

Práctica 3: Efecto Hall

Orozco González Luis René

correo: reneg@ciencias.unam.mx

Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.

Fecha de entrega:

19 de junio de 2020

Resumen

En la siguiente práctica se realiza un comparativo entre dos artículos que tienen como objetivo mutuo el estudiar las propiedades eléctricas de películas delgadas mediante el efecto Hall, siendo este método fundamental al momento de caracterizar o estudiar las propiedades de transporte eléctrico de un material en ambos artículos se determinan la constante Hall (R_H), su concentración de portadores de carga (N), su resistividad (ρ) y la movilidad de portadores de carga (μ). Se hace énfasis en los parámetros de deposito ya que estos influyen en demasía las propiedades de la película, además de las interpretaciones de los resultados de ambos artículos para al final de este trabajo determinar cual es la mejor metodología y por ende más factible a desarrollar.

1. DESARROLLO DE LA TEORÍA Y FUNDAMENTOS FÍSICOS

El efecto Hall se refiere, esencialmente al fenómeno que se presenta cuando los electrones de conducción en un material son puestos bajo la influencia de un campo eléctrico y un campo magnético cruzados. Dicho fenómeno fue descubierto en 1879 por E.H. Hall (*de ahí su nombre*), en su afán de entender el mecanismo causante de la conducción de los metales[1]. Este fenómeno se caracteriza por la aparición de una diferencia de potencial en la dirección transversal al movimiento de la corriente. Asociada a esta diferencia de potencial, hay una resistencia, denominada resistencia Hall, la cual, en la teoría clásica se comporta de manera lineal respecto al campo magnético. En la segunda mitad del siglo XX, observaciones experimentales demostraron que, contrario a lo antes mencionado, la resistencia Hall es en realidad un parámetro cuantizado. Lo anterior llevo a Klaus von Klitzing a ganar el premio nobel de física, por su “descubrimiento del efecto Hall cuantico”[2].

Como se menciona en el párrafo anterior el efecto hall tiene su nacimiento en el sistema dado por una configuración donde las cargas solamente se pueden mover dentro de un plano bidimensional como en la figura 1. Suponiendo una corriente que solamente recorre en dirección x y aplicando un campo magnético constante en dirección normal al área de la placa, se puede observar que las cargas sufrirán una desviación, ocasionando una variación en el voltaje entre los extremos dado por V_H .

La ecuación que gobierna el movimiento de los electrones clásicamente en la placa de metal de acuerdo al modelo

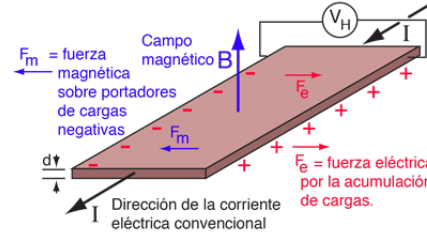


Figura 1: Esquema de efecto Hall clásico con las direcciones del campo magnético y la corriente. Imagen tomada de la pagina web: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/magnetic/Hall.html>

de Drue esta dada por:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = e\vec{E} - e(\vec{v} \times \vec{B}) - \frac{m\vec{v}}{\tau} \quad (1)$$

donde e es la carga del electron, m es su masa, \vec{v} es su velocidad, y τ es el tiempo entre colisiones. En la ecuación 1 se considera que el campo eléctrico es paralelo a la placa $\vec{E} = E_x \vec{x}$.

Con lo anterior los electrones al inicio tendrán, una velocidad en la dirección x negativa ya que hay una corriente j_x . La fuerza de Lorentz los obligara a moverse hacia la dirección y negativa, de tal modo que se agruparan en un extremo del conductor. Esto causara la aparición de un campo eléctrico en dirección y ; E_y que se deberá considerar.

Con las definiciones anteriores se puede definir el coeficiente Hall como:

$$R_{Hall} = \frac{-E_y}{j_x B} \quad (2)$$

donde se puede calcular que este coeficiente es igual a $\frac{1}{ne}$ donde n es la densidad electrónica y se puede ver que no depende más que del número de electrones por volumen.

En una misma línea se puede definir una resistividad transversal (que por ser material bidimensional coincide con la resistividad conocida) con la cual tendremos,

$$\rho_{trans} = \frac{-E_y}{J_x} = \frac{B}{ne} \quad (3)$$

donde esta cantidad depende del campo constante aplicado.

1.1. Evaporación reactiva

Esta técnica en general consiste en evaporar un material sólido, dentro de una cámara que se mantiene a una presión total menor a 1×10^{-6} Torr (1.3×10^{-4} Pa), así, las partículas en la fase de vapor se mueven a través de un medio de baja densidad molecular para finalmente condensar sobre la superficie del sustrato.[3]

Sin embargo esta técnica requiere de diferentes metodologías para poder aumentar la temperatura del material sólido dentro de un vacío del cual se genera el vapor. Uno de ellos, trata de un filamento que se calienta cuando se aplica una diferencia de potencial (*Efecto Joule*) el cual generalmente está hecho de Tungsteno. Este método se conoce formalmente como evaporación térmica al vacío. Una de las variantes de esta técnica de crecimiento, es la evaporación térmica reactiva. Para este caso en particular el procedimiento es exactamente el mismo, con excepción de la introducción, dentro de la cámara de proceso, de uno o más gases que originan una reacción química con el vapor eyectado del material sólido; lo que consecuentemente, genera que la naturaleza del depósito sea diferente a la del blanco.

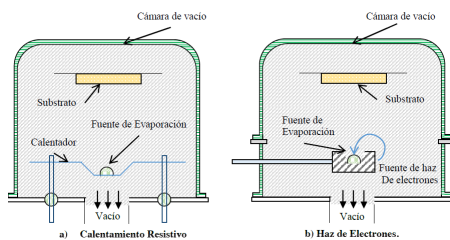


Figura 2: Proceso de evaporación Térmica. Imagen tomada de la página web: https://www.icmm.csic.es/fis/espaa/evaporacion_electrones.html

En la figura 2 se presenta 2 tipos de procesos de evaporación térmica. La técnica de evaporación por calentamiento resistivo (figura 2 a) es comúnmente utilizada para la deposición de películas delgadas. Los materiales son evaporados mediante el uso de una resistencia, la cual está fabricada generalmente de metales como W, Mo o Ta con o sin recubrimientos cerámicos.[4]

A los crisoles de cuarzo, grafito, alúmina, óxido de berilio, entre otros se les debe de realizar un calentamiento

indirecto. Para algunos metales cuyo punto de fusión es más alto, se deben de evaporar mediante la deposición por haz de electrones (figura 2 b) ya que la resistencia no logra que se evaporen.

2. BÚSQUEDA DE 2 ARTÍCULOS

Artículo: Caracterización eléctrica de muestras de cobre y zinc por medio del efecto Hall.

Autores: A. A. Venegas, N. Alba, E. Munévar, J. M. Florez, M. H. González. Y C.E. Jacome

Sitio de descarga: http://www.revcolfis.org/busqueda/vol34_1/articulos/pdf/3401262.pdf

En este artículo A. A. Venegas y colaboradores realizaron una caracterización a películas delgadas de Cobre (Cu) y Zinc (Zn) mediante el método eléctrico Hall, para estudiar algunas de sus propiedades de transporte eléctrico como determinar la constante Hall (R_H), su concentración de portadores de carga (N), su resistividad (ρ) y su movilidad (μ).

El experimento se llevó a cabo a temperatura ambiente, con un campo magnético constante generado por bobinas de HELMHOLTZ. Los datos que se obtuvieron fueron de voltaje en función de corriente los cuales gráficamente presentan un comportamiento lineal lo cual era de esperarse, esto permitió que los autores realizaran una regresión lineal obteniendo la pendiente de la recta o en este caso la constante Hall (R_H), la cual dependiendo su signo determinó que tipo de portadores llevan a cabo la conducción en el material caracterizado y además que se pudo obtener mediante cálculos, (*con esa misma constante*), la concentración de portadores de carga y otros parámetros.

Para el caso del cobre se obtuvo una recta con una pendiente positiva lo cual implica que la conducción en ese material se lleva a cabo a través de huecos. Mientras que para el caso de las películas delgadas de Zinc la conducción se lleva a cabo por electrones siendo estos portadores de carga dominantes en este material.

El hecho de que la conducción en el Cobre se da a través de huecos y en Zinc se da a través de electrones resultó para los autores del artículo un poco dudoso ya que con base a algunos textos y publicaciones que usaron como referencia estos afirmaban lo contrario. Sin embargo A. A. Venegas y su equipo logran explicar sus resultados experimentales a partir de la distribución electrónica del Cobre (Cu) y del Zinc (Zn).

Artículo: Resistividad eléctrica y Efecto Hall en películas delgadas de ZnO depositadas por evaporación reactiva.

Autores: Fredy Giovanni Mesa Rodríguez, Ph.D y Carlos Andrés Arredondo Orozco, Ing. PhD

Sitio de descarga: <https://revistas.unilivre.edu.co/index.php/avances/article/view/2681/2107>

En este artículo Fredy Mesa y Carlos Arredondo llevan a cabo un trabajo teórico experimental que constó de obtener películas delgadas de óxido de zinc (ZnO) mediante

el método de deposición conocido como evaporación reactiva, para, posteriormente caracterizarlas con el método eléctrico Hall para obtener su nivel de conductividad con el objetivo de mostrar que el parámetro de mayor influencia sobre el crecimiento de películas delgadas con mejor transmitancia espectral y conductividad es la presencia de oxígeno en la cámara de preparación.

Al final del experimento se encontró que las muestras presentaban simultáneamente alta transmisión ($> 80\%$) y conductividad ($> 10^3 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$), los cuales son valores adecuados para ser usadas como contacto eléctrico transparente en celdas solares.

3. DESCRIPCIÓN DE LOS EXPERIMENTOS

Para el artículo: Caracterización eléctrica de muestras de cobre y zinc por medio del efecto Hall.

En este experimento se hizo uso de Bobinas HELMHOLTZ con límites de operación de 0 a 1600mT, con una corriente máxima de 15 amperios, produciendo con esto campos uniformes en el centro geométrico de las bobinas a una distancia de 2 centímetros desde el centro (véase figura 3). También se uso una sonda Hall tangencial y mili-teslámetro que permite medir el campo magnético en el sitio de colocación de las películas delgadas de Cu y Zn, siendo su precisión de 0.1mT. Sumado a esto se uso una fuente de voltaje variables para suministrar corriente a las bobinas de Helmholtz y a la respectiva película conductora. Para ubicar la sonda en el centro geométrico se utilizo un dispositivo de ubicación tridimensional que su precisión es de 10 micras según lo reportado por los autores del propio artículo. Por ultimo se utilizo un microvoltmetro para medir el voltaje Hall y dos muestras de películas delgadas de Cu y Zn con espesores de $d_{Cu} = 18 \times 10^{-6}\text{m}$ y $d_{Zn} = 25 \times 10^{-6}\text{m}$ respectivamente.

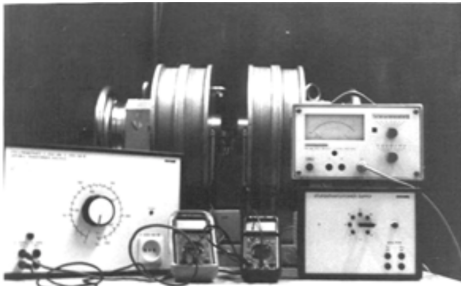


Figura 3: Montaje y equipos utilizados para realizar efecto Hall. *Imagen tomada del artículo:[5]*

Al realizar la toma de datos los autores reportan dos cosas destacables con relación a las bobinas Helmholtz, la primera es que la región del espacio en la cual la densidad de flujo magnético es uniforme en las bobinas es el centro geométrico, y la magnitud del campo para apreciar el efecto hall esta entre 50 y 200 mT, ya que por encima o por debajo el efecto seria difícil de apreciar.

Se reporta en el artículo que los datos se tomaron de manera similar tanto para la muestra de Cobre como para la muestra de Zinc. Esto quiere decir que se les aplico la misma corriente y el mismo campo magnético. Para el caso de la corriente en la muestra se vario entre 0 y 8 A, con intervalos de 0.5 A. Como en las bobinas se mantuvo una corriente fija, el campo magnético generado era constante con un valor de 161.1mT.

Para el artículo: Resistividad eléctrica y Efecto Hall en películas delgadas de ZnO depositadas por evaporación reactiva.

El experimento empezó con el proceso de crecimiento de las películas delgadas, para, esto se hizo uso de sustratos del tipo vidrio (*soda-lime*), los cuales eran puestos dentro de una cámara de deposición con una presión inicial de $1 \times 10^{-3}\text{mbar}$ y secuencialmente, se fue introduciendo el oxígeno en la cámara hasta presurizarla en donde mediante un control electrónico permitía crecer las películas delgadas de ZnO, asegurando el vacío dentro de la cámara según lo reportado en el artículo. El zinc fue suministrado por evaporación, utilizando una celda Knudsen, tal como lo ilustra la Figura 4, la ionización de especies reactivas es obtenida a través de una descarga eléctrica. Todo el proceso de deposito antes descrito reportan los autores que fue realizado a temperatura ambiente.

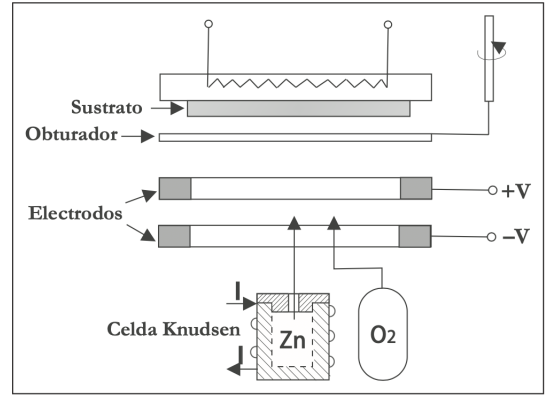


Figura 4: Equipo para depositar películas delgadas de ZnO por evaporación reactiva. *Imagen tomada del artículo:[6]*

Parámetros de deposición	Valores de parámetros
Corriente de iones (mA)	2
Temperatura de evaporación del Zn (°C)	540-560
Presión de O ₂ (mbar)	0.15-0.35
Separación Electrodo (cm)	3
Espesor de las películas (nm)	570-838

Figura 5: Lista de parámetros usados en la preparación de películas delgadas de ZnO por evaporación reactiva. *Imagen tomada del artículo:[6]*

Ya obtenidas las películas delgadas de ZnO, se les midió su transmitancia, el coeficiente Hall y la conductividad eléctrica. Para esto se hizo uso de de dos dispositivos de medición que fueron el *Perkin Elmer Spectrophotometer* para medir la cantidad de luz que pasaba a través de las películas por unidad de tiempo. Mientras que para las propiedades meramente eléctricas se uso el dispositivo llamado *Keithley Hall Effect Card model 7065*.

4. RESULTADOS OBTENIDOS EN CADA ARTÍCULO Y SU ANÁLISIS

Para el artículo: Caracterización eléctrica de muestras de cobre y zinc por medio del efecto Hall.

Mediante los datos de corriente y voltaje obtenidos para la muestra de cobre (Cu), se realizo un gráfico donde los valores de voltaje estuvieran en función de los de corriente, lo cual revelo un comportamiento lineal. Los autores optaron por ajustar una recta y obtener la ecuación de la misma para determinar la constante Hall (R_H) para calcular las características eléctricas de la muestra, además de que como se pude ver en la figura 6 la pendiente es positiva lo cual los autores afirman que los encargados de la conducción en el material son huecos siendo estos dominantes en la muestra.

Para el caso de la muestra de Zinc se realizo el mismo proceso manteniendo la misma polaridad en las conexiones del micro-voltímetro usadas para el Cobre, aunque en un principio no habría aparición de alguna caída de potencial lo cual represento para el equipo de investigación un problema para solucionar esto decidieron invertir la polaridad en la corriente suministrada a la muestra logrando así una lectura en el micro-voltímetro. Lo que se obtuvo gráficamente fue un comportamiento lineal pero con una pendiente negativa, (véase figura 7), lo cual implica que los portadores de carga en la muestra de Zn son electrones.

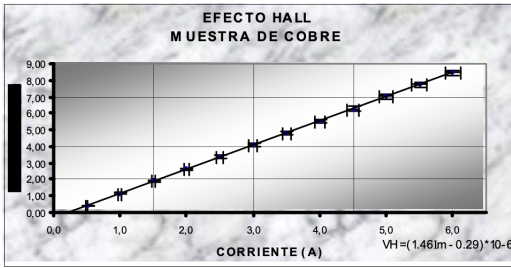


Figura 6: Efecto Hall sobre la muestra de Cobre. En el eje y, el voltaje Hall, en el eje x la corriente en la película (Im). *Imagen tomada del artículo:*[5]

Como se menciono anteriormente ya teniendo la constante Hall (R_H) o las pendientes de las rectas ajustadas de los graficos 6 y 7 se obtuvieron diferentes características eléctricas de cada muestra en la figura 8 se muestran estos resultados tanto para las muestras de cobre (Cu) y de zinc (Zn).

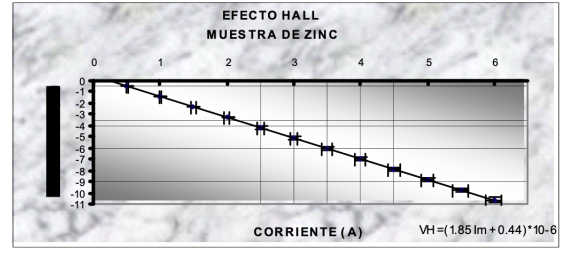


Figura 7: Efecto Hall sobre la muestra de Zinc En el eje y, el voltaje Hall, en el eje x la corriente en la película Im. *Imagen tomada del artículo:*[5]

Parámetros	Cobre	Zinc
Espesor (d)	$d = 18 \cdot 10^{-6} \text{ m}$	$d = 25 \cdot 10^{-6} \text{ m}$
Constante Hall	$R_H = (1,64 \pm 0,02) \cdot 10^{-10} \text{ m}^3 / \text{C}$	$R_H = (-2,88 \pm 0,05) \cdot 10^{-10} \text{ m}^3 / \text{C}$
Concentración de portadores de carga	$N = (3,81 \pm 0,04) \cdot 10^{28} \text{ huecos} / \text{m}^3$	$N = (2,16 \pm 0,03) \cdot 10^{28} \text{ electrones} / \text{m}^3$
Resistividad ρ (Ohm · m)	$\rho = (1,160 \pm 0,004) \cdot 10^{-8} \text{ Ohm} \cdot \text{m}$	$\rho = (3,028 \pm 0,006) \cdot 10^{-8} \text{ Ohm} \cdot \text{m}$
Movilidad μ ($\text{m}^2/\text{Ohm} \cdot \text{C}$)	$\mu = (0,141 \pm 0,002) \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{Ohm} \cdot \text{C}$	$\mu = (9,51 \pm 0,18) \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{Ohm} \cdot \text{C}$

Figura 8: Características dimensionales y eléctricas de los Materiales (Cobre y Zinc) *Imagen tomada del artículo:*[5]

Los Autores del artículo destacan que sus resultados obtenidos experimentalmente son contradictorios con respecto a otras publicaciones y textos que afirman lo contrario sin embargo explican esto mismo mediante la distribución electrónica de los elementos (en éste caso Zinc y Cobre).

Para el caso del Cobre (Cu) parten de su numero atómico el cual es el 29; sus dos últimos niveles de energía son $4s^1$ y $3d^{10}$. Teniendo lo anterior en cuenta argumentan que ya que el nivel $3d^{10}$ está completamente lleno, la conducción se lleva a cabo en el nivel $4s^2$ (el cual está conformado por dos estados energéticos); en el Cobre, éste nivel consta únicamente de un electrón, por lo cual hay un estado libre. En el proceso de acoplamiento entre dos átomos de Cobre, el electrón del estado $4s^1$ pasará de uno de uno de los átomos al estado $4s^1$ del átomo adyacente y así sucesivamente, de tal manera que aparecen estados energéticos vacíos (huecos) en la banda de conducción.

Para el caso de la muestra de Zinc (Zn) su numero atómico es el 30 y sus dos últimos niveles energéticos son $4s^2$ y $3d^{10}$ y como estos niveles están llenos energicamente, la conducción se da por medio de electrones.

Para el artículo: Resistividad eléctrica y Efecto Hall en películas delgadas de ZnO depositadas por evaporación reactiva.

Con los datos de transmitancia medidos de las muestras de películas delgadas se realizo el gráfico de la figura 9, donde se muestra tres curvas, cada una corresponde a una muestra con diferente presión parcial de oxígeno al momento del deposito. Podemos observar que la presión parcial de oxígeno afecta significativamente la transmitancia, especialmente en las regiones azul y verde del espectro visible. Las películas de ZnO preparadas a grandes presiones de oxígeno presentan alta transmitancia en la región

espectral correspondiente a la azul, indicando que en este tipo de muestras la absorción de los fotones es asociada a transiciones fundamentales y existencias de bandas de absorción dentro del gap.

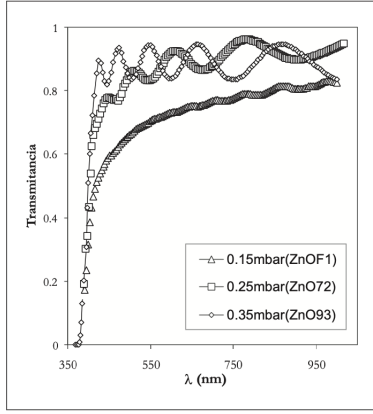


Figura 9: Efecto de la presión parcial de oxígeno sobre la transmitancia espectral. *Imagen tomada del artículo:*[6]

Para el caso de los datos de la variación de la resistividad con respecto a la temperatura se obtuvo la gráfica de la figura 10, donde se puede observar que para altas temperaturas las tres muestras presentan resistividades similares esto indica que la resistividad de películas delgadas de ZnO depositadas por evaporación reactiva está afectada básicamente por la concentración de portadores libres causadas por vacancias de oxígeno y por la densidad de portadores atrapados en estados de frontera de grano.

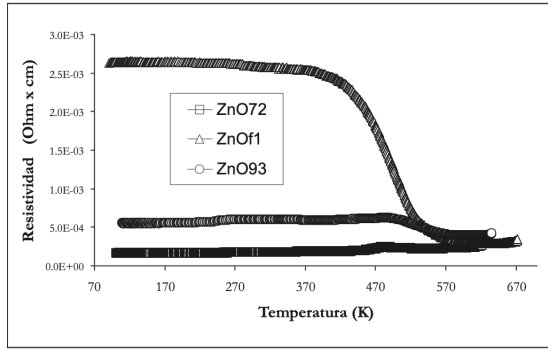


Figura 10: Variación de la resistividad en dependencia de la temperatura de películas delgadas de ZnO depositadas a diferentes presiones parciales de O₂ *Imagen tomada del artículo:*[6]

Para las medidas de efecto Hall se utilizó la configuración de la figura 11, posteriormente se llevó a cabo con las 8 mediciones el cálculo del coeficiente Hall con las relaciones 4 y 5.

$$R_{HC} = \frac{d(V_{4-2+} - V_{2-4+} + V_{2-4-} - V_{4-2-})}{BI} \quad (4)$$

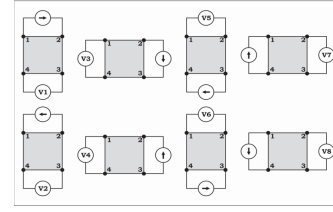


Figura 11: Esquema de las ocho configuraciones de medición del voltaje Hall por el método de van der Pauw. *Imagen tomada del artículo:*[6]

$$R_{HD} = \frac{d(V_{3-1+} - V_{1-3+} + V_{1-3-} - V_{3-1-})}{BI} \quad (5)$$

Donde R_{HC} y R_{HD} son los coeficientes Hall, V representa los voltajes medidos, I la corriente que se le aplica a la muestra y B el campo magnético.

Los resultados reportados por los autores se presentan en la tabla de la figura 12, en esta se encuentran los valores de presión parcial PO₂, resistividad ρ , cantidad de portadores de carga N y figura mérito ϕ para cada una de las tres muestras de películas delgadas.

Muestra	PO ₂ (mbar)	ρ ($\Omega \times \text{cm}$)	N (cm ⁻³)	fig. mérito $\phi = (T/\rho)$
ZnOF1	0.15	2.7×10^{-3}	1.51×10^{19}	259.2
ZnO72	0.25	3.4×10^{-4}	1.68×10^{19}	2441.1
ZnO93	0.35	6.4×10^{-4}	3.40×10^{19}	1468.7

Figura 12: Efecto de la presión parcial de oxígeno sobre las propiedades eléctricas de películas delgadas de ZnO *Imagen tomada del artículo:*[6]

La figura mérito como se puede ver en la figura 12 es el cociente de la transmitancia entre la resistividad esto es así ya que generalmente cuando aumenta la conductividad, disminuye la cantidad de luz que llega a pasar a través de la muestra por lo que la figura mérito ϕ se utiliza para evaluar la calidad de la película delgada crecida.

Con los resultados anteriormente expuestos en este trabajo nos podemos dar cuenta de que se observa que para altas conductividades eléctricas de las películas de óxido de zinc (ZnO) son causadas fundamentalmente por una concentración de portadores libres generados por vacancias de oxígeno.

En el caso de la transmitancia es claro que a presiones del orden de 0.35mbar se logran valores muy altos en el rango del azul (94%); sin embargo la mejor figura mérito ϕ la obtuvieron a presiones del orden de 0.25mbar por que a estas presiones se obtienen los mínimos valores de conductividad. También se reporta que existe poca movilidad de portadores de carga en las muestras esto es así por su carácter degenerado y limitado por su interacción con impurezas ionizadas.

5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Como se puede constatar los dos artículos analizados en este trabajo presentan dos metodologías diferentes de ob-

tención de datos para las medidas Hall, por un lado el primer artículo (Venegas y Col. 2002) utilizan un dispositivo eléctrico, mientras que en el segundo artículo (Mesa y Arredondo 2010) optan por el método de van der Pauw siendo este segundo el que se obtienen mediciones más finas por su habilidad de medir exactamente las propiedades de una muestra de cualquier forma arbitraria, mientras la muestra sea aproximadamente bidimensional (*en este caso las muestras del artículo lo eran por su geometría plana*).^{pdf}

Por otro lado los dos artículos llegan a resultados similares ya que ambos grupos de investigación estudiaron las propiedades eléctricas de películas delgadas de Zn y aunque sus resultados se puedan considerar como respaldo para afirmar que el experimento y lo obtenido en cada artículo es confiable, la metodología que considero como mejor lograda es la de (Venegas y Col. 2002) esto es por que en este no solo podemos encontrar los resultados, así como los parámetros del depósito sino que para poder explicar los resultados se recurre a la interpretación electrónica de los materiales de los elementos que se utilizaron para el crecimiento de las películas delgadas tanto de Cu y Zn.

REFERENCIAS

- [1] Edward M Purcell and David J Morin. *Electricity and magnetism*. Cambridge University Press, 2013.
- [2] Rekha P Upadhye, VL Kalyane, Vijai Kumar, and ER Prakasan. Scientometric analysis of synchronous references in the physics nobel lectures, 1981-1985: A pilot study. *Scientometrics*, 61(1):55–68, 2004.
- [3] Jacques Livage. Optical and electrical properties of vanadium oxides synthesized from alkoxides. *Coordination chemistry reviews*, 190:391–403, 1999.
- [4] J Livage, G Guzman, F Beteille, and P Davidson. Optical properties of sol-gel derived vanadium oxide films. *Journal of sol-gel science and technology*, 8(1-3):857–865, 1997.
- [5] AA Venegas, N Alba, E Munévar, JM Florez, and MH González Y CE Jacome. Caracterización eléctrica de muestras de cobre y zinc por medio del efecto hall. *Revista colombiana de física*, 34(1):262, 2002.
- [6] Fredy Giovanni Mesa Rodríguez, Carlos Andrés Arredondo Orozco, et al. Resistividad eléctrica y efecto hall en películas delgadas de zno depositadas por evaporación reactiva. *Avances: Investigación en Ingeniería*, 1 (13):15–19, 2010.