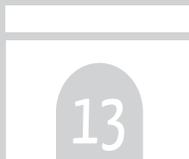


Cómo citar este artículo: Salcedo, J.C. (2017, enero-julio). Fabricación y caracterización de diodos emisores de luz con emisión en la región verde azul. *Rev. Cient. Gen. José María Córdova* 15(19), 337-347. DOI: <http://dx.doi.org/10.21830/19006586.88>



Fabricación y caracterización de diodos emisores de luz con emisión en la región verde azul*

DOI: <http://dx.doi.org/10.21830/19006586.88>

Recibido: 4 de septiembre de 2016 • Aceptado: 2 de noviembre de 2016

Fabrication and characterization of Light-Emitting
Diodes with green-blue region emission

Fabrication et caractérisation de Diode Electroluminescente
avec émission dans la region vert-bleu

Fabricação e caracterização de Diodos Emissores de luz com emissão na área verde-azul

Juan Carlos Salcedo Reyes^a

* Proyecto financiado por la Vicerrectoría de Investigaciones de la Pontificia Universidad Javeriana. Proyecto "Crecimiento, modelamiento y caracterización óptica y fotocatalítica del compuesto TiO₂/MDMO-PPV", ID 5616. Agradecimiento especial al profesor Dr. Isaac Hernández Calderón, del Departamento de Física del Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN (Cinvestav) por su invaluable apoyo en el desarrollo de este proyecto.

^a Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Físico de la Universidad Nacional de Colombia, Maestría en Ciencias, especialidad en Física, de la Universidad Nacional de Colombia. Doctorado en Ciencias, especialidad en Física, del Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN (Cinvestav). Estancia posdoctoral en Nanotech Institute de la Universidad de Texas en Dallas. Estancia posdoctoral en el Photonic Crystal Group del Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid. Profesor asociado en el Instituto de Física de la Universidad de Guanajuato (México). Actualmente, profesor asociado del Departamento de Física de la Pontificia Universidad Javeriana. <salcedo.juanc@javeriana.edu.co>



Resumen. El pasado 7 de octubre de 2014 se anunció, por parte del correspondiente comité, que el premio Nobel de Física 2014 se les concedió a los japoneses Isamu Akasaki, Hiroshi Amano y Shuji Nakamura por la invención de los diodos emisores de luz (LED, por sus siglas en inglés) con emisión en la región verde-azul del espectro visible (Nakamura, Mukai & Senoh, 1991). La importancia de este invento está relacionada tanto con las potenciales aplicaciones de los LED azules como fuente de luz eficiente y ecológica, como en el desarrollo de los llamados sistemas cuánticos.

Es así como actualmente el desarrollo de dispositivos electrónicos y opto-electrónicos, cuya región activa está constituida por estructuras cuánticas, está fuertemente modulado por la capacidad de fabricar dichas estructuras con una alta calidad cristalina, un alto control de la composición química y, sobre todo, con gran reproducibilidad. En este sentido, las técnicas de crecimiento epitaxial constituyen la piedra angular en el desarrollo tecnológico que supone la nano-electrónica. En este trabajo se plantean, en general, los diferentes procesos químicos y físicos que tienen lugar durante un crecimiento por Epitaxia de Capas Atómicas (Atomic Layer Epitaxy, ALE) de pozos cuánticos ultra-delgados (Ultra-Thin Quantum Wells, UTQW) de $Zn_xCd_{1-x}Se$ y se estudian, en particular, la cinética del proceso de adsorción de Zn dentro de la estructura cristalina en términos de una ecuación de reacción de primer orden que define la composición de la estructura en función de la temperatura del sustrato (T_s) y del flujo de átomos de zinc. Se obtienen los valores para la energía de activación, el factor pre-exponencial y la constante de adsorción de Zn. La composición química de los UTQW es uno de los parámetros más importantes para el diseño de estructuras cuánticas, ya que define la energía de emisión en potenciales aplicaciones opto-electrónicas y, en particular, en el desarrollo de LED azules y UV.

Palabras clave: aleaciones ordenadas, epitaxia de capas atómicas, pozos cuánticos semiconductores, fotoluminiscencia, diodos emisores de luz.

Abstract. On October 7th 2014, it was announced, by the Nobel committee, that the 2014 Physics Nobel prize was awarded to the Japanese Isamu Akasaki, Hiroshi Amano, and Shuji Nakamura for their development of LEDs with emission of blue-green visible light (Nakamura, Mukai & Senoh, 1991). The importance of this finding is based on the blue-LED potential applications as an efficient and ecological source of light, as well as on the development of the structure known as quantum wells.

That is how the present development of electronic and optoelectronics devices, whose active region is composed of quantic wells, is strongly modulated by the capacity to construct such structures with high crystalline quality, chemical composition control, and great reproducibility. In this way, epitaxial growth techniques represent, in the field of the nano-electronics, the technological developmental cornerstone. In this work different chemical and physical processes that take place during the growth of $Zn_xCd_{1-x}Se$ ultra-thin quantum wells (UTQW) by Atomic Layer Epitaxy (ALE) were studied. The kinetic process of Zn adsorption in terms of first order reaction equation is analyzed. The adsorption of Zn into the crystalline structure defines the chemical composition of the alloy as a function of the substrate temperature (T_s) and of the Zinc flux. In this work, values for the activation energy, pre-exponential factor, and Zn adsorption constant were obtained. The chemical composition in UTQW is one of the most important parameters for the fabrication of blue-LEDs, since it defines the wavelength of the emission in potential optoelectronic applications, in particular in blue LED and UV development.

Keywords: Ordered alloys; Atomic layer epitaxy; Semiconductor Quantum wells; Photoluminiscence, Light emitting diodes.

Résumé. Le 7 octobre 2014 le prix Nobel de physique 2014 a été attribué aux japonais Isamu Akasaki, Hiroshi Amano et Shuji Nakamura pour la découverte des diodes électroluminescentes (le sigle anglais LED sera utilisé par la suite) avec émission dans la région vert-bleue du spectre visible (Nakamura, Mukai & Senoh, 1991). Cette découverte démontre rapidement son utilité, en effet, les LEDs fournissent une



source de lumière efficace et écologique, puis a une grande importance dans le développement des systèmes quantiques. L'enjeu principal du développement de ce type de dispositif réside dans la capacité à reproduire à grande échelle et à moindre coût ces structures cristallines dont les alliages chimiques garantissent un rendement énergétique toujours plus élevé. Dans ce sens, les techniques de croissance épitaxiale constituent la pierre angulaire du développement technologique en nano-électronique. Dans cette étude, les différents processus chimiques et physiques qui ont lieu pendant la croissance de structures à puits quantiques ultra-minces (en anglais, ultra-thin quantum wells, UTQW) de $ZnXCd1-Xse$ par Épitaxie de Couche Atomiques (en anglais, Atomic Layer Epitaxy, ALE), ont été analysés. La cinétique du processus d'adsorption de Zn dans la structure cristalline a été étudiée également avec une équation de réaction de premier ordre qui définit la composition chimique de la structure en fonction de la température du substrat (T_s) et du flux d'atomes de Zinc. Dans ce travail, les valeurs pour l'énergie d'activation, le facteur pré-exponentiel, et la constante d'adsorption de Zn ont été obtenues. La composition chimique dans le UTQW est un de paramètres plus importants pour la fabrication de LEDs bleue, puisqu'elle définit la longueur d'onde d'émission dans de nombreuses applications optoélectroniques, particulièrement dans le développement des LED bleues et UV.

Mots-clés: alliages ordonnés, épitaxie de couches atomiques, puits quantiques semiconducteurs, photoluminescence, diodes électroluminescentes.

Resumo. No dia 7 de outubro de 2014 foi anunciado pelo comitê do Nobel, que o Premio Nobel de Física de 2014 foi concedido aos japoneses Isamu Akasaki, Hiroshi Amano e Shuji Nakamura pelo desenvolvimento dos diodos emisores de luz (LED, em inglês) com emissão na região verde-azul do espectro visível (Nakamura, Mukai & Senoh, 1991). A importância de este descobrimento está relacionada as potenciais aplicações dos LEDs azuis como uma fonte de luz eficiente e ecológica, e também no desenvolvimento dos chamados sistemas quânticos.

Por isto o desenvolvimento atual de dispositivos eletrônicos e optoeletrônicos, cuja região ativa está composta por estruturas quânticas, está fortemente modulado pela capacidade de fabricar estas estruturas com uma alta qualidade cristalina, controle da composição química e grande reprodutibilidade.

Em este sentido, as técnicas de crescimento epitaxial representam um pilar no desenvolvimento tecnológico no campo da nanoeletrônica. Neste trabalho, foram estudados diferentes processos químicos y físicos que ocorrem durante um crescimento de poços quânticos ultra-finos (UTQW, em inglês) $ZnXCd1-XSe$ por Epitaxia de Camadas Atômicas (ALE, em inglês). São analisados os processos cinéticos de absorção de zinco (Zn) em termos de equação de reação de primeira ordem. A absorção de Zn dentro da estrutura cristalina define a composição química da liga em função da temperatura do substrato (T_s) e do fluxo de átomos de Zn. Neste trabalho se obtiveram valores para a energia de ativação, o fator pré-exponencial e a constante de absorção de Zn. A composição química dos UTQW é um dos parâmetros mais importantes para a fabricação de LEDs azuis, uma vez que define a o comprimento de onda de emissão em potenciais aplicações optoeletrônicas, particularmente, no desenvolvimento de LEDs azuis e UV.

Palavras chave: Ligas ordenadas, epitaxia de camadas atômicas, poços quânticos semicondutores, fotoluminescência, diodos emisores de luz.

Introducción

Actualmente, las técnicas epitaxiales son ampliamente usadas en el desarrollo de dispositivos cuánticos principalmente porque permiten fabricar estructuras con una alta calidad cristalina, un alto control de la composición química y con gran reproducibilidad. En un crecimiento epita-



xial se crece una película delgada de solo unos cuantos nanómetros de espesor sobre un sustrato cristalino que está a una temperatura T_s de tal manera que, bajo condiciones adecuadas, en un crecimiento epitaxial la película es inducida a reproducir la estructura cristalina del sustrato. Uno de los métodos de crecimiento epitaxial más difundidos en la actualidad es la Epitaxia de Haces Moleculares (Molecular Beam Epitaxy, MBE), en la cual la cámara de crecimiento está bajo condiciones de ultra-alto vacío (Ultra High Vacuum, UHV), es decir, la presión residual dentro de la cámara de crecimiento es del orden de 10^{-11} torr. Esta técnica fue desarrollada en la década de los setenta (Cho, 1971, 1975) como un método de crecimiento que permite obtener estructuras semiconductoras con un alto grado de pureza y calidad cristalina.

En la actualidad es una de las técnicas más importantes dentro de la nano-electrónica debido a que, por un lado, permite producir películas delgadas y estructuras cuánticas con interfaces abruptas debido a la poca interdifusión en las interfaces, y a que, por otro lado, permite tener un buen control sobre el espesor de la película debido a la baja razón de crecimiento, que es típicamente de algunos Angstroms ($1\text{\AA} = 0.1\text{nm}$) por segundo, dependiendo principalmente de T_s y de la razón de flujos. Sin embargo, desde el reporte de la fabricación de una película delgada de ZnS (Suntola & Anston, 1977) usando la técnica de Epitaxia de Capas Atómicas (ALE, Atomic Layer Epitaxy), este tipo de crecimiento se ha constituido en un método estándar en la fabricación de películas delgadas de alta calidad, tanto de compuestos II-VI (Pessa & Jvlha, 1984; Ahonen, Pessa & Suntola, 1980) como III-V (Bedair, Tischler, Katsuyama & El-Marsy, 1985). En sí, ALE no es una nueva técnica de crecimiento epitaxial sino, más bien, es una modificación ingeniosa de la ya existente técnica de MBE, en la cual el sustrato es secuencialmente expuesto al flujo, atómico o molecular, de uno solo de los elementos constituyentes. ALE es una técnica de crecimiento epitaxial autorregulada (Tischler & Bedair, 1986) que permite el control del crecimiento “capa por capa”.

A diferencia de técnicas de crecimiento epitaxial convencionales, en ALE el espesor de la película se controla mediante la saturación superficial que se obtiene al exponer la superficie a flujos alternos e individuales de los elementos constituyentes. También permite controlar la composición en las aleaciones ternarias por medio del número de ciclos depositados de un elemento constituyente en particular (Pessa, Makela & Suntola, 1981) y no depende, como en el caso de MBE, de la razón de flujos. Además, en ALE se puede llevar a cabo el crecimiento de estructuras a relativamente bajas temperaturas aumentando la movilidad superficial de las especies adsorbidas (Hartmann, Feuillet, Charleux & Mariette, 1996) y, por lo tanto, disminuyendo la rugosidad de la superficie. Por todo lo anterior, ALE es una técnica ideal en la fabricación de perfiles abruptos de dopaje (d-doping), heterojunturas, pozos cuánticos y superredes con interfaces abruptas controlando el crecimiento con resolución de una monocapa ($1\text{ML} = \text{constante de red} / 2$).

Por otra parte, desde que se reportó el crecimiento de una película delgada de CdSe con estructura cúbica, los sistemas formados por pozos cuánticos (QWs) de CdSe entre barreras de ZnSe y de $\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Se}$ entre barreras de ZnSe, han sido ampliamente estudiados (Samarth *et al.*, 1989; Juza *et al.*, 1992) principalmente porque se ha demostrado que pueden ser usados como región activa en dispositivos emisores de luz dentro de la región de 460-539 nm del espectro visible (Haase, Qui, DePuydt & Cheng, 1991).



En este trabajo se estudia la dependencia de la concentración de Cd en función de la razón de flujos de $Se/(Zn+Cd)$ en un crecimiento ALE con el fin de demostrar que en pozos cuánticos de $Zn_{1-x}Cd_xSe$ entre barreras de ZnSe aparece una disminución muy importante de la concentración de Cd debido a que átomos de Cd son sustituidos por átomos de Zn, en condiciones de flujo bajo de Se. Es decir, que el coeficiente de pegado del Cd disminuye considerablemente si la superficie es expuesta simultáneamente a flujos de Cd y de Zn. De esta manera, se puede concluir, entonces, que el enlace Zn-Se es más estable que el enlace Cd-Se y que esto da lugar a una sustitución de átomos de Cd por átomos de Zn en una superficie terminada en Cd y, por lo tanto, siempre se obtendrán pozos cuánticos con una composición más alta de Zn que la nominal (Hernández-Calderón & Salcedo-Reyes, 2014).

Crecimiento ALE y caracterización de pozos cuánticos ultra-delgados

Con el objetivo de estudiar las variables de las cuales depende dicha interacción química entre el Zn y el Cd, se procedió a realizar un conjunto de muestras en las que se varía T_s entre 200°C y 290°C. Las muestras fueron crecidas en un sistema MBE Riber 32P (Grupo Nanosem, Departamento de Física del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN —CIVESTAV—, México, D.F.) con una presión base de $\sim 6 \times 10^{-11}$ Torr. En cada muestra se crecen dos pozos, que llamaremos QW1 y QW2, formados, cada uno, por 8 periodos de la forma Cd-Se-Cd-Se-Zn-Se-Zn-Se que define un espesor nominal de 16 monocapas (46.8 Å). El tiempo de exposición al flujo de Zn es de 5 segundos para el QW1 y de 25 segundos para el QW2. Se escogieron estos tiempos debido a que se espera que en el QW1 haya una mayor concentración de Cd debido al poco tiempo de exposición a flujo de Zn.

Sobre un sustrato de GaAs(100) tratado térmicamente, con el fin de eliminar los óxidos nativos de la superficie mediante un calentamiento paulatino hasta los 560°C, se crece, por MBE y a una temperatura de sustrato de 275°C, una capa colchón de ZnSe de aproximadamente 0.5 μm , como se muestra en la figura 1. Posteriormente, con el fin de mejorar la calidad de la superficie en términos de disminuir la rugosidad, se crece una capa de suavizado de 8 ciclos ALE de ZnSe, es decir $8x(Se-Zn)$, seguida del primer pozo cuántico (QW1). La barrera entre los pozos es una capa de aproximadamente 500 Å de ZnSe que corresponde a un crecimiento por MBE de 6 minutos. Para mejorar la calidad de la superficie, se crecen 8 ciclos ALE de ZnSe sobre la cual se crece el segundo pozo (QW2).

En la figura 2 se muestran los espectros normalizados de fotoluminiscencia (PL) a 14.5 K usando como excitación la línea de 441.6 nm de un láser de He-Cd. Se puede observar que, como se esperaba, a una temperatura de crecimiento determinada la emisión del QW1 (con menor tiempo de exposición a flujo de Zn) es de menor energía que la correspondiente emisión del QW2.

Esto es equivalente a decir que la concentración de Cd en el pozo QW1 es mayor que la correspondiente concentración del QW2 como resultado de la interacción química entre los átomos de Zn y de Cd modulada por los diferentes tiempos de exposición al flujo de Zn.

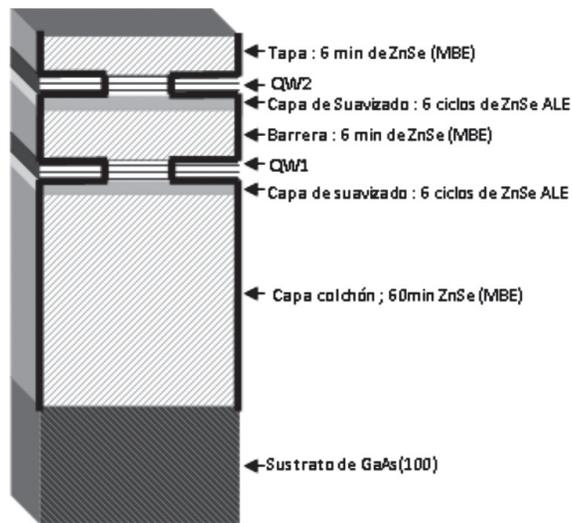


Figura 1. Representación esquemática (no a escala) de la serie de muestras crecidas con el fin de estudiar los procesos de interacción entre los átomos de zinc y de cadmio. Todas las muestras son nominalmente idénticas y solo se varía la temperatura de crecimiento.
Fuente: elaboración propia.

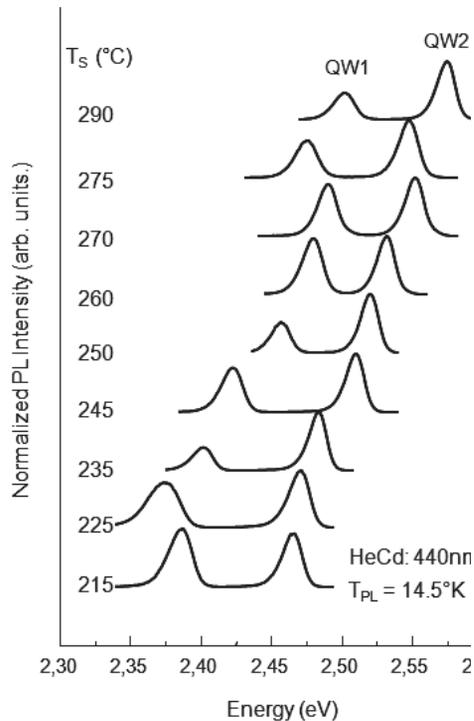


Figura 2. Mediciones de PL a baja temperatura para la serie de muestras crecidas a diferente temperatura de sustrato, T_s . Para cada valor de T_s se observa la emisión correspondiente al QW1 a menor energía que la emisión del QW2.
Fuente: elaboración propia.



Otro aspecto importante que se puede observar de la figura 2 es que a medida que disminuye la temperatura de sustrato, la energía de los picos excitónicos de los dos pozos disminuye de manera considerable. Para el QW1 la disminución es de 0.2 eV y para el QW2 de 0.11 eV. Este hecho permite concluir que el fenómeno de conmutación entre átomos de Zn y de Cd es un proceso que depende simultáneamente del tiempo de exposición a flujo de Zn y de la temperatura de sustrato. En la figura 3 se grafica la energía de emisión de PL para cada uno de los pozos cuánticos en función de T_s . Se observa un comportamiento claro y bien definido para la energía de emisión de cada uno de los pozos. En el caso del QW2 los valores de la emisión presentan menor dispersión respecto a una curva promedio (referencia visual en la gráfica). En el caso del QW1 se observa que, a menores temperaturas, la emisión tiende a disminuir más rápidamente que en el caso del QW2. Se observa, además, que para el QW1 los valores de emisión de PL presentan una alta dispersión respecto a una curva promedio.

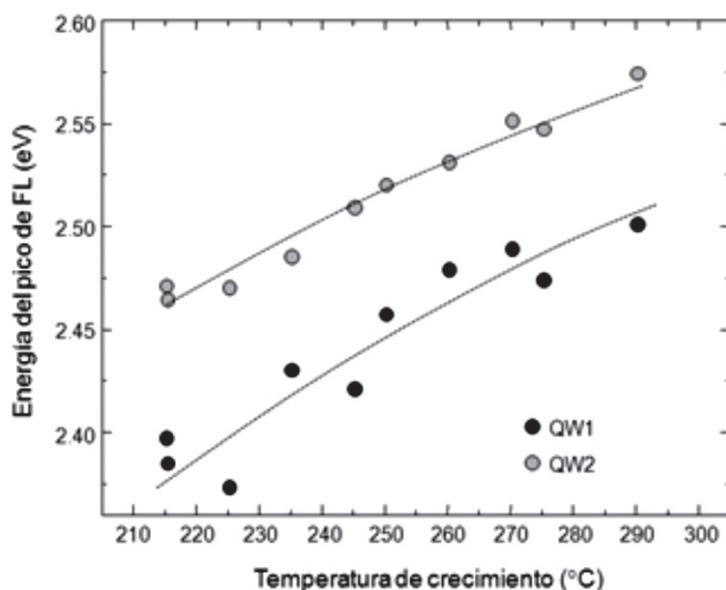


Figura 3. Valor de la energía del pico de PL a baja temperatura en función de la temperatura de crecimiento. Las líneas punteadas son una referencia visual del comportamiento de la emisión para cada uno de los pozos cuánticos. Fuente: elaboración propia.

A pesar de que, nominalmente, los flujos en todos los crecimientos fueron los mismos, se puede determinar que hubo importantes variaciones, hasta del 30 %, en el flujo de Zn. Esta observación es consistente con el hecho de que para el QW2 las variaciones del flujo de Zn no producen dispersión en los valores de emisión de PL. El tiempo de exposición al flujo de Zn en el QW2 es lo suficientemente largo como para garantizar que, a una T_s determinada, se llega, asintóticamente, a una composición de Cd límite impuesta por la temperatura. Por el contrario, para el QW1, las variaciones de flujo de Zn implican que haya una mayor o menor cantidad de átomos de Zn que pueden conmutar con átomos de Cd.

Finalmente, a partir de los picos de emisión de PL, se calcula la concentración de Zn en cada uno de los pozos (figura 4). De esta gráfica se puede confirmar que: *i*) la interacción química entre los átomos de Zn y de Cd es un proceso térmicamente activado, *ii*) dada la temperatura de crecimiento, existe un valor máximo de átomos de Cd que pueden ser conmutados por átomos de Zn, y *iii*) con un tiempo de exposición a flujo Zn de 25 segundos se ha llegado prácticamente al valor mínimo de concentración de Zn.

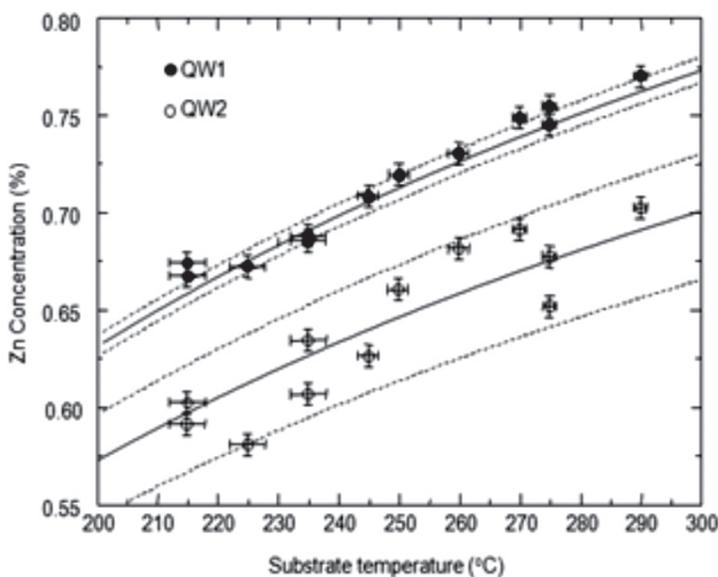


Figura 4. Concentración de zinc en función de la temperatura de crecimiento, el error en cada punto se calcula como la desviación estándar respecto a la concentración más probable.
Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con los resultados anteriores, el proceso de interacción química entre los átomos de Zn y de Cd es un fenómeno inherente al crecimiento por ALE de estructuras de CdSe/ZnSe. Por la aproximación que se ha seguido en este trabajo se puede disminuir su efecto bajando la temperatura de sustrato.

De la figura 4 se puede extrapolar que a una T_s de 185°C la concentración de Zn es del 50%, es decir, a esta temperatura se ha controlado por completo el proceso de interacción durante el crecimiento. Por supuesto, hay que verificar la calidad cristalina de la estructura, pues es muy probable que a esta temperatura se esté en el régimen de cobertura superficial de más de 1ML por ciclo.



Cinética de adsorción de zinc

Con el fin de describir el proceso de desorción de átomos de Cd debido a la exposición de la superficie a un flujo de átomos de Zn, se considera a la capa de adsorción como una ML que contiene átomos de Cd y de Se, en la cual, bajo un flujo de átomos de Zn, cierta cantidad de átomos de Cd son desorbidos, de modo que la misma cantidad de átomos de Zn son incorporados a la capa de adsorción, obteniendo, finalmente, una ML de la aleación ternaria $Zn_x Cd_{1-x} Se$.

La cinética del mecanismo de incorporación de átomos de Zn a la capa de adsorción se puede plantear en términos de una ecuación de reacción de primer orden para la concentración de Zn de la forma

$$\frac{dx}{dt} = kP_{Zn}(x_{\infty} - x) \quad (1)$$

en donde la constante de reacción se ha descrito por medio de la constante de adsorción, k , multiplicada por la presión del flujo de Zn (P_{Zn}), $x = x(T_s, t_{Zn}, P_{Zn})$, T_s es la temperatura del sustrato, y t_{Zn} es el tiempo de exposición de la superficie al flujo de Zn.

Como se comentó anteriormente, de la figura 4 se pueden obtener condiciones límites adecuadas para resolver la ecuación de reacción, de modo que, en condición de saturación, la concentración de Zn es constante e igual a

$$x_{\infty} = x(T_s, t_{Zn} \rightarrow \infty) \quad (2)$$

Resolviendo por integración la ecuación de reacción, asumiendo que la temperatura del sustrato y la presión de Zn son constantes durante cada crecimiento ($P_{Zn} = (5 \pm 1) \times 10^{-7}$ Torr), se obtiene que la concentración de Zn está dada por

$$x(T, t_{Zn}, P_{Zn}) = x_{\infty}(1 - e^{-kP_{Zn}t_{Zn}}) \quad (3)$$

El tiempo $t_{Zn} = 0$ representa el instante en el que se inicia la exposición de la superficie al flujo de Zn, de modo que $x(t_{Zn} = 0) = 0$. La figura 5 muestra, en un diagrama tipo Arrhenius, los valores de saturación $x_{\infty}(T_s)$ obtenidos a partir del ajuste de los valores de composición a la ecuación de la reacción. Se puede deducir, entonces, que los valores de saturación están dados por,

$$x(T_s) = Ae^{-\frac{E_i}{RT_s}} \quad (4)$$

donde A es el llamado factor pre-exponencial, E_i es la energía de activación, R es la constante universal de los gases y T_s es la temperatura del sustrato (en K). De la figura 5 se obtiene que la energía de activación y el factor pre-exponencial toman los valores (4.5 ± 0.05) KJ/mol y (2.01 ± 0.01) , respectivamente. Se obtiene, además, que la constante de adsorción es $(9 \pm 5) \times 10^5$ $t^{-1}Torr^{-1}$. En la figura se muestra la composición de Zn obtenida a partir de la ecuación de reacción de primer orden (líneas gruesas). Las líneas punteadas en la figura 4 representan el rango de error debido a la incertidumbre en los datos obtenidos.

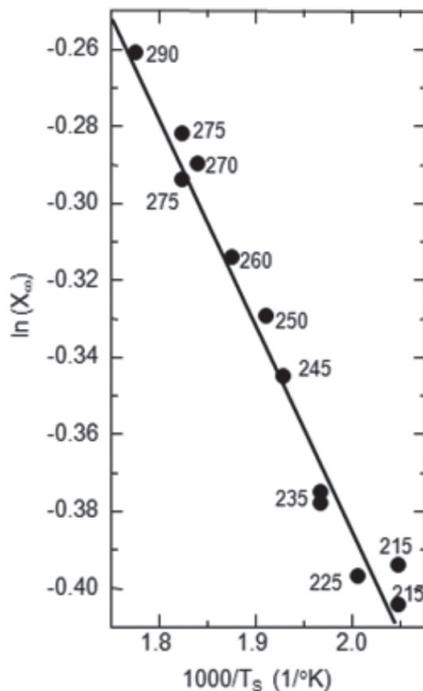


Figura 5. Diagrama tipo Arrhenius de x_{∞} . La línea sólida es el mejor ajuste a los datos experimentales, de donde se obtienen los valores $E_i = (4.5 \pm 0.05)$ KJ/mol y $A = (2.01 \pm 0.01)$. Se muestra la temperatura del sustrato para cada punto experimental.
Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

Se hizo una descripción detallada, mediante una ecuación de reacción de primer orden, de la cinética del proceso de adsorción de átomos de Zn durante el crecimiento de ZnCdSe-UTQW's por ALE. Se estableció que los valores de saturación de la concentración presentan un comportamiento tipo Arrhenius y determinan los valores de la energía de activación, el factor pre-exponencial y la constante de adsorción del Zn. De esta manera se tienen los parámetros principales necesarios para la descripción de la composición química de pozos cuánticos ultra-delgados crecidos por ALE.



Referencias

1. Ahonen, M., Pessa, M., & Suntola, T. (1980). A study of ZnTe films grown on glass substrates using an atomic layer evaporation method. *Thin Solid Films*, 65(3), 301-307. doi: 10.1016/0040-6090(80)90240-0
2. Bedair, S. M., Tischler, M. A., Katsuyama, T., & El-Marsy, N. A. (1985). Atomic layer epitaxy of III-V binary compounds. *Applied Physics Letters*, 47 (51).
3. Cho, A. (1971). Film Deposition by Molecular-Beam Techniques. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 8(5), S31-S39. doi: 10.1116/1.1316387
4. Cho, A. (1975). Molecular Beam Epitaxy. *Progress in Solid State Chemistry*, 10(3), 157-191. doi: 10.1016/0079-6786(75)90005-9 doi: 10.1063/1.96401
5. Haase, M. A., Qui, J., DePuydt, J. M. & Cheng, H. (1991). Blue-green laser diodes. *Applied Physics Letters*, 59, 1272. doi: 10.1063/1.105472
6. Hartmann, M., Feuillet, G., Charleux, M., & Mariette, H. (1996). Atomic layer epitaxy of CdTe and MnTe, *Journal of Applied Physics*. 79, 3035. doi: 10.1063/1.361243
7. Hernández-Calderón I., & Salcedo-Reyes, J. C. (2014). Photoluminescence study of the substitution of Cd by Zn during the growth by atomic layer epitaxy of alternate CdSe and ZnSe monolayers. *AIP Conference Proceedings*, 1598, 134. doi: 10.1063/1.4878294
8. Juza, P., Zajicek, H., Sitter, H., Helm, M., Faschinger, W., & Lischka, L. (1992). Photoluminescence of ZnSe/CdSe short-period superlattices growth by self-limiting monolayer epitaxy. *Applied Physics Letters*, 61, 3133. doi: 10.1063/1.107984
9. Nakamura, S., Mukai, T., & Senoh, M. (1991). High-Power GaN P-N Junction Blue-Light-Emitting Diodes. *Japanese Journal of Applied Physics*, 30(2), L1998.
10. Pessa, M. & O. Jylha. (1984). Growth of Cd_{1-x}MnxTe films with 0<x<0.9 by atomic layer epitaxy. *Applied Physics Letters*, 45, 646. doi: 10.1063/1.95342
11. Pessa, M., Makela, R., & Suntola, T. (1981). Characterization of surface exchange reactions used to new compounds films. *Applied Physics Letters*, 38, 131. doi: 10.1063/1.92274
12. Samarth, N., Luo, H., Furdyna, J. K., Oadri, S. B., Ramdas, A. K., & Otsuka, N. (1989) Growth of cubic (zinc blende) CdSe by molecular beam epitaxy. *Applied Physics Letters*, 54, 2680. doi: 10.1063/1.101033
13. Suntola, T., & Antson, J. (1977). Method for producing compound thin films, US Patent No. 4058430.
14. Tischler, M. A., & Bedair, S. M. (1986). Self-limiting mechanism in the atomic layer epitaxy of GaAs. *Applied Physics Letters*, 48, 1681. doi: 10.1063/1.96804