

Estudio hidrodinámico de un reactor electroquímico para el reciclaje y cristalización de galio, indio y antimonio provenientes de la fabricación de películas semiconductoras

Fluid study of electrochemical reactor for recycling and crystallization gallium, indian and antimony from the manufacture of semiconductor films

Henry Reyes-Pineda^I; Luis Adrian Echeverry-Holguin^I; Leidy Carolina Cardona-Hernández ^{II}.

Resumen. La técnica de epitaxia en fase líquida genera desechos en mayor proporción de galio, indio y antimonio con un peso promedio de 1457 mg, que pueden recuperarse por procesos electroquímicos y cuyo propósito es reciclar y cristalizar estos metales puros a bajo costo, con cero productos de desechos metálicos en la fabricación de películas semiconductoras. Los estudios se realizaron en un reactor electroquímico de compartimentos separados, inyectando una solución trazadora de nacl en el compartimento catódico, determinándose la conductividad a la entrada y a la salida del reactor, describiendo, con ello, un modelo matemático que predice su comportamiento hidrodinámico, mediante la distribución de tiempos de residencia (DTR) y así aplicarlo para la recuperación de estos metales, operando el equipo en modo galvanostático (intensidad constante) y en modo potenciostático (potencial constante). Se busca darle un valor agregado a la recuperación de estos residuos metálicos para que la comunidad adquiera conciencia ambiental y trabaje de forma sostenible con el medio ambiente, de ahí la importancia de trabajar con otras disciplinas.

Palabras clave: Epitaxia, semiconductor, tiempos de residencia, electroquímica, conductividad, potenciostático.

Abstract. The technique of liquid phase epitaxy waste generated in a higher proportion of gallium, indium and antimony with an average weight of 1457 mg, which can be recovered by electrochemical and whose purpose is to recycle and crystallize these pure metals at low cost, with zero products scrap metal in the manufacture of semiconductor films. The studies were performed in an electrochemical reactor compartments separated by injecting a tracer solution of nacl in the cathodic compartment, determining the conductivity at the inlet and outlet of the reactor, thereby describing, a mathematical model that predicts hydrodynamic behavior by distributing residence time (DTR) and thus apply to the recovery of these metals, to equipment operating in galvanostatic mode (constant current) and potentiostatic mode (constant potential). It seeks to add value to the recovery of this waste metal to acquire community environmental awareness and work sustainably with the environment, hence the importance of working with other disciplines.

^I Director Maestría en Química. Facultad de Ciencias Básicas y Tecnologías. Universidad del Quindío. Armenia.

^{II} Magister en Química (C). Facultad de Ciencias Básicas y Tecnologías. Universidad del Quindío.

^{III} Magister en Desarrollo Regional y Planificación del Territorio. Profesora Universidad del Quindío.

* hreyes@uniquindio.edu.co

Keywords: epitaxy, semiconductor, residence times, electrochemistry, conductivity, potentiostatic.

1. Introducción

Las películas semiconductoras de $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ pueden ser fabricadas por diversas técnicas, tales como epitaxia por haces moleculares [Molecular Beam Epitaxy-MBE], epitaxia en fase de vapor por gases metalorgánicos [Metalorganic Vapour Phase Epitaxy-OMVPE] y epitaxia en fase líquida [Liquid Phase Epitaxy-EPL], entre otras. Lo que hace interesante fabricar este material por EPL es que esta técnica es utilizada en la industria para fabricar dispositivos en masa, dado que ofrece la mejor relación entre calidad cristalina de la película fabricada y precio de fabricación (Wang, Choi, Ransom, et al., 1999).

El semiconductor $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ posee amplias aplicaciones en la industria de la optoelectrónica, para la fabricación de dispositivos con respuesta en el infrarrojo (Tian, Zhou, Zhang et al., 1999; Cherng, Jen, Larsen et al., 1986). Por ser un material cuaternario es posible variar independientemente y en un amplio rango los valores de la brecha de energía y del parámetro de red, lo que permite usar para su fabricación sustratos de diferentes materiales, presentando gran acople de red (Madelung & Schulz, 1990). El rango de emisión del $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ fabricado sobre sustratos de GaSb , con coincidencia de red, está entre 0.35 y 0.75 eV (Levinshtein, Rumyantsev, & Shurt, 1999; Tournié, Lazzari, Pitard, et al., 1990), lo que lo hace interesante para aplicaciones en comunicaciones, ya que las fibras ópticas dopadas con flúor, presentan una muy baja atenuación en el infrarrojo cercano (Mishurnyi, de Anda, Gorbachev et al., 1997; Shim, Rabit, & Dutta, 2000). Además, se emplea en la fabricación de detectores de contaminantes atmosféricos, diodos LED y láseres de infrarrojo, para aplicaciones en comunicaciones ópticas con bajas pérdidas de transmisión (Qiu, Hayden, Mauk et al., 2006; Marín Muñoz, Pollak, Zakia et al., 2000) y también para la construcción de celdas termofotovoltaicas (Wang, Choi, Oakley et al., 1998).

El término *epitaxia* se define como la deposición de una capa monocristalina sobre un sustrato monocristalino, de tal modo que la estructura cristalina de la película sea una continuación de la estructura del sustrato (Ariza, 2003). Esta técnica utiliza para la elaboración de películas semiconductoras soluciones líquidas sobresaturadas a altas temperaturas a las que con un control en la composición estequiométrica de este cuaternario es posible fijar parámetros como la brecha de energía prohibida E_0 y el parámetro de red a , de acuerdo con el dispositivo que se quiere desarrollar; sin embargo, en el proceso se generan gran cantidad de residuos en la fabricación de estos semiconductores III-V, los cuales requieren ser recuperados usando procesos de reciclaje frecuentes, como la disolución térmica, la oxidación con oxígeno, la nitruración con atmósfera de amoníaco y la cloración con gas cloro (Fedorov, Kozlov, Potolokov et al., 2006). No obstante, existen métodos electroquímicos que permiten la recuperación de galio, indio y antimonio en celdas convencionales por electrodeposición (Zhao, Yhag, Xiao et al., 2012; Iyer & Deshpande, 1987).

En general, las celdas electroquímicas han desempeñado un papel importante en el avance tecnológico, con reactores como el de placas paralelas (tipo filtro-prensa), siendo el más comúnmente usado en aplicaciones a nivel de laboratorio y planta piloto. Por su parte, las celdas tipo filtro-prensa tienen aplicación, principalmente, en síntesis orgánica e inorgánica, celdas de combustible, baterías redox y en los procesos de tratamiento de efluentes (Walsh, 2001). En la literatura, se encuentran trabajos con un gran número de reactores electroquímicos para diversos procesos (Pletcher & Walsh, 1990). Sin embargo, no existe una aplicación directa para la recuperación de desechos de materiales semiconductores de gallio, fabricados por la técnica de epitaxia en fase líquida, menos aún, mediante la utilización de reactores electroquímicos de compartimentos separados presentes en la aleación resultante de películas crecidas epitaxialmente (Kiddee, Naidu, & Wong, 2013).

En este estudio, se propuso el diseño y desarrollo experimental de un reactor electroquímico de compartimentos separados para la recuperación, reciclaje y cristalización de galio, indio determinándose el régimen y el comportamiento hidrodinámico de este.

2. Materiales y métodos

2.1 Diseño de la celda

El reactor electroquímico diseñado consta de dos compartimentos contruidos en vidrio con una capacidad de 250 ml, cuyas dimensiones de los compartimentos fueron tubos de diámetro 60 mm por 12 cm de altura con flanches centrales, fondo redondo, desprendimiento inferior con olivas y desprendimiento superior izquierdo de diámetro interno 2 cm para la alimentación de la solución trazadora con abrazadera en poli cloruro de vinilo (PVC). Los compartimentos catódico y anódico están separados por una membrana Nafion 117, para evitar mezcla de los productos de reacción en el cátodo y el ánodo, con migración selectiva del catión por depositar. La celda electroquímica se muestra en la figura 1.

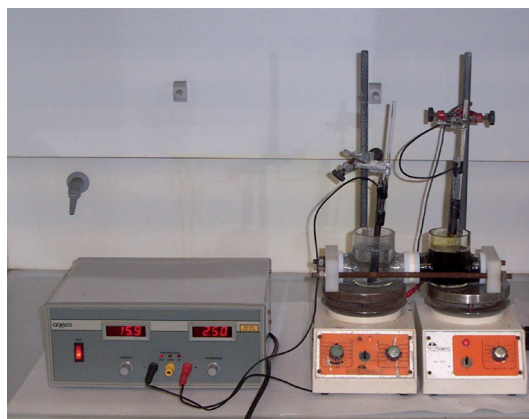


Figura 1. Reactor electroquímico para la recuperación de Ga, In y Sb

2.2 Electrodo

El cátodo es una barra cilíndrica de grafito cuyas dimensiones son 8 cm de largo con 0.5 cm de diámetro y el ánodo de Pb-Sn (5%) tratado previamente con una solución de H_2SO_4 1 M durante 72 h. Con el fin de obtener una película conductora de PbO_2 sobre la superficie del electrodo que protege al electrodo de la corrosión. La geometría del ánodo es cuadrada con un área de 8 cm de largo por 2 cm de ancho y 0.1 cm de espesor. Los electrodos se conectan a una fuente de alimentación para operar a potencial constante o a intensidad constante. Los compartimentos anódico y catódico se encuentra divididos por una membrana polimérica Nafion 117. Los dos compartimentos están unidos a un sistema de recirculación por gravedad desde el compartimento catódico al anódico, para efectuar un máximo agotamiento de los cationes de interés en la solución electrolítica.

2.3 Electrolitos

Las soluciones electrolíticas utilizadas en este estudio fueron: en el compartimento de reducción 100 ml de ácido sulfúrico 95-97% R.A. suministrado por la casa científica Merk Colombia, y en el compartimento anódico la aleación Ga, In y Sb (residuo del proceso epitaxial) en 100 ml de ácido sulfúrico 95-97% R.A.

Para determinar la distribución de tiempos de residencia, (DTR), se utilizó una solución trazadora de cloruro de sodio (nacl) 0.1 M (Pérez-Herranz et al., 2004) adicionada en el compartimento anódico en forma de impulsos mediante una jeringa, y midiéndose la evolución de la conductividad a la entrada y a la salida del reactor electroquímico de forma continua por medio de dos conductímetros. El fluido de trabajo es suministrado al reactor mediante una bomba con flujo de aire de $30 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$.

2.4 Control ambiental de residuos metálicos

El desarrollo de semiconductores conlleva una alta cantidad de residuos de la aleación implicada en el proceso, conformada por tres o cuatro elementos de los grupos II-VI y III-V de la tabla periódica según el tipo de estructura cristalina ternaria o cuaternaria respectivamente fabricada. Estas mezclas obtenidas son un producto secundario. Por cálculos se estima, gracias a un balance de materia, que alrededor de 70% de estos elementos son sobrantes en la producción de la capa depositada en el mono cristal; a esta masa no se le hace ningún proceso de recuperación a cada uno de los elementos implicados en la fabricación del cristal. Los materiales fabricados son películas delgadas semiconductoras sobre sustratos binarios de telurio de cadmio (cdte) o antimonio de galio (gasb) producidos en el proceso de epitaxia en fase líquida del laboratorio de optoelectrónica de la Universidad del Quindío, los cuales se recuperan, evitando ser desechados y reduciendo la contaminación ambiental.

3. Resultados y discusión

Para estudiar el comportamiento hidrodinámico del reactor electroquímico se determinó la distribución de (DTR), registrándose la variación de la conductividad en función del tiempo tanto a la entrada como a la salida del reactor, utilizando 100 ml de agua destilada inicialmente y posteriormente 100 ml de solución con la mezcla de galio, indio y antimonio.

En la figura 2, se representa la evolución de la conductividad a la entrada y a la salida del reactor respecto del tiempo para los datos experimentales obtenidos, considerándose un impulso normal. Tanto la curva a la entrada como a la salida tienen forma gaussiana y no son simétricas. La curva correspondiente a la salida es menos simétrica que la de la entrada, presentando una ligera cola indicativa de que dentro del reactor se produce un evidente grado de dispersión y que existen zonas muertas o estancadas (Szpyrkowicz, Cherbanski, & Kelsall, 2005). Adicionalmente puede concluirse que no existen fenómenos de recirculación interna, al obtenerse un único pico a la salida.

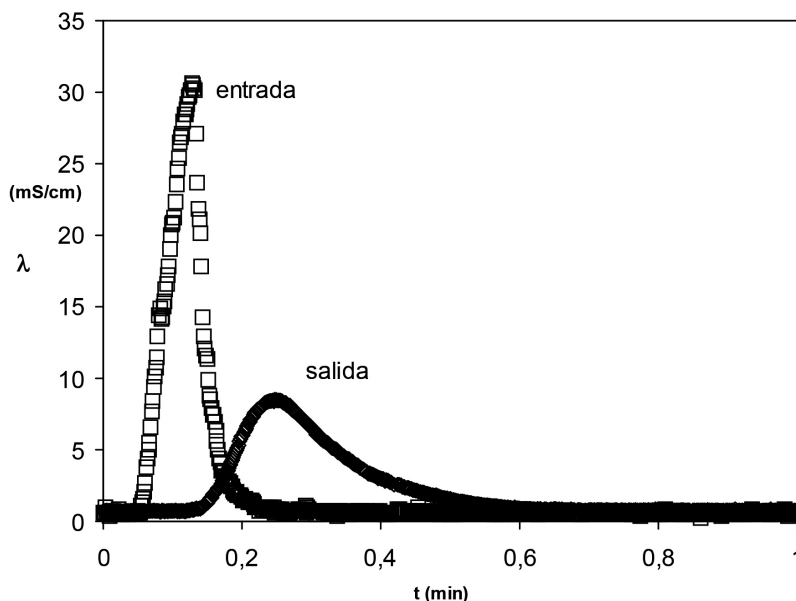


Figura 2. Variación de la conductividad con respecto al tiempo a la entrada y a la salida del reactor electroquímico propuesto

Para desarrollar un modelo del comportamiento hidrodinámico del reactor electroquímico y estimar los parámetros característicos de este, se evaluó la conductividad normalizada tanto a la entrada como a la salida, calculada según la expresión (1).

$$\int_0^t E dt = 1 \quad (1)$$

Donde λ es el valor de la conductividad a la entrada o a la salida en cualquier instante y λ_0 es el valor de la conductividad inicial de la solución. Operando de esta forma, la curva de salida se corresponderá con la curva E o curva de distribución de tiempos de residencia, de acuerdo con la expresión (2).

$$\lambda_{norm} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\int_0^t (\lambda - \lambda_0) dt} \quad (2)$$

En la figura, 3 se representa la evolución de la conductividad normalizada a la entrada y a la salida del reactor calculada a partir de los datos de la figura 2, aplicando la expresión (1). La forma de estas curvas es similar a las que se presenta en la figura 2, con la diferencia de que el área que hay por debajo de cada una de ellas equivale a la unidad.

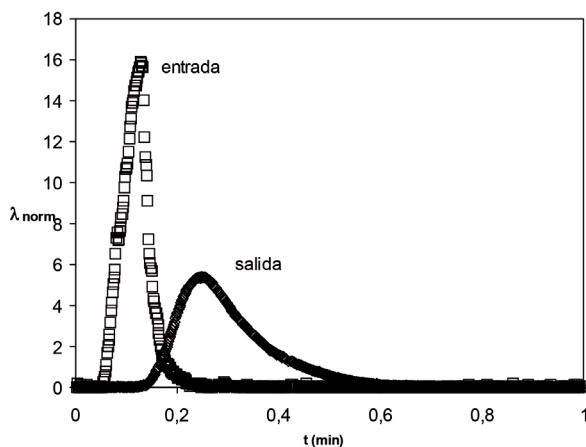


Figura 3. Variación de la conductividad normalizada con el tiempo a la entrada y a la salida del reactor electroquímico propuesto

En cualquiera de los dos casos de dispersión grande o pequeña para el comportamiento hidrodinámico del reactor, es necesario determinar el tiempo medio de residencia t_m , y la varianza σ^2 , según las expresiones (3) y (4).

$$t_m = \frac{\int_0^{\infty} t(\lambda - \lambda_0) dt}{\int_0^{\infty} (\lambda - \lambda_0) dt} \quad (3)$$

$$\sigma^2 = \frac{\int_0^{\infty} t^2(\lambda - \lambda_0) dt}{\int_0^{\infty} (\lambda - \lambda_0) dt} - t_m^2 \quad (4)$$

La ecuación general de diseño para este tipo de reactor electroquímico es una ecuación diferencial parcial de segundo orden que se expresa en forma adimensional de la siguiente manera (Scott, 1999; Levenspiel, 1999):

$$\frac{\partial C}{\partial \theta} = \left(\frac{D}{uL} \right) \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2} - \frac{\partial C}{\partial Z} \quad (5)$$

Donde $Z = (ut + z) * L^{-1}$ y $\theta = t * \tau^{-1} = tu * L^{-1}$. El grupo adimensional ($D * uL^{-1}$), se denomina módulo de dispersión del reactor y es el parámetro que mide el grado de dispersión axial. Este cociente $D * uL^{-1}$ es análogo al inverso del número de Péclet, mostrado en la expresión (6). Z , es la posición de la solución en cualquier instante t ; C es la concentración molar de la solución; θ es el tiempo de residencia en s ; L es la longitud característica del reactor electroquímico en m ; D el coeficiente de dispersión axial y u la velocidad del fluido de trabajo:

$$Pe = \frac{uL}{D} \quad (6)$$

Donde uL representa la velocidad de transporte por convección.

La ecuación (5) en función del número de Péclet y con unas condiciones de frontera dadas puede expresarse de la siguiente forma (7):

$$\frac{\partial C}{\partial \theta} = \frac{1}{Pe} \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2} - \frac{\partial C}{\partial Z} \quad (7)$$

Por lo tanto, para encontrar los parámetros característicos del comportamiento hidrodinámico del reactor electroquímico se resuelven dichas ecuaciones y se discretizan en la expresión (8), donde la variable x , es la misma posición Z .

$$t_m \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{Pe} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{\partial C}{\partial x} \quad (8)$$

Donde $t_m = L^* u^{-1}$ y $Pe = Lu^* D^{-1}$ y las condiciones iniciales y de frontera vienen dadas por (9), (10), (11) y (12).

$$C(0, x) = 0 \quad (9)$$

$$C(t, 0) = \delta(t) \quad (10)$$

$$C(0^-, t) = C(0^+, t) - \frac{1}{Pe} \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right)_{x=0} \quad (11)$$

$$\left(\frac{\partial C}{\partial x} \right)_{x=L} = 0 \quad (12)$$

Donde se asume que trabajar con concentraciones es equivalente a trabajar con conductividad normalizada, ya que en las condiciones de trabajo la conductividad de la solución es directamente proporcional a la concentración.

La solución numérica de estas ecuaciones se resuelve por el método de diferencias finitas. Las derivadas parciales en el espacio y en el tiempo son discretizadas siguiendo el método de diferencias centrales y la solución de estas ecuaciones permite calcular la variación de la conductividad con la posición y con el tiempo si se conoce t_m y $D^* u l^{-1}$. Los valores de la solución cuando $i = n$ son los que corresponden al valor de la conductividad a la salida del reactor electroquímico.

Para determinar los parámetros característicos de la DTR del reactor electroquímico, t_m y $D^* u l^{-1}$, se realiza un ajuste de regresión no lineal mediante el método de Levenberg – Marquardt (Tyrtysnikov, 1997) entre los datos experimentales y los calculados mediante la solución de la ecuación diferencial (8) sometida a las condiciones de contorno dadas por

las ecuaciones (9) a (12) y teniendo en cuenta los datos de la conductividad de entrada en cada caso. Para ello, se operó de la siguiente forma: se suponen unos valores iniciales de t_m y $D \cdot ul^{-1}$, se resuelve la ecuación diferencial para obtener la conductividad normalizada a la salida, se comparan los valores obtenidos con los experimentales y se repite todo el proceso hasta conseguir el mejor ajuste de regresión no lineal, obteniéndose los siguientes valores de t_m y D/ul :

$$T_m = 0.1226 \text{ min y } D/ul = 0.1041$$

Con estos valores y resolviendo la ecuación diferencial (8) se obtienen los resultados que se presentan en la figura 4, donde se compara la solución obtenida con los datos experimentales. Puede comprobarse que el modelo se ajusta perfectamente a los datos experimentales, por lo que puede concluirse que el comportamiento del reactor viene dado por las ecuaciones (9) a (12).

Finalmente, puede concluirse que la cola observada en la conductividad medida a la salida del reactor se debe a la forma de la entrada y no al hecho de que existan zonas muertas dentro del reactor.

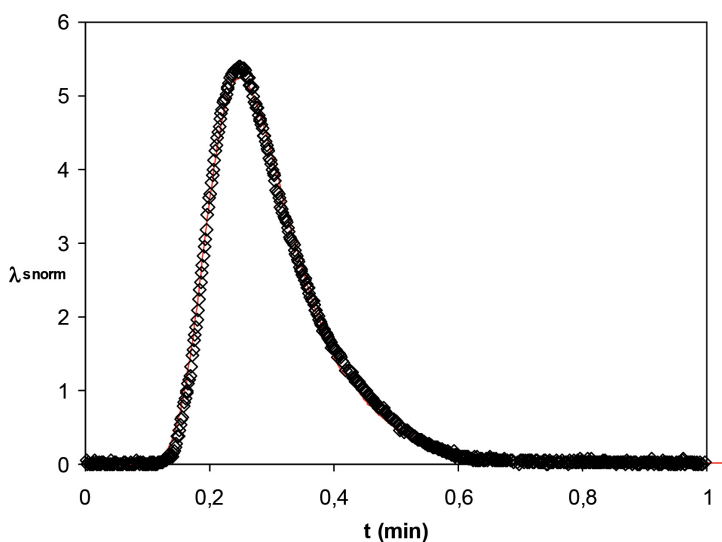


Figura 4. Variación de la conductividad normalizada con el tiempo a la salida del reactor electroquímico. Datos experimentales — Solución numérica ecuación (8)

El método matemático empleado para la determinación del (dtr) es efectivo para el tipo de aleación epitaxial, mostrando una recuperación de galio, indio y antimonio cercano a 65%; la cantidad de arsénico presente es insignificante y, por ello, no se cuantificó.

4. Conclusiones

En este estudio, se propuso el diseño y desarrollo experimental de un reactor electroquímico de compartimentos separados para la recuperación de galio, indio y antimonio, determinándose el régimen y el comportamiento hidrodinámico, el cual puede ser escalado a nivel de planta piloto e industrial, revelando la importancia que tiene el estudio como herramienta clave en el diseño. De acuerdo con estos resultados lo que sigue es continuar el estudio de la recuperación individual de ga, in y sb, elementos contenidos en la aleación remanente derivada del proceso de fabricación de películas semiconductoras por la técnica epitaxia en fase líquida del laboratorio de optoelectrónica de la Universidad del Quindío, mediante la reducción a estado metálico directamente en un cátodo de grafito del reactor electroquímico a bajo consumo energético y tiempos de deposición cortos, factores convenientes para un posterior desarrollo industrial.

El valor agregado de los desechos metálicos obtenidos servirán al crecimiento y desarrollo de un sector productivo de recuperación de metales, pues se pretende optimizarlo y no ser almacenado como un residuo peligroso, ya que se puede recuperar hasta 65% de estos metales.

Referencias

- Wang, C. A., Choi, H. K., Ransom, S. L. Et al. (1999, julio). Igh-quantum-efficiency 0.5 ev gainassb/gasb thermophotovoltaic devices. *Applied Physics Letters*. 75, 1305-1308.
- Tian, Y., Zhou, T., Zhang, B. Et al. (1999, marzo). Effect of material parameters on the quantum efficiency of gainassb detectors. *Solid State Electronics*, 43, 625-631.
- Cherng, M. J., Jen, H. R., Larsen, C. A. Et al. (1986, septiembre). MOVPE growth of gainassb. *Journal Crystal Growth*, 408-417.
- Madelung, O. & Schulz, M. (1990). Intrinsische Eigenschaften von Elementen der IV. Gruppe und III-V, II-VI und I-VII Verbindungen. Berlin, Deutschland, Springer Verlag.
- Levinshtein, M., Rumyantsev, S., & Shurt, M. (edits.). (1999). Handbook series on Semiconductor Parameters, Volume 2: Ternary and Quaternary A3B5 Semiconductors, USA: *Singapore World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.*
- Tournié, E., Lazzari, J. L., Pitard, F. Et al. (1990, julio). 2.5 μm gainassb lattice matched to gasb by liquid phase epitaxy. *Applied Physics Letters*. 68, 5936-5939.
- Mishurnyi, V. A., deanda., Gorbachev, Y. Et al. (1997, septiembre). Ingaassb growth from Sb-rich solutions. *Journal. Crystal Growth*, 180, 34-39.

- Shim, K., Rabitz, H., & Dutta, P. (2000, diciembre). And gap and lattice constant of $\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}_x$. *Applied Physics Letters* 88, 7157-7161.
- Qiu, K., Hayden, A. C. S., Mauk, M. G. Et al. (2006, enero). Generation of electricity using $\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}_x$ and GaSb TPV cells in combustion driven-radiant sources *Solar Energy Materials and Solar Cells* 90, 68-81.
- Rößner, K., Hümmer, M., Benkert, A. Et al. (2005, diciembre). Long-wavelength $\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}_x$ DFB lasers emitting near 2.6 μm . *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 30, 159-163.
- Cerutti, L., Boissier, G., Grech, P. Et al. (2007, abril). Growth and characterization of $\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}_x$ hole-well laser diodes emitting near 2.93 μm . *Journal. Crystal Growth*, 301-302, 967-970.
- Marín Muñoz, F., Pollak, H., Zakia, M. B. Et al. (2000, diciembre). Temperature dependence of the energy and broadening parameter of the fundamental band gap of $\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}_x$ and $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{Sb}_{1-y}\text{As}_y$ (0.07 < x < 0.22, 0.05 < y < 0.19) quaternary alloys using infrared photorefectance. *Physical Review B* 62, 16600-16604.
- Wang, C. A., Choi, H. K., Oakley, D. C. Et al. (1998, diciembre). Recent progress in $\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}_x$ thermophotovoltaics grown by organometallic vapor-phase epitaxy. *Journal. Crystal Growth*, 195, 346-355.
- Ariza, H. (2003, septiembre). Fabricación y caracterización óptica de materiales semiconductores para aplicaciones en optoelectrónica. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 27, 357-368.
- Fedorov, V. A., Kozlov, S. A., Potolokov, N. A. Et al. (2006, December). Preparation of High-Purity Gallium from Semiconductor Fabrication Waste. *Inorganic Materials*, 42, S70-S89.
- Zhao, Z., Yhag, Y., Xiao, Y. Et al. (2012, agosto). Recovery of gallium from Bayer liquor: A review. *Hydrometallurgy*, 125-126, 115-124.
- Dorin, R. & Frazer, E. J. (1988, enero). The electrodeposition of gallium from synthetic Bayer-process liquors. *Journal Applied Electrochemistry*, 18, 134-141.
- Muñoz, A. G., Saidman, S. B., & Bessone, J. B. (1999, noviembre). Electrodeposition of Zn and In onto vitreous carbon. *Journal Applied Electrochemistry*, 29, 1297-1304.
- Iyer, R. K. & Deshpande, S. G. (1987, mayo). Preparation of high-purity antimony by Electrodeposition. *Journal Applied Electrochemistry*, 17, 936-940.

- Walsh, F. C. (2001, abril). Electrochemical technology for environmental treatment and clean energy conversion. *Pure Applied Chemistry*, 73, 1819-1837.
- Pletcher, D. & Walsh, F. C. (1990). *Industrial Electrochemistry* (2ª). Londres: Chapman and Hall.
- Walsh, F. C. *A first course in electrochemical engineering*. Londres: Romsey Electrochemical Consultancy.
- Jüttner, K., Galla, U. & Schmieder, H. (2000). Electrochemical approaches to environmental problems in the process industry. *Electrochimica Acta*, 45, 2575-2594.
- Kiddee, P., Naidu, R. & Wong, M. H. (2013). Electronic waste management approaches: An overview. Review. *Waste Management*, 33, 1237-1250.
- Andrade Lima, L. R. P. (2006, enero). Liquid axial dispersion and holdup in column leaching. *Minerals Engineering*, 19, 37-47.
- Scott Fogler, H. (1999). *Elements of chemical reaction engineering* (3ª ed.). Nueva Jersey: Prentice Hall Inc. (now known as Pearson Education, Inc.).
- Pérez-Herranz, V., Guiñón, J. L., García-Antón, J. Et al. (2004, 22-26 de agosto). Regeneration of etching solutions using electrochemical reactors provided. En 16th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA (Prague, Czech Republic) (pp. 1-10). Process Engineering Publisher.
- Szpyrkowicz, L., Cherbanski, R., & Kelsall, G. (2005, febrero). Hydrodynamic effects on the performance of an electrochemical reactor for destruction of disperse dyes. *Industrial & Engineering Chemistry* 44, 2058-2068.
- Levenspiel, O. (1999). *Chemical reaction engineering* (3ª ed.). Nueva York: John Wiley and Sons.
- Tyrtysnikov, E. (1997, julio). *A brief introduction to numerical analysis*. Moscú: Birkhäuser Boston.

Referencia	Fecha de recepción	Fecha de aprobación
Henry Reyes-Pineda, Luis Adrian Echeverri-Holgin, Leidy Carolina Cardona-Hernandez. Estudio hidrodinámico de un reactor electroquímico para el reciclaje y cristalización de galio, indio y antimonio provenientes de la fabricación de películas semiconductoras <i>Revista Tumbaga (2013), 8, 15-27</i>	Día/mes/año 12/10/2012	Día/mes/año 04/03/2013