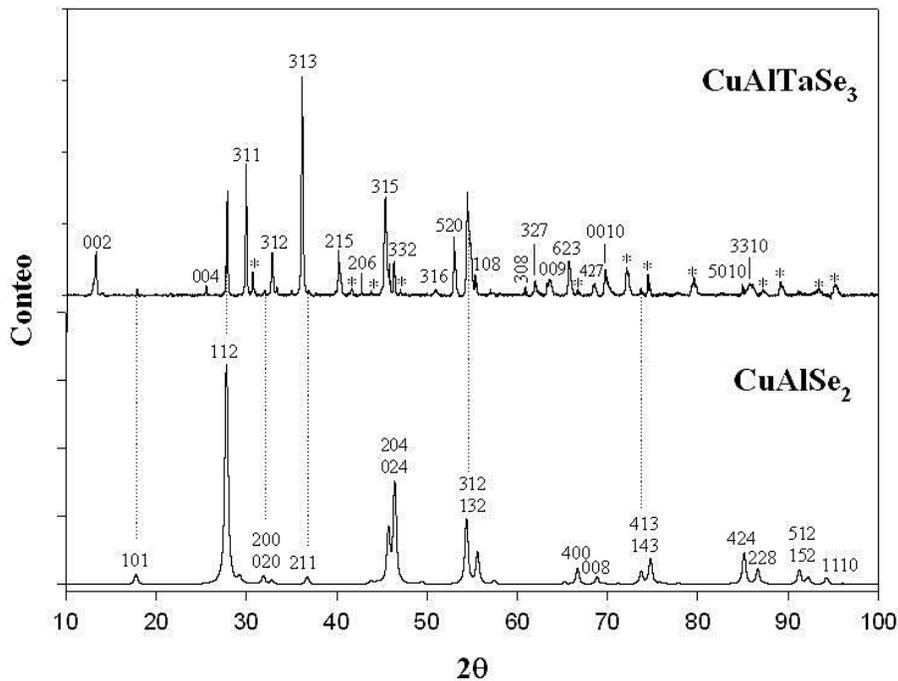


Figura 1. Patrón de difracción de la aleación CuTaAlSe₃ junto con su ternario CuAlSe₂. Los índices de Miller (hkl) usados, son mostrados en la gráfica. Picos adicionales están denotados con asteriscos.

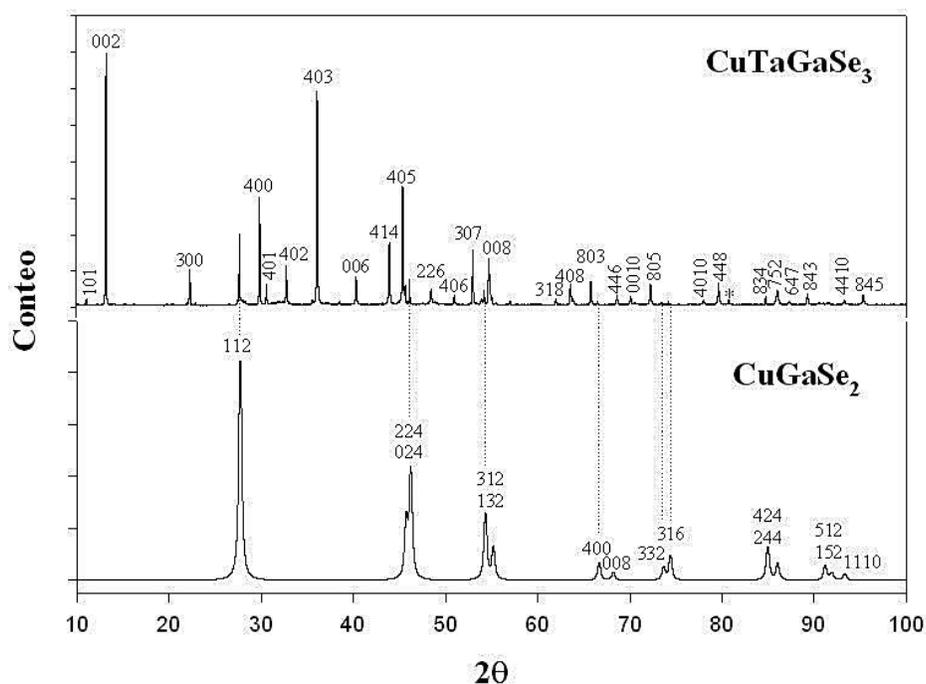


Figura 2. Patrón de difracción de la aleación $CuTaGaSe_3$ junto con su ternario $CuGaSe_2$. Los índices de Miller (hkl) usados, son mostrados en la gráfica. Picos adicionales están denotados con asteriscos.

Cuadro 1. Datos de difracción de rayos-X de la fase secundaria del $CuTaAlSe_3$.

Sistema tetragonal: $a = (5.601 \pm 0.001)\text{Å}$; $c = (10.967 \pm 0.001)\text{Å}$; $V = 344.08 \text{Å}^3$

h k l	$d_{\text{obs}} (\text{Å})$	$d_{\text{cal}} (\text{Å})$	$(I/I_0)_{\text{obs}}$	$2\theta_{\text{obs}} (^\circ)$	$2\theta_{\text{cal}} (^\circ)$	$\Delta 2\theta$
1 0 1	4.98954	4.98728	8.7	17.762	17.770	-0.008
1 1 2	3.21095	3.21032	51.7	27.761	27.767	-0.006
1 0 3	3.06062	3.06097	9.0	29.154	29.151	0.003
2 0 0	2.80263	2.80031	10.8	31.906	31.933	-0.027
2 1 1	2.43998	2.44183	11.2	36.806	36.777	0.029
3 1 2	1.68465	1.68541	54.6	54.419	54.392	0.027
4 1 3	1.27363	1.27336	21.3	74.430	74.448	-0.018

FIGURAS DE MERITO:

1.- $M(7) = 24.3$ 2.- $F(7) = 5.3(0.0168, 78)$

Cuadro 2. Datos de difracción de rayos-X de la fase media del CuTaAlSe₃.

Sistema Hexagonal: $a = (12.469 \pm 0.001)\text{Å}$; $c = (13.449 \pm 0.001)\text{Å}$; $V = 1811.01 \text{ Å}^3$

h k l	$d_{\text{obs}} (\text{Å})$	$d_{\text{cal}} (\text{Å})$	$(I/I_0)_{\text{obs}}$	$2\theta_{\text{obs}} (^\circ)$	$2\theta_{\text{cal}} (^\circ)$	$\Delta 2\theta$
0 0 2	6.7039	6.7025	9.9	13.1960	13.1990	-0.0030
0 0 3	4.4667	4.4734	7.2	19.8610	19.8310	0.0300
1 0 3	4.1360	4.1322	7.5	21.4670	21.4870	-0.0200
0 0 4	3.3541	3.3570	8.7	26.5540	26.5310	0.0230
3 1 0	2.9901	2.9910	62.4	29.8570	29.8480	0.0090
3 1 1	2.9195	2.9196	18.1	30.5970	30.5960	0.0010
3 1 2	2.7327	2.7326	26.4	32.7450	32.7470	-0.0020
3 1 3	2.4878	2.4876	100.0	36.0740	36.0760	-0.0020
2 1 5	2.2441	2.2437	28.5	40.1500	40.1570	-0.0070
2 0 6	2.0689	2.0684	12.2	43.7190	43.7300	-0.0110
3 1 5	2.0009	1.9995	51.3	45.2840	45.3180	-0.0340
3 3 2	1.9836	1.9839	22.5	45.7010	45.6940	0.0070
3 1 6	1.7934	1.7933	13.2	50.8740	50.8790	-0.0050
5 2 0	1.7279	1.7280	35.6	52.9480	52.9460	0.0020
1 0 8	1.6610	1.6600	20.2	55.2600	55.2960	-0.0360
3 0 8	1.5219	1.5223	15.1	60.8140	60.7970	0.0170
3 2 7	1.5173	1.5174	12.4	61.0200	61.0160	0.0040
0 0 9	1.4935	1.4935	15.6	62.1000	62.0990	0.0010
6 2 3	1.4204	1.4197	26.1	65.6800	65.7220	-0.0420
4 2 7	1.3986	1.3982	13.3	66.8400	66.8620	-0.0220
0 0 10	1.3443	1.3442	20.3	69.9200	69.9240	-0.0040
5 0 10	1.1410	1.1413	17.2	84.9280	84.9020	0.0260
3 3 10	1.1288	1.1287	17.5	86.0620	86.0720	-0.0100

FIGURAS DE MERITO:

1.- $M(25) = 10.1$ 2.- $F(25) = 5.7(0.0140, 313)$

Cuadro 3. Datos de difracción de rayos-X de la fase media del CuTaGaSe₃.

Sistema Hexagonal: $a = (13.824 \pm 0.001)\text{Å}$; $c = (13.419 \pm 0.001)\text{Å}$; $V = 2220.92 \text{ Å}^3$

h k l	d_{obs} (Å)	d_{cal} (Å)	(I/I_o)_{obs}	2θ_{obs} (Å)	2θ_{cal} (°)	Δ2θ
1 0 1	8.92958	8.89812	1.3	9.897	9.932	-0.035
0 0 2	6.68679	6.68953	100.0	13.230	13.225	0.005
3 0 0	3.98056	3.98377	14.4	22.316	22.298	0.018
4 0 0	2.98847	2.98919	43.4	29.874	29.867	0.007
4 0 1	2.91725	2.91759	7.8	30.621	30.617	0.004
4 0 2	2.73011	2.73021	15.7	32.777	32.776	0.001
4 0 3	2.48513	2.48490	88.8	36.114	36.118	-0.004
0 0 6	2.23411	2.23438	11.6	40.338	40.333	0.005
4 1 4	2.05882	2.05947	25.3	43.943	43.928	0.015
4 0 5	1.99662	1.99650	49.7	45.387	45.390	-0.003
4 0 3	1.96606	1.96663	10.0	46.133	46.119	0.014
2 2 6	1.87654	1.87620	6.0	48.471	48.480	-0.009
4 0 6	1.79012	1.79027	3.5	50.974	50.969	0.005
3 0 7	1.72669	1.72677	23.1	52.989	52.987	0.002
4 1 6	1.69839	1.69783	3.2	53.943	53.962	-0.019
0 0 8	1.67624	1.67624	19.2	54.715	54.715	0.000
4 4 2	1.67226	1.67232	10.5	54.856	54.854	0.002
4 0 7	1.61357	1.61325	1.1	57.030	57.042	-0.012
5 0 7	1.49562	1.49562	2.7	62.000	62.000	0.000
8 0 1	1.48645	1.48646	0.7	62.425	62.425	0.000
4 0 8	1.46241	1.46243	7.5	63.570	63.569	0.001
1 1 9	1.45636	1.45666	2.2	63.865	63.850	0.015
8 0 3	1.41847	1.41845	9.0	65.783	65.784	-0.001
4 4 6	1.36651	1.36673	3.8	68.624	68.612	0.012
0 0 10	1.34124	1.34123	3.1	70.104	70.104	0.000
4 0 9	1.33357	1.33392	0.8	70.567	70.546	0.021
8 0 5	1.30656	1.30644	8.5	72.252	72.260	-0.008
3 1 10	1.24351	1.24359	0.6	76.553	76.547	0.006
4 0 10	1.22410	1.22394	1.6	77.994	78.006	-0.012
4 4 8	1.20307	1.20309	8.8	79.625	79.623	0.002
8 3 4	1.14296	1.14286	3.4	84.745	84.754	-0.009
7 5 2	1.12959	1.12992	5.7	85.989	85.958	0.031
6 4 7	1.11596	1.11599	1.3	87.301	87.298	0.003
8 4 3	1.09640	1.09635	4.6	89.267	89.272	-0.005
4 4 10	1.05965	1.05951	1.8	93.261	93.276	-0.015
8 4 5	1.04213	1.04211	3.9	95.320	95.321	-0.002

FIGURAS DE MERITO:

1.- M(36) = 10.5; 2.- F(36) = 9.0(0.0085, 466)

Cuadro 4. Datos de difracción de rayos-X de la fase secundaria del $CuTaGaSe_3$.

Sistema Tetragonal $a = (5.623 \pm 0.004)\text{Å}$; $c = (11.04 \pm 0.01)\text{Å}$; $V = (349 \pm 1)\text{Å}^3$.

h k l	$d_{obs}(\text{Å})$	$d_{cal}(\text{Å})$	$(I/I_o)_{obs}$	$2\theta_{obs}(\text{°})$	$2\theta_{cal}(\text{°})$	$\Delta 2\theta$
1 1 2	3.21879	3.21802	100.0	27.692	27.699	-0.007
2 2 0	1.98532	1.98514	21.1	45.660	45.664	-0.004
3 1 2	1.69031	1.69042	17.2	54.222	54.218	0.004
4 0 0	1.40432	1.40442	4.4	66.531	66.526	0.005
3 3 2	1.28770	1.28763	3.6	73.482	73.487	-0.005
3 1 6	1.27702	1.27741	4.7	74.199	74.173	0.026

FIGURAS DE MERITO:

1.- $M(6) = 36.1$; 2.- $F(6) = 8.9(0.0085, 79)$

3.2 Análisis Térmico Diferencia (ATD)

En las **Figura 3** y **Figura 4**, se muestran las gráficas de ATD de los ciclos de calentamiento y enfriamiento del $CuAlSe_2$ y el $CuTaAlSe_3$, respectivamente. En la **Figura 5**, se muestra un acercamiento en el rango de temperaturas desde 1150K a 1200K del ATD de la aleación cuaternaria, esto es con la finalidad de apreciar con mayor claridad las transiciones en ese rango de temperatura.

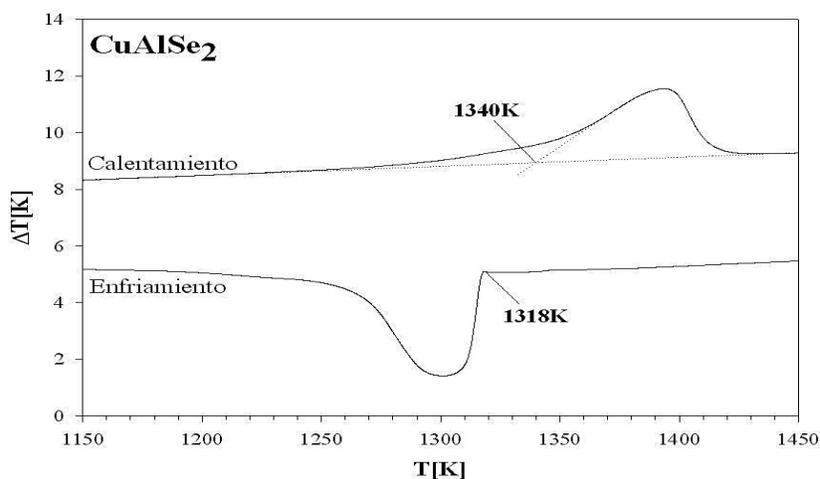


Figura 3. Ciclo de calentamiento y enfriamiento de ATD para el ternario $CuAlSe_2$.

En las **Figura 6** y **Figura 7** se muestran las gráficas de ATD de los ciclos de calentamiento y enfriamiento del $CuGaSe_2$ y $CuTaGaSe_3$, respectivamente. En la **Figura 8** se muestra un acercamiento en el rango de temperatura desde 900K a 1040K del ATD de la aleación cuaternaria. Al igual que en la **Figura 5**, este acercamiento es para observar mejor las transiciones termodinámicas en ese rango de temperatura.

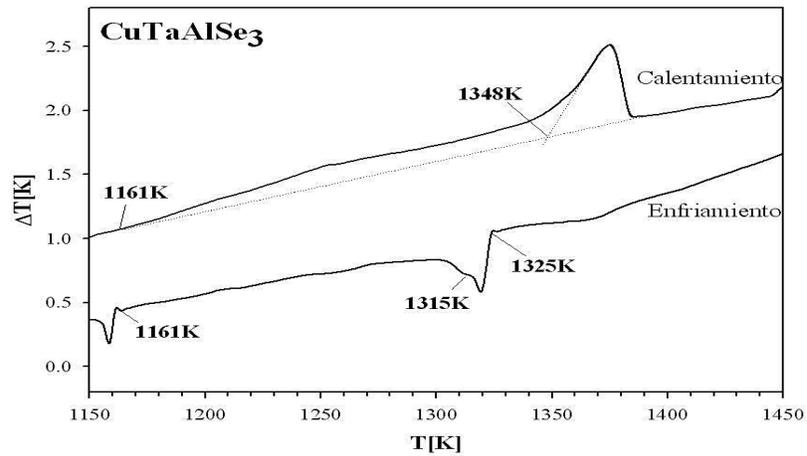


Figura 4. Ciclo de calentamiento y enfriamiento de ATD para la aleación cuaternaria CuAlTaSe_3 .

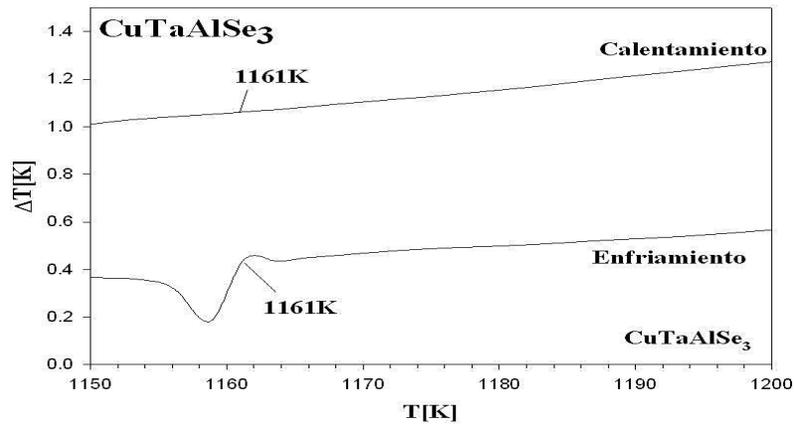


Figura 5. Acercamiento en el rango de temperatura desde 1150K a 1200K del ATD de la aleación cuaternaria CuAlTaSe_3 .

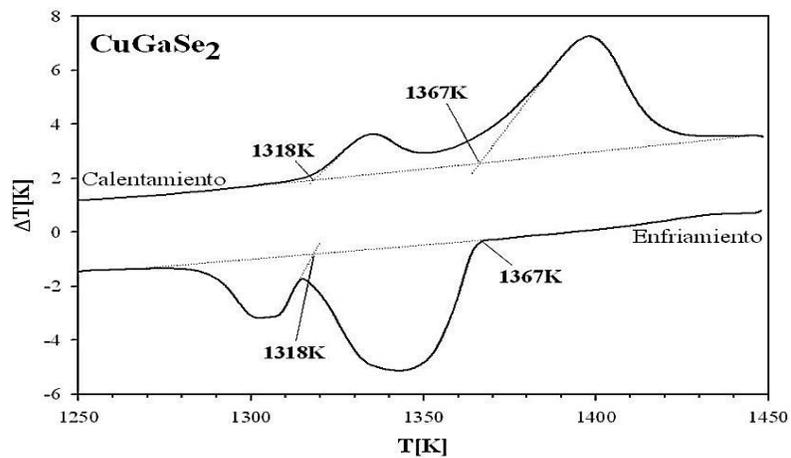


Figura 6. Ciclo de calentamiento y enfriamiento de ATD para el ternario CuGaSe_2 .

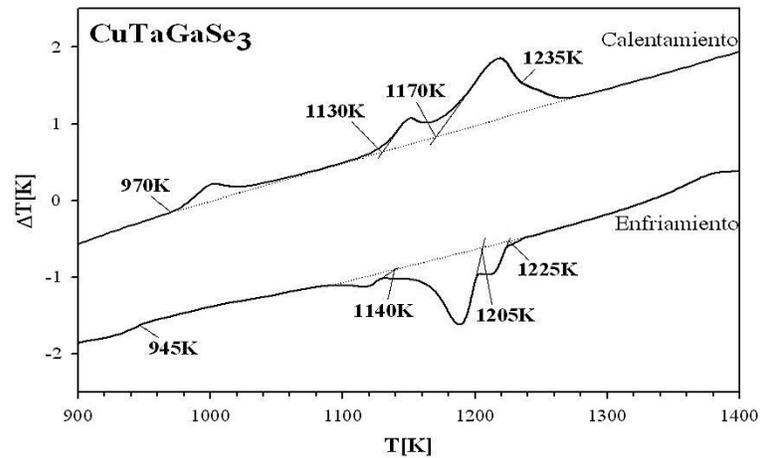


Figura 7. Ciclo de calentamiento y enfriamiento de ATD para la aleación cuaternaria $CuTaGaSe_3$.

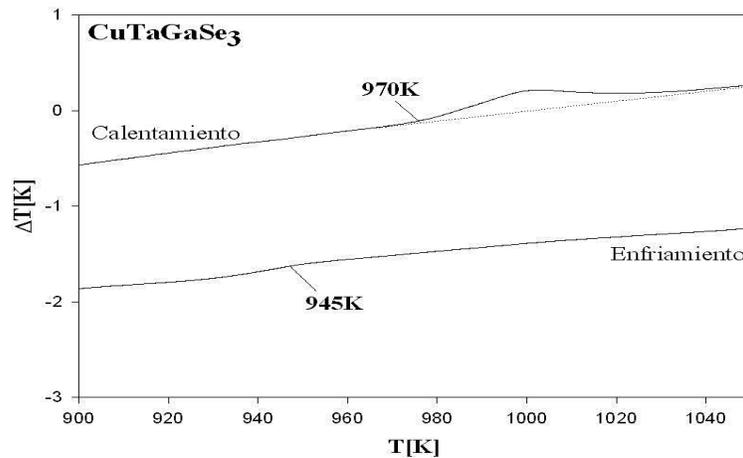


Figura 8. Acercamiento en el rango de temperatura desde 900K a 1040K del ATD de la aleación cuaternaria $CuTaGaSe_3$.

Discusión y conclusiones

Las muestras preparadas de los cuaternarios $CuTaAlSe_3$ y $CuTaGaSe_3$ presentan dos fases, como se puede observar en el patrón de difracción. La nitidez de los picos de difracción denota una buena cristalización de la muestra y un buen equilibrio térmico. Marcamos con asteriscos, algunos picos pequeños que no pudieron ser indexados; creemos que podrían tratarse de algunas impurezas u óxidos. La fase media para ambas aleaciones, se indexó como una estructura hexagonal, con parámetros de celda unidad $a = 12.469(1) \text{ \AA}$; $c = 13.449(1) \text{ \AA}$ y $a = 13.824(1) \text{ \AA}$; $c = 13.419(1) \text{ \AA}$, respectivamente. La fase secundaria se indexa como una estructura tetragonal de tipo calcopirita con parámetro de celda unidad $a = 5.601(1) \text{ \AA}$; $c = 10.967(1) \text{ \AA}$ y $a = 5.623(4) \text{ \AA}$; $c = 11.04(1) \text{ \AA}$, para el $CuTaAlSe_3$ y $CuTaGaSe_3$, respectivamente. Hasta la fecha, para la estructura hexagonal que se indexó, no hemos encontrado en la literatura reportes de alguna fase similar. Los parámetros de la celda unidad obtenidos para la estructura tipo calcopirita, están muy cercanos a sus correspondientes

ternarios. Sería conveniente realizarles un refinamiento Rietveld a cada aleación con el fin de determinar el grupo espacial de estas nuevas fases. Este trabajo está en progreso.

Las pequeñas áreas debajo de la curva para las transiciones térmicas, mostradas en las gráficas de ATD (ver **Figura 4** y **Figura 7**) del CuTaAlSe₃ y el CuTaGaSe₃ en comparación con sus ternarios, indica que estas aleaciones cuaternarias son menos estables que sus correspondientes compuestos ternarios. El mismo comportamiento se observó anteriormente para otras aleaciones cuaternarias como el CuFeInSe₃, CuFeAlSe₃, CuFeGaSe₃, CuCoInSe₃, CuVInSe₃ y AgVInSe₃ [23-27]. Los puntos de fusión del CuTaAlSe₃ y el CuTaGaSe₃ son incongruentes y para el CuTaGaSe₃ su valor se reduce aproximadamente ~ 10% con respecto al del CuGaSe₂; mientras que para el CuTaAlSe₃ el punto de fusión aumenta ~ 0.6% del valor del ternario.

El valor de la temperatura de transición orden-desorden, se redujo ~ 20% para el CuTaGaSe₃, mientras que para el CuTaAlSe₃, suponemos que dicha transición ocurre a 1161K (ver **Figura 4** y **Figura 5**), pero no podemos asegurar que se trate de la transición orden-desorden ya que para el ternario CuAlSe₂ no existe en la literatura un valor reportado. Como puede observarse en la para el CuAlSe₂ no existe la transición orden-desorden, como ocurre en el ternario CuGaSe₂ (ver **Figura 6**).

La preparación y caracterización de las familias de aleaciones (Cu-III-Se₂)_{1-x}(TaSe)_x; (III: Al, Ga), con composiciones en el intervalo de 0 ≤ x ≤ 0.5 están en curso para tratar de obtener para cada familia, el diagrama de fases correspondiente, esto quedará para publicaciones futuras.

Referencias

- [1] J. H. Zhang; F. Chen; J. Li; Ch. J. O'Connor. Magnetic property of layered compound NbFeTe₂. J. Appl. Phys., 81: 5283-5285, 1997.
- [2] K. C. Hass; H. Ehrenreich. Electronic and magnetic properties of II-VI diluted magnetic semiconductors. Journal of Crystal Growth, 86: 8-14, 1990.
- [3] A. Twardowski; H. J. M. Swagten; W. J. M. de Jonge; M. Demianiuk. Magnetic behavior of the diluted magnetic semiconductor Zn_{1-x}MnxSe. Phys. Rev., B36: 7013-7023, 1987.
- [4] P. M. Shand; A. Lewicki; I. Miotkowski; B.C. Crooker; J.K. Furdyna. Spin freezing in cobalt-based diluted magnetic semiconductors. Phys. Rev., B44: 6152-6157, 1991.
- [5] A. Lewicki; A.I. Schindler; P.M. Shand; B.C. Crooker; J. K. Furdyna. Magnetic susceptibility of diluted magnetic semiconductor alloys Cd_{1-x}CoxS in the temperature range 40mK ≤ T ≤ 400K. Phys. Rev., B44: 6137-6140, 1991.
- [6] P. Grima-Gallardo; M. Muñoz; S. Durán; G.E. Delgado; M. Quintero; J.Ruiz. Preparation and investigation of the quaternary alloy CuTaInSe₃. Materials Research Bulletin, 42(12): 2067-2071, 2007.
- [7] P. Grima-Gallardo; S. Durán; M. Muñoz; M. Quintero; G.E. Delgado; J.M. Briceño; H. Romero; V. Briceño; J. Ruiz; J. Fernández. X-ray diffraction of (CuInTe₂)_{1-x}(TaTe)_x alloy system (0 ≤ x ≤ 1). Revista Mexicana de Física, S53(7): 256-258, 2007.
- [8] P. Grima-Gallardo; M. Muñoz; S. Durán; M. Quintero; G.E. Delgado; J.M. Briceño; H. Romero; J. Ruiz; J. Fernández. Preparation and investigation of (CuInSe₂)_{1-x}(TaSe)_x solid solutions (0 ≤ x ≤ 0.5). Revista Mexicana de Física, S53(7): 259-261, 2007.
- [9] G. E. Delgado; A.J. Mora; P. Grima-Gallardo; S. Durán; M. Muñoz; M. Quintero. Crystal structure of the quaternary alloy CuTaInSe₃. Crystal Research and Technology, 43(7): 783-785, 2008.
- [10] P. Grima-Gallardo; M. Muñoz; S. Durán; M. Quintero; E. Quintero; M. Morocoima; E. Calderón; G.E. Delgado; H. Romero. Synthesis and characterization of Cu₃TaIn₃Te₇ and CuTa₂InTe₄. Phys. Stat. Sol. (a), 205(7): 1552-1559, 2008.
- [11] G. E. Delgado; A.J. Mora; P. Grima-Gallardo; M. Muñoz; S. Durán; M. Quintero. Crystal structure of the quaternary compound CuTa₂InTe₄ from X-ray powder diffraction. Physica B: Condensed Matter., 403(18): 3228-3230, 2008.

- [12] G. A. Medvedkin; T. Ishibashi; T. Nishi; K. Hayata; Y. Hasegawa; K. Sato. Room Temperature Ferromagnetism in Novel Diluted Magnetic Semiconductor Cd_{1-x}Mn_xGeP₂. J. Appl. Phys., 39: L949-L951, 2000.
- [13] G.A. Medvedkin; T. Ishibashi; K. Sato. New magnetic materials in ZnGeP₂-Mn chalcopyrite system. J. Cryst. Growth, 236: 609-612, 2002.
- [14] R. Tovar; M. Quintero; Ch. Neal; J. C. Woolley. Phase diagram of Zn_{2x}(CuIn)_yMn_{2z}Te₂ alloys. J. Cryst. Growth, 106: 629-634, 1990.
- [15] M. Quintero; P. Grima-Gallardo; R. Tovar; G. S. Pérez; J. C. Woolley. Phase relations and the effects of ordering in (AgIn)_{1-x}Mn_{2x}Te₂ and (CuIn)_{1-z}Mn_{2z}Te₂ alloys. Phys. Stat. Sol. (a), 107: 205-211, 1988.
- [16] G. Lamarche; J.C. Woolley; R. Tovar; M. Quintero; V. Sagredo. Effects of crystallographic ordering on the magnetic behaviour of (AgIn)_{1-z}Mn_{2z}Te₂ and (CuIn)_{1-z}Mn_{2z}Te₂ alloys. J. of Magnetism and Magnetic Materials, 80: 321-328, 1989.
- [17] R. Tovar. PhD Thesis, Université des Sciences et Technologies de Lille, France. 1995. Unpublished.
- [18] M. Quintero; R. Tovar; M. Dhesi; J.C. Woolley. (CuIn)_x(AgIn)_yMn_{2z}Te₂ alloys. T(z) phase diagram and optical energy gap values. Phys. Stat. Sol. (a), 115: 157-164, 1989.
- [19] Ch. Neal; J.C. Woolley; R. Tovar; M. Quintero. Zn_{2x}(CuIn)_yMn_{2z}Te₂ and Zn_{2x}(AgIn)_yMn_{2z}Te₂ alloys. J. Phys. D: Appl. Phys., 22: 1347-1353, 1989.

Sobre los autores

Marcos Antonio Muñoz Pinto

Licenciado en Física. Doctor en Física de la Materia Condensada. Profesor e investigador en la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA), Barquisimeto, Venezuela.

Correo electrónico: mamp25571@gmail.com.

[ORCID](#)

Sonia del Valle Durán Piña

Licenciada en Física. Doctora en Física de la Materia Condensada. Profesora e investigadora en la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA), Barquisimeto, Venezuela.

Correo electrónico: spina9730@gmail.com

[ORCID](#)

Pedro José Grima Gallardo

Licenciado en Física. Doctor en Física de la Materia Condensada. Profesor e investigador en la Universidad de Los Andes (ULA), Mérida. Investigador en Centro Nacional de Tecnología Óptica (CNTO), Centro de Investigaciones de Astronomía (CIDA), Centro de Estudios en Semiconductores (CES). Venezuela.

Correo electrónico: peg@ula.ve

[ORCID](#)

Gerzon Eusebio Delgado Arciniegas

Licenciado en Química. Magister en Química Aplicada, Mención Estudio de Materiales. Doctor en Química Aplicada. Profesor e investigador Laboratorio de Cristalografía, Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes (ULA), Mérida, Venezuela.

Correo electrónico: gerson@ula.ve

[ORCID](#) - [Google Scholar](#)