

## Fabricación y caracterización eléctrica de diodos de unión p-n de arseniuro de galio Fabrication and electrical characterization of gallium arsenide p-n junction diodes

H. D. Molina-Ruiz <sup>a</sup>, O. Pérez-Cortez <sup>b</sup>, J. L. González-Vidal <sup>b</sup>, H. Gómez-Pozos <sup>b\*</sup>

<sup>a</sup> Escuela Superior de Tepeji del Río, Ingeniería Industrial, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Avenida del Maestro No. 41 Colonia Noxtongo, Segunda Sección, 42855 Tepeji del Río, Hidalgo, México

<sup>b</sup> Área de Computación y electrónica, ICBI, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Mineral de la Reforma, Hidalgo, Apartado Postal 42000, México

### Resumen

Se fabricaron diodos de unión p-n de arseniuro de galio por la técnica de depósito químico en fase vapor usando materiales organometálicos (MOCVD). Se caracterizaron y analizaron curvas de corriente eléctrica contra voltaje en polarización directa, I-V. Mediante las caracterizaciones eléctricas se comprobó la realización de la unión pn, esto es, las curvas I-V muestran un comportamiento exponencial, también de las curvas I-V se obtuvo el factor de idealidad. El factor de idealidad nos dice que mecanismos de conducción está ocurriendo en el diodo de unión p-n y, este mostró que los mecanismos de conducción se presentaron principalmente en la región de deserción o región libre de portadores de carga, lo cual es común en diodos fabricados de arseniuro de galio con un gran ancho de banda prohibida y baja concentración de portadores de carga en ambas capas p y tipo n.

*Palabras Clave: Diodos de unión, GaAs, Curva IV, MOCVD, organometálicos.*

### Abstract

Gallium arsenide p-n junction diodes were fabricated by the chemical vapor deposition technique using organometallic materials (MOCVD). Curves of electrical current versus forward bias voltage, I-V, were characterized and analyzed. Through the electrical characterizations, the fabrication of a p-n junction was verified, that is, the I-V curves show an exponential behavior, and from these I-V curves the ideality factor was also obtained. The ideality factor tells us what conduction mechanisms are occurring in the p-n junction diode and this told us that the conduction mechanisms occur mainly within the depletion region or region free of charge carriers, which is common in diodes made of gallium arsenide with a large band gap and low concentration of charge carriers on both p-type and n-type layers.

*Keywords: Junction diodes, GaAs, I-V curves, MOCVD, organometallics.*

### 1. Introducción

Diodos de unión p-n son dispositivos electrónicos de 2 terminales fabricados a base de semiconductores, que son eléctricamente hablando tratados como conmutadores de corriente eléctrica, esto es, dependiendo del voltaje de polarización que tenga en sus 2 terminales dejen pasar corriente eléctrica solo en un sentido. Los diodos de unión tienen aplicaciones en los campos de la comunicación (Casey, H. C. 1978), control (Davis, R. E. 1967), medición (Hurych, Z. 1966) y monitoreo (Bergh, A. A. 1976). En la actualidad los diodos de unión p-n fabricados por arseniuro de galio, GaAs, y con una variedad de características eléctricas están disponibles en el mercado. Estas características diferentes

permiten usarlos particularmente como diodos emisores de luz (Sugawara, H. 1991), emitiendo principalmente en el rango infrarrojo, IR, lo cual permite el control de equipos eléctricos a distancia (Geusic, J. E. 1971). Por su alta velocidad de conmutación, puede servir como transmisor digital y, también se puede usar como elemento detector de luz (lectura de señales digitales) (Kajava, T. T. 1996). El conocimiento del funcionamiento de los diodos de unión p-n es la base para conocer el funcionamiento de otros dispositivos electrónicos más complejos (como los transistores, tiristores, triacs, diacs, entre otros). Previamente se necesita conocer las propiedades físicas de los materiales semiconductores, que son la base de lo que están hechos los dispositivos electrónicos. La importancia de los materiales

\*Autor para la correspondencia: gpozos@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: gpozos@uaeh.edu.mx (Heberto Gómez Pozos), ravila@uaeh.edu.mx (Roberto Ávila-Pozos), hmolina@uaeh.edu.mx (Héctor Daniel Molina-Ruiz), obed\_perez@uaeh.edu.mx (Obed Pérez-Cortez), jlvidal@uaeh.edu.mx (José Luis González-Vidal).

semiconductores se debe a que pueden cambiar sus propiedades eléctricas, yendo desde una alta resistencia eléctrica del orden de los 600 megaohms, esto es, un comportamiento como aislante hasta materiales con una baja resistencia eléctrica del orden de los miliohms, comportamiento casi como los metales. Existen diferentes semiconductores, como el silicio, Si (ByLev I. Berger, 1997), germanio, Ge (Levinshtein, M. 1996), los semiconductores binarios como el arseniuro de galio, GaAs (Adachi S. 2005), los ternarios como seleniuro de estaño cobre,  $\text{Cu}_2\text{SnSe}_4$  (Chivers, T., Laitinen, R. S. 2019). Las propiedades eléctricas de los semiconductores se pueden variar de dos maneras. 1.- Incorporándole intencionalmente algún tipo de impurezas, esto es, átomos diferentes a los que está constituido el semiconductor, en el caso del GaAs serían el silicio, carbono, germanio, estaño, plomo, entre otros. Y 2.- ante la presencia de algún tipo de energía que se le suministre como puede ser térmica (Jacob-Fraden, 2010), lumínica (Yoshida, S. 1983) o de potencial eléctrico (Hart, D. W. 2001), por lo tanto, las propiedades eléctricas de los semiconductores se puede cambiar permanentemente o momentáneamente. Existen diferentes técnicas para fabricar semiconductores como: el baño químico, (CBD) (Kevin M. 2010), depósito en vapor químico (CVD) (Dobkin, D. M. 2003), evaporación térmica (Minton, P. E. 1986), depósito por haces moleculares (MBD) (Udo W. Pohl, 2020) y depósito en fase vapor por compuesto organometálicos (MOCVD) (Razeghi, M., 2011). Cada técnica de depósito crea semiconductores con diferentes propiedades físicas que pueden servir para diversas aplicaciones. El estudio de los semiconductores se apoya en las ecuaciones de funciones de distribución, estadísticas, ecuación de continuidad, etc. Por otra parte el funcionamiento del diodo de unión p-n se basa en la relación voltaje-corriente del diodo ideal propuesta por Shockley (Shockley, W. 1949). En este trabajo se fabrican dos diodos de unión p-n de arseniuro de galio por la técnica de depósito en fase vapor por compuesto organometálicos (MOCVD), los diodos contienen diferente cantidad o concentración de impurezas en sus capas tipo p y n, se miden sus características de corriente eléctrica vs voltaje de polarización en directa a temperatura ambiente y, se determinan los mecanismos de conducción que están ocurriendo en la unión p-n en función de esta concentración de impurezas de las capas tipo p y n.

## 2. Desarrollo experimental

### 2.1 Obtención de las capas epitaxiales que conforman al diodo de unión.

Para la fabricación de los diodos de unión se utilizó la técnica de MOCVD, la cual es adecuada para el realizar capas de semiconductores binarios de la familia III-V de la tabla periódica, estas capas son epitaxiales, esto es, que las capas semiconductoras depositadas sobre un sustrato monocristalino siguen la misma estructura cristalina que el sustrato. En nuestro caso se utilizaron sustratos de GaAs tipo  $p^+$  (100) cuya estructura cristalina es cúbica (Zinc Blenda), por lo tanto las capas epitaxiales depositadas sobre este sustrato tendrán una estructura igual cúbica (Zinc Blenda). En la figura 1 se presenta brevemente el proceso de depósito de la técnica de MOCVD. Se observa que el depósito de las

diferentes capas que conforman al diodo de unión p-n se encuentran en una cámara que está a presión atmosférica. El sustrato se localiza en un porta muestra que tiene un cierto grado de inclinación, de tal manera que el flujo laminar que lleva los reactivos con los que formaran las capas del diodo de unión impacte bajo un cierto ángulo. El flujo de los reactivos está compuesto de galio con un gas que lleva estos reactivos, este es un gas inerte como el nitrógeno  $\text{N}_2$ , el otro elemento para la formación del GaAs es el arsénico, este se encuentra por debajo del porta muestra, ambos porta muestra y arsénico están a una temperatura de depósito, los gases residuales son desalojados por medio de nitrógeno, que tiene su trayectoria hacia la apertura de salida de gases, figura 1.

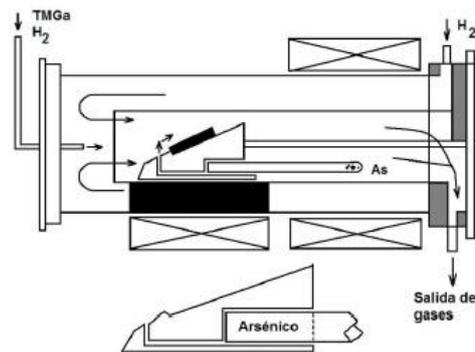


Figura 1.- Diagrama esquemático de la cámara de depósito de la técnica de MOCVD (Castillo-Ojeda, R., 2013).

### 2.2 Descripción de las diferentes capas que conforman al diodo de unión p-n.

Para la obtención de las diferentes capas epitaxiales que conforman a los dos diodos de unión p-n, se utilizaron los siguientes compuestos químicos.

- Compuestos organometálicos, trimetilo de galio ( $\text{CH}_3$ )<sub>3</sub>Ga y arsénico sólido se utilizan para depositar las diferentes capas de GaAs.
- Silano ( $\text{SiH}_4$ ), solución que contiene las impurezas de silicio que le da el carácter tipo n a las capas semiconductoras.
- Dietilzinc ( $\text{C}_2\text{H}_5$ )<sub>2</sub>Zn, solución que contiene las impurezas de zinc que le da el carácter tipo p a las capas semiconductoras.

La cantidad o concentración de impurezas en las capas semiconductoras tipo n y p dependen de la temperatura de depósito y de la cantidad de flujo de los gases silano y dietilzinc.

La razón de crecimiento de las capas depositadas depende de la temperatura de depósito y orientación del sustrato.

A continuación se describen las funciones de cada capa que componen al diodo de unión p-n (de arriba hacia abajo), figura 2.

Contacto óhmico.- Su función es el acceso desde el exterior a la unión p-n del diodo, estos contactos normalmente están hechos de aleaciones de metales como AuGe, PdGe, PdSi o

de Ti/Pt/Au, y son depositados sobre capas semiconductoras de GaAs tipo n. La resistencia eléctrica entre el metal y el semiconductor debe de ser baja del orden de los  $10^{-3}$  hasta los  $10^{-6} \Omega$ .

Capas colchón tipo  $n^+$ . Tienen una alta concentración de impurezas donadoras, de ahí la letra n con el signo superíndice +, esta capa se deposita previo al contacto óhmico, debido a que tiene una alta concentración de impurezas, baja resistencia eléctrica y por lo tanto presenta muy poca oposición a la corriente eléctrica entre el contacto óhmico y la capa  $n^+$ .

Capa activa tipo n. Esta capa tiene una concentración de impurezas donadoras mucho menor que la capa tipo  $n^+$ , esta capa forma parte la unión p-n.

Capa activa tipo p. Esta capa contiene impurezas aceptoras de ahí el signo p, esta capa forma parte de la unión p-n.

Capas colchón tipo  $p^+$ . Esta capa a la igual que la capa tipo  $n^+$  se deposita junto al contacto óhmico, tiene una alta concentración de impurezas aceptoras, por lo tanto baja resistencia eléctrica y de esta manera presenta muy poca oposición a la corriente eléctrica entre esta capa semiconductor tipo  $p^+$  y el contacto óhmico.

Substrato. Es el punto de partida para crear encima de este, las diferentes capas del material semiconductor deseado, este es de GaAs tipo  $p^+$ .

Contacto de óhmico. Al igual que el contacto óhmico mencionado anteriormente, figura 2, su función es el acceso desde el exterior hasta la unión p-n a través de la capa semiconductor tipo  $p^+$ , la resistencia eléctrica entre este contacto óhmico y la capa semiconductor tipo  $p^+$  debe ser muy baja, normalmente es del orden de los  $10^{-2}$  hasta los  $10^{-4} \Omega$ , estos contactos óhmicos están hechos de aleaciones de metales como AuGe, PdGe, PdSi o de Ti/Pt/Au.

En la figura 2 se presenta la estructura completa de los diodos de unión p-n que se fabricaron en este trabajo.

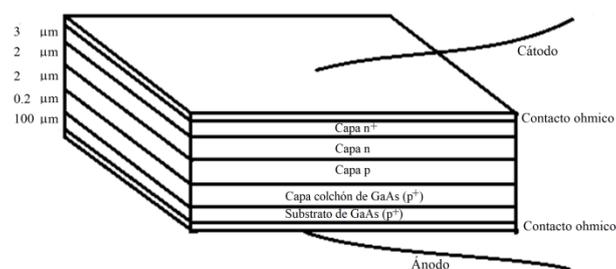


Figura 2.- Estructura del diodo de unión p-n.

Se fabricaron 2 diodos de unión denominados D1 y D2, ambos diodos tienen características similares, estas son: capas tipo  $n^+$  tiene una concentración de donadores o electrones de  $6.7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  y capas tipo  $p^+$  con una concentración de aceptores o huecos de  $2.6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , los espesores de las diferentes capas son similares para los 2 diodos, figura 2 y, las concentraciones de impurezas de las capas tipo n y p, para cada diodo se muestran en la tabla 1.

D2	$3 \times 10^{17}$	$4.3 \times 10^{16}$
----	--------------------	----------------------

Tabla 1.- Concentración de impurezas en las capas activas tipo n y p, para los 2 diodos fabricados.

La caracterización corriente eléctrica – voltaje aplicado,  $I - V$ , fue obtenida mediante una fuente de alimentación marca Zongchengda, el cual aplica un voltaje de polarización en directa (esto es, potencial positivo en el ánodo y potencial negativo en el cátodo del diodo de unión, figura 4) desde 0 hasta 1.5 V con pasos de 0.025 volts, este se aplica en un extremo del diodo y el otro en el extremo se encuentra una resistencia eléctrica que se utilizó como limitadora de corriente eléctrica, el valor óhmico de esta resistencia eléctrica utilizada fue de 1000 ohms. Para conocer el voltaje aplicado en los extremos y corriente a través del diodo se utilizo en ambos casos un voltímetro y amperímetro marca Keithley 2100/100. La configuración eléctrica utilizada para obtener la característica corriente eléctrica – voltaje aplicado se presenta en la figura 3.

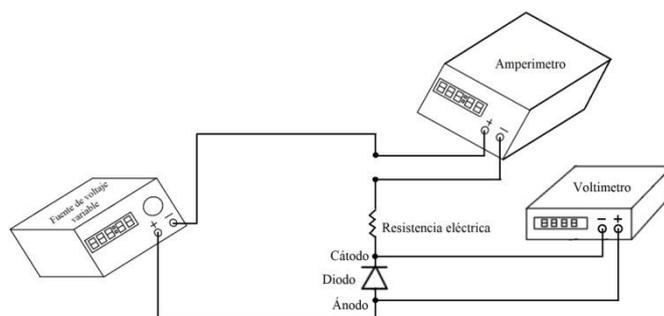


Figura 3.- Configuración eléctrica para obtener la característica I-V.

### 3. Teoría

Cuando se unen dos capas de diferente conductividad eléctrica tipo p y tipo n, se forma una región de deserción de cargas móviles o región de transición entre estas dos capas. Esto se debe al movimiento natural aleatorio de los portadores de carga, cruzando de su capa a la otra capa, ionizando átomos, esto es, electrones de la capa n cruzan a la capa p, encontrando átomos de impureza aceptoras ionizándolas negativamente y, debido a que los electrones ya no retorna a su átomos de origen, estos quedan ionizados positivamente. Este movimiento de cargas continuara hasta que habra la suficiente cantidad de carga ionizada en ambas capas, que formaran un campo eléctrico y detendrá este movimiento natural de portadores de cargas. Debido a que el ancho de la zona de deserción,  $W$ , tiene un efecto sobre los mecanismos de conducción, la describimos a continuación, ecuación 1, figura 4.

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left( \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) V_{bi}} \tag{1}$$

Donde  $\epsilon_s$  la permitividad relativa del semiconductor,  $q$  es la carga del electrón,  $N_A$  concentración de impurezas aceptoras,  $N_D$  concentración de impurezas donadoras y  $V_{bi}$  voltaje interconstruido.

Diodo	Concentración de impurezas donadoras, ( $\text{cm}^{-3}$ ).	Concentración de impurezas aceptoras, ( $\text{cm}^{-3}$ ).
D1	$5 \times 10^{17}$	$2.5 \times 10^{16}$

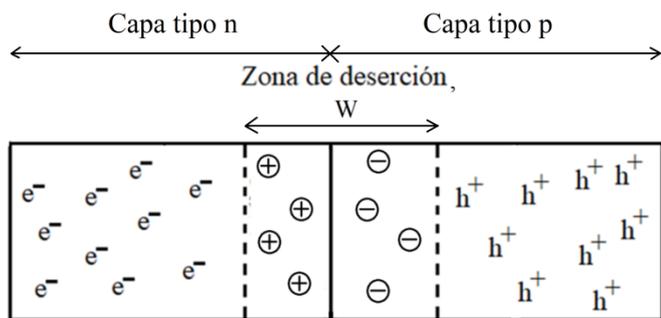


Figura 4.- Representación de la zona de deserción, donde e<sup>-</sup>, son los electrones, h<sup>+</sup> huecos libres, ⊕, carga ionizada positivamente y ⊖, carga ionizada negativamente.

Por otra parte bajo polarización en directa el comportamiento corriente eléctrica - voltaje aplicado del diodo se debe a la aparición de la región de deserción y sus zonas aledañas, figura 3. La densidad de corriente eléctrica total que circula a través del diodo, J<sub>D</sub> está compuesta de diferentes corrientes eléctricas, aunque en diferentes magnitudes, hay una corriente eléctrica preponderante. En la figura 5 se presentan algunas de estas corrientes eléctricas que se generan o producen en las diferentes zonas o sitios que componen al diodo de unión p-n, con su correspondientes sentidos de flujo.

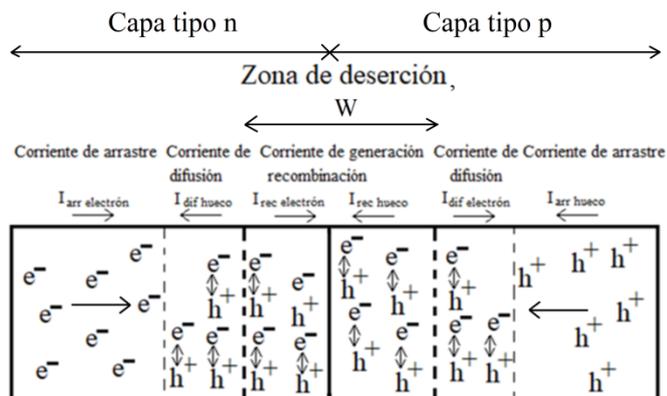


Figura 5.- Movimiento de cargas eléctricas en la unión p-n del diodo y su representación de aniquilación electrón y hueco.

Aunque la teoría del diodo de unión p-n es muy extensa en este trabajo mencionaremos los aspectos básicos de su funcionamiento. La corriente eléctrica total en el diodo de unión está compuesta de varias, algunas se presentan en la figura 5. La corriente de difusión se debe al gradiente de portadores de carga en función del espacio, ya sea de electrones o huecos que en su movimiento hacia el electrodo opuesto, pasan de su región donde son mayoritarios hacia la región de deserción y de ahí hacia la otra región donde son minoritarios, en su recorrido decrecen su magnitud por efecto de la recombinación hasta desaparecer, la recombinación se da principalmente en las zonas aledañas a la región de deserción, figura 5, esta corriente eléctrica dependen de los coeficientes y longitudes de difusión, D<sub>e</sub>, D<sub>h</sub>, L<sub>e</sub> y L<sub>h</sub>, respectivamente. La ecuación del diodo ideal debida a esta corriente de difusión se muestra en la ecuación 2.

$$J_{dif} = q \left( \frac{D_h P_{no}}{L_h} + \frac{D_e P_{po}}{L_e} \right) \exp \left( \frac{qV}{kT} \right) \quad (2)$$

La corriente de recombinación o aniquilación de portadores de carga de electrones y huecos en la zona de deserción o, zona libre de portadores de carga, se muestra en la ecuación 3.

$$J_{rec} = \frac{qW}{2} \sigma v_{th} N_t n_i \exp \left( \frac{qV}{2kT} \right) \quad (3)$$

Donde W es el ancho de la región de deserción, ecuación 1, v<sub>th</sub> velocidad térmica de los portadores de carga, N<sub>t</sub> cantidad o concentración de trampas, n<sub>i</sub> concentración de portadores de carga intrínsecos.

La corriente de arrastre es debido a la fuerza de atracción o repulsión que ejerce la diferencia de potencial eléctrica presente en las terminales del diodo, sobre los portadores de carga, esto es, el voltaje de polarización negativo debe de estar aplicado en la capa tipo n, para que expulse a los electrones y atraiga a los huecos de la capa tipo p, y viceversa, el voltaje con potencial positivo debe de ser aplicado a la capa tipo p, para expulsar a los huecos y atraer a los electrones, esta corriente se representa en la ecuación 4.

$$J_{arr} = (qn\mu_n + qp\mu_p)E \quad (4)$$

La corriente total del diodo J<sub>D</sub>, es la suma de las corriente eléctricas antes mencionadas J<sub>D</sub> = J<sub>dif</sub> + J<sub>rec</sub> + J<sub>arr</sub>.

$$J_D = (qn\mu_n + qp\mu_p)E + q \left( \frac{D_h P_{no}}{L_h} + \frac{D_e P_{po}}{L_e} \right) \exp \left( \frac{qV}{kT} \right) + \frac{qW}{2} \sigma v_{th} N_t n_i \exp \left( \frac{qV}{2kT} \right) \quad (5)$$

La densidad de corriente a través del diodo ideal en forma simplificada es la siguiente:

$$J_D = J_s \exp \left( \frac{qV}{nkT} \right) \quad (6)$$

Donde J<sub>D</sub> es la densidad de corriente del diodo de unión p-n, J<sub>s</sub> es la densidad de corriente de saturación, q la carga eléctrica, k constante de Boltzmann, T temperatura de operación y n factor de idealidad. Este factor de idealidad nos dice que mecanismo de conducción domina en la generación de corriente, si n es cercana a 1 la corriente dominante es la corriente de difusión J<sub>dif</sub>, esto es, la corriente debido a la recombinación de portadores de carga se da principalmente en las zonas limítrofes o aledañas a la zona de deserción, figura 5, si n es igual o mayor a 2 la corriente se debe a la recombinación en la zona de deserción J<sub>rec</sub> y, si n esta entre 1 y 2 están compitiendo ambas corrientes mencionadas.

#### 4. Resultados

De la ecuación de la corriente eléctrica ideal del diodo de unión p-n, ecuación (6) se obtiene el factor de idealidad, ecuaciones (7) y (8).

$$\ln(J_D) = \ln(J_s) + \frac{qV}{nkT} \quad (7)$$

$$n = \frac{\ln(J_{D2}) - \ln(J_{D1})}{V_2 - V_1} \quad (8)$$

A continuación se presentan las graficas corriente eléctrica - voltaje aplicado de un diodo de unión p-n, figuras 5 y 6 y de la ecuación 7 se obtiene el factor de idealidad,  $n$ , ecuación 8, estas se muestran en las mismas figuras 6 y 7.

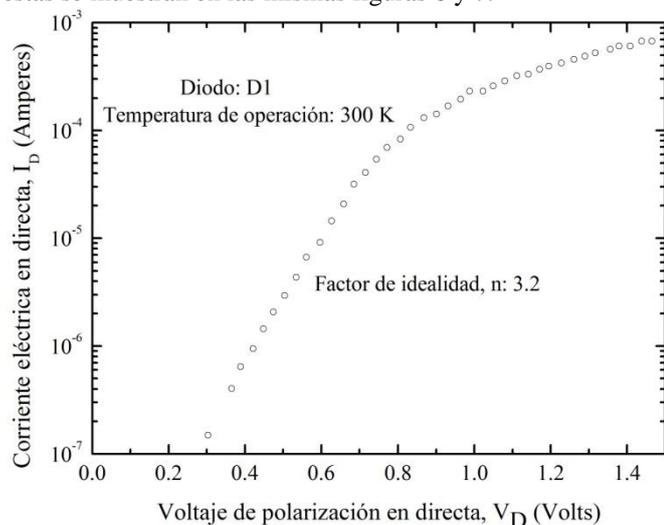


Figura 6.- Curva corriente voltaje en polarización directa, I-V del diodo D1.

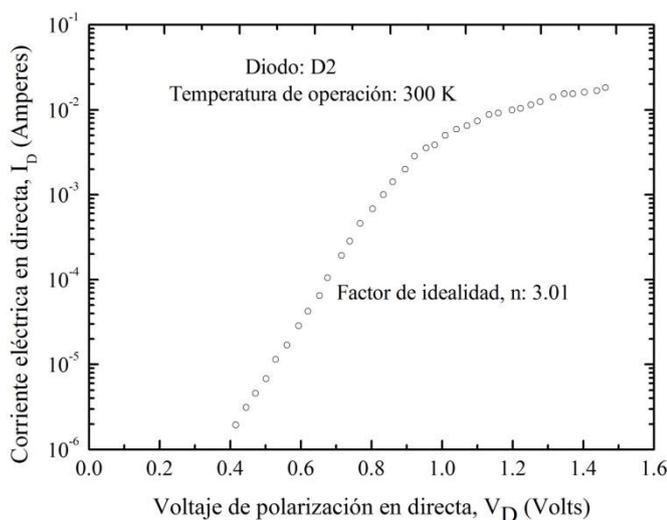


Figura 7.- Curva corriente voltaje en polarización directa, I-V del diodo D2.

El factor de idealidad obtenido estuvo por arriba de 2, lo cual significa que el mecanismo de conducción o la corriente eléctrica predominante se genera principalmente en la región de deserción o región donde no hay cargas libres, solo cargas fijas ionizadas, la cual es común en diodos de unión p-n de arseniuro de galio que tienen un gran ancho de banda prohibida por arriba de 1.42 eV y una concentración de impurezas alrededor de  $10^{16} - 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . De la ecuación 1, de los datos de concentración de impurezas donadoras y aceptoras, tabla 1 y, considerando un voltaje interconstruido cercano a 1.42 V a temperatura ambiente, se calculo el ancho de la zona de deserción,  $W$ . De los datos de fabricación de los dos diodos realizados, se calcularon sus anchos de la zona de deserción,  $W$ , con su correspondiente factor de idealidad,  $n$ , tabla 2. Se observa que en principio a mayor ancho de zona de deserción mayor factor de idealidad, esto concuerda con la teoría, a mayor espacio en la zona de deserción mayor probabilidad hay que los portadores de carga se recombinen

en ella, sin embargo hay que tomar estos resultados con cautela, ya que hay otros factores que afectan de manera importante a la corriente eléctrica de los diodos. Por último a voltajes de polarización mayores de 1 volt, la corriente eléctrica no se incrementa exponencialmente sino linealmente, lo cual significa que la corriente eléctrica en el diodo está dominada por la corriente de arrastre, esto es, los diodos se comporta como una resistencia eléctrica, ecuación 4.

Diodo	Ancho de la zona de deserción, $W$ , ( $\mu\text{m}$ )	Factor de idealidad, $n$
D1	29	3.2
D2	23	3.01

Tabla 2.- Ancho de la zona de deserción y factor de idealidad para los diodos D1 y D2.

### 5. Conclusiones

Se fabricaron diodos de unión p-n de arseniuro de galio por la técnica de arseniuro de galio usando materiales organometálicos y por la técnica de depósito de MOCVD. Se obtuvieron sus características corriente eléctrica - voltaje aplicado en directa, I-V a temperatura ambiente. Del comportamiento exponencial de las curvas I-V, se comprobó la realización de uniones p-n, esto es, los diodos se pueden utilizar como conmutadores de corriente. De la teoría del diodo ideal y de los resultados presentados en las graficas I-V, se obtuvo el factor de idealidad,  $n$ , el cual nos dice que mecanismo de conducción dominante en el diodo fue el de recombinación en la región de deserción, lo cual es típico en diodos fabricados con GaAs, con ancho de banda prohibida grande de 1.42 eV e impurificados con baja concentración de impurezas del orden de  $10^{16} - 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  en ambas capas tipo p y n. Los resultados obtenidos concuerdan con la teoría, esto es, a menor concentración de impurezas en las capas tipo p y n, mayor ancho en la región de deserción,  $W$ , y por lo consecuente mayor recombinación de portadores de carga en esta zona, sin embargo, estos resultados hay que tomarlos con cautela, ya que son varios los factores que interviene en los mecanismo de conducción, como la calidad cristalina del semiconductor, a menor calidad cristalina mayor recombinación de portadores de carga en la región de deserción, buenos contactos óhmicos y, precisión en las mediciones eléctricas. Por otra parte a voltajes de polarización mayores a un 1 volt, la corriente dominante es la corriente de arrastre, esto es, los portadores de carga llegan hasta el electrodo opuesto, sin recombinarse en la región de deserción y zonas aledañas, esto es, el diodo se comporta como una resistencia eléctrica.

### Agradecimientos

Nuestro agradecimiento al Dr. Ramón Peña Sierra investigador del CINVESTAV-IPN, por hacer uso de los equipos de fabricación y medición.

## 6. Referencias

- Adachi, S. (2005). Properties of group III-V and II-VI semiconductors. *John Wiley and sons*. England. ISBN: 978-0-470-09032-9.
- Bergh, A. A., Dean P. J. (1976). Light-emitting diodes. *Clarendon Press: Oxford*.
- ByLev I. Berger. (1997). Semiconductor Materials, *Edition 1st Edition First Published CRC Press*. London. <https://doi.org/10.1201/9780138739966>.
- Casey, H. C., Panish, M. B. (1978). Heterostructure laser, *academic Press*. New York. ISBN: 012163101X.
- Castillo-Ojeda, R.; Galván-Arellano, M.; Díaz-Reyes, J. (2013). Crecimiento epitaxial de un pozo cuántico de AlxGa1-xAs/GaAs/AlxGa1-xAs utilizando vapores metalorgánicos y arsénico sólido como precursores. *Superficies y vacío*, 26(4), 120. <http://www.scielo.org.mx/pdf/sv/v26n4/v26n4a1.pdf>.
- Chivers, T., Laitinen, R. S. (2018), Selenium and Tellurium Reagents: *Physical Sciences Reviews*, 1-22. <https://doi.org/10.1515/psr-2018-0060>.
- Davis, R. E., Gibbons, G. (1967). Design principles and construction of planar Ge Esaki diodes. *Solid state electron.*, 10(5), 461-472. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(67\)90045-7](https://doi.org/10.1016/0038-1101(67)90045-7).
- Dobkin, D. M., Zuraw, M.K. (2003). Principles of Chemical Vapor Deposition. *Kluwer Academic Publishers. Springer*. ISBN: 978-94-017-0369-7.
- Geusic, J. E., Ostermayer, F. W., Marcos, H. M., Van Uitert L. G., Van Der Zie, J. P. (1971). Efficiency of red, green and blue infrared -to-visible conversion sources. *J appl Phys.*, 42(5), 1958-1960. <https://doi.org/10.1063/1.1660472>.
- Hart, D. W. (2001). Electrónica de potencia. *Prentice Hall, Pearson educación, S. A.* Madrid. ISBN: 84-205-3179-0.
- Hurych, Z. (1966). Influence of nonuniform thickness of dielectric layer on capacitance and tunnel current, *Solid state electron*, 9(10), 967-979.
- Jacob-Fraden. (2010). Handbook of modern sensors : physics, designs, and applications. First edition. *Springer*. New York. ISBN: 9783319193021, 3319193023.
- Kajava T. T., Gaeta, A. L. (1996). Q switching of a diode-pumped Nd:YAG laser with GaAs, *Optics Letters*, 21(16), 1244-1246. <https://doi.org/10.1364/ol.21.001244>.
- Kevin M. M. (2010), Chemical Bath Deposition of Semiconductor Thin Films & Nanostructures in Novel Microreactors, *Drexel University*.
- Levinshtein, M. Rumyantsev, S. (1996), Handbook series on semiconductor parameters. *World scientific Publishing Co*. Singapore. ISBN: 981-02-1420-0.
- Minton, P. E. (1986). Handbook of Evaporation Technology, 1<sup>st</sup> Edition. *Elsevier Science & Technology Books*, USA. ISBN: 0-8155-1097-7.
- Razeghi, M., (2011). The MOCVD Challenge: A survey of GaInAsP-InP and GaInAsP-GaAs for photonic and electronic device applications. Second edition. *CRC Press, Taylor and Frances Group*. ISBN 9781138114937.
- Shockley, W. (1949). The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistors. *The Bell System Technical Journal*, 28(3), 435-489. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1949.tb03645.x>.
- Sugawara, H., Ishikawa, M. Hatakoshi, G. (1991). High-efficiency InGaAlP/GaAs visible light-emitting diodes. *Appl. Phys. Lett.*, 58(10), 1010-1012. <https://doi.org/10.1063/1.104407>.
- Yoshida, S., Misawa, S., Gonda, S. (1983). Improvements on the electrical and luminescent properties of reactive molecular beam epitaxially grown GaN films by using AlN-coated sapphire substrates. *Applied Physics Letters*, 42(5), 427-429. <https://doi.org/10.1063/1.93952>.
- Udo, W. P. (2020), Epitaxy of Semiconductors: Physics and Fabrication of Heterostructures, second edition, *Springer, Nature Switzerland AG*. ISBN-10: 3030438716.