

# **IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONMUTACIÓN PARA MEDICIÓN DE EFECTO HALL USANDO MYOPENLAB**

## *IMPLEMENTATION OF A HALL EFFECT MEASUREMENT SYSTEM USING MYOPENLAB*

### ***Ismael Lara Velázquez***

Tecnológico Nacional de México / IT de San Luis Potosí, México  
*ismael.lv@slp.tecnm.mx*

### ***Elizabeth Rivera Bravo***

Tecnológico Nacional de México / IT de San Luis Potosí, México  
*elizabeth.rb@slp.tecnm.mx*

### ***Patricia Méndez Ortiz***

Tecnológico Nacional de México / IT de San Luis Potosí, México  
*patricia.mo@slp.tecnm.mx*

### ***Rubén Iván Rodríguez Blanco***

Tecnológico Nacional de México / IT de San Luis Potosí, México  
*L1518038@slp.tecnm.mx*

### ***Flavio Isaías Torres Torres***

Tecnológico Nacional de México / IT de San Luis Potosí, México  
*L1518049@slp.tecnm.mx*

**Recepción:** 24/noviembre/2023

**Aceptación:** 29/abril/2024

## **Resumen**

Este trabajo reporta la construcción de un sistema electrónico controlado por una interfaz gráfica para medir el efecto Hall por el método de Van der Pauw. Con este método se pueden determinar parámetros como: resistividad, movilidad y densidad de portadores de una muestra semiconductor. Se diseñó un programa de interfaz gráfica en MyOpenLab, donde se visualizan parámetros de entrada que se ejecutan y procesan, además de que registran los datos en el programa para la obtención de las propiedades del efecto Hall. Para la obtención de estos parámetros se utiliza la técnica de cuatro puntas en donde se tienen cuatro contactos sobre la muestra, dos de ellos para el suministro de corriente y los otros dos para la medida del voltaje. El

hardware se diseñó la tarjeta con base en un microcontrolador que permite la conmutación de micro relevadores para realizar el proceso de medición Hall.

**Palabras Clave:** Hall, Micro relevadores, MyOpenLab, Microcontrolador.

## **Abstract**

*This work reports the construction of an electronic system controlled by a graphical interface to measure the Hall effect by the Van der Pauw method. With this method, parameters such as: resistivity, mobility and carrier density of a semiconductor sample can be determined. A graphical interface program was designed in MyOpenLab, where input parameters that are executed and processed are displayed, in addition to recording the data in the program to obtain the properties of the Hall effect. To obtain these parameters, the four-point probe technique is used where there are four contacts on the sample, two of them for the current supply and the other two for the voltage measurement. In the hardware part, the card was designed based on a microcontroller that allows the switching of microrelays to carry out the Hall measurement process.*

**Keywords:** Hall, Microrelay, MyOpenLab, Microcontroller.

## **1. Introducción**

Los materiales semiconductores son muy importantes en la microelectrónica moderna, por sus características optoelectrónicas. La calidad y las características de los semiconductores dependen en gran medida del sustrato que es una oblea de material cristalino, basándose en este material semiconductor que es donde se depositan películas gruesas o delgadas según el espesor de esta. En estas películas se pueden obtener una cantidad de portadores electrónicos, que se ve reflejado en conductividad, resistividad eléctrica [Geng, 2022] y movilidad. Estos parámetros son de gran importancia, ya que es posible calcular la concentración de portadores que es fundamental para determinar las propiedades ópticas y eléctricas de materiales semiconductores [Nayak, 2016].

El modelo característico para interpretar el fenómeno de la conducción en un semiconductor es la ley de Ohm, como muestra la ecuación 1, que se puede escribir

de la forma. Donde  $J$  es la densidad de corriente en una localización dada en el material resistivo,  $E$  es el campo eléctrico en esa localización y  $\sigma$  es la conductividad.

$$J = \rho E \quad (1)$$

La ecuación 1 se puede presentar de una manera que involucre la resistencia del material, comúnmente se escribe como la ecuación 2. Donde  $\rho$  es la resistividad que es igual a la resistencia  $R$  en un área  $A$  por unidad de longitud  $L$ .

$$R = \frac{V}{i} \quad (2)$$

El efecto Hall descubierto por Edwin H. Hall, es una consecuencia de una corriente eléctrica que circula por un material conductor o semiconductor de forma rectangular, si la muestra se coloca dentro de un campo magnético perpendicular a la superficie aparece una fuerza de Lorentz como se indica en la ecuación 3, en donde la fuerza actúa sobre los portadores de carga libres del material. Donde  $i$  es la corriente,  $B$  es la densidad de campo magnético,  $\omega$  es el ancho de la muestra,  $t_s$  es el espesor y  $n$  es la densidad de portadores de carga por unidad de volumen.

$$F = \frac{iB}{\omega t_s n} \quad (3)$$

Esta fuerza hace que se desplacen portadores de carga hacia los extremos laterales de la muestra de acuerdo con el sentido del campo y la corriente que circula, de tal manera que aparece un voltaje llamado voltaje Hall  $V_H$  en los extremos de la muestra. El efecto Hall se utiliza para distinguir si un semiconductor es un material con impurezas donadoras (tipo n) o es un material semiconductor con impurezas aceptoras (tipo p), La muestra se presenta de forma rectangular y en la periferia se localizan cuatro contactos, dispuestos de la siguiente manera, dos son para suministrar corriente y otros dos para medir el voltaje Hall como se muestra en la ecuación 4 [Ferreira, 2021].

$$V_H = \frac{R_H i B}{t_s} \quad (4)$$

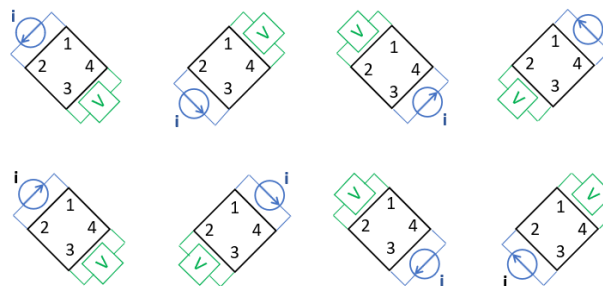
Esta técnica se llama método de cuatro puntas, pero en la técnica de Van der Pauw [García, 2021], la diferencia es que se llevan a cabo una serie de conmutaciones de

corriente y medida de voltaje en la muestra sin y con campo magnético en dirección norte-sur ( $\odot$ ) y sur-norte ( $\otimes$ ), esto se hace para cancelar efectos no deseados como voltajes debidos a la dispersión de corriente y efectos termomagnéticos logrando obtener mayor precisión en la determinación de la concentración de portadores y reconocer la resistividad y movilidad del material.

$R_H$  se conoce como coeficiente Hall ecuación 5 [Pulzara, 2019], si es negativo los portadores de carga son electrones y si es positivo los portadores de carga son huecos y este coeficiente está en términos del producto inverso de la densidad de carga por la carga eléctrica. Donde,  $q$ : es el valor de la carga de un electrón  $q = 1.6 \times 10^{-19} C$ .

$$R_H = \frac{1}{nq} \quad (5)$$

Con la técnica Van der Pauw se colocan cuatro contactos óhmicos en los extremos de una muestra de preferencia rectangular etiquetados como 1, 2, 3 y 4. En dos de estos se suministra una corriente y en los contactos vecinos opuestos se mide el voltaje, usando este método, la resistividad puede ser derivada de un total de ocho mediciones llamadas estados. Para los cambios de posición de las conexiones a los contactos sin la presencia del campo magnético, la corriente se aplica en 4 estados en un sentido horario y en los otros 4 restantes en un sentido antihorario obteniendo un total de 8 mediciones, figura 1.

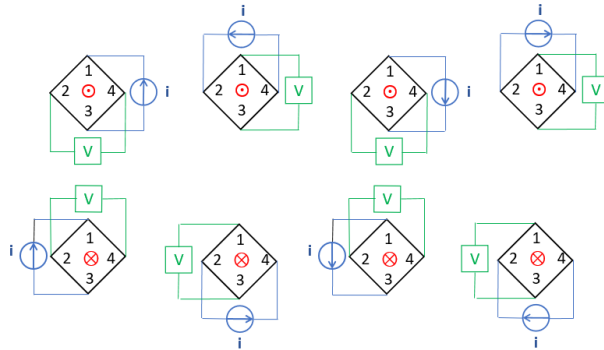


Fuente: elaboración propia.

Figura 1 Configuración en Van der Pauw sin campo magnético.

Para medir la concentración de portadores y la movilidad, los cambios de posición de las conexiones a los contactos con el método de Van der Pauw, el campo

magnético se aplica en forma perpendicular a la muestra y la corriente se suministra entre los contactos opuestos en un sentido horario y antihorario denotado el campo magnético por un punto que sale de la muestra y de la misma manera se suministra corriente entre los contactos, pero invirtiendo el campo magnético saliendo de la muestra el cual se indica por la cruz, como se puede observar en la figura 2.



Fuente: elaboración propia.

Figura 2 Configuración en Van der Pauw con campo magnético.

De las combinaciones de voltaje registradas a través de los contactos mostrados como  $V_{iV}$ , donde el subíndice  $i$  denota la corriente entre los contactos y  $V$  el voltaje medio entre los contactos de la muestra. De los voltajes registrados y con el dato del espesor de la muestra se realiza el cálculo para determinar los dos valores de resistividad usando las relaciones de las ecuaciones 6 y 7, donde  $\rho_A$  y  $\rho_B$  son las resistividades en  $\Omega - cm$ ,  $t_s$  es el espesor de la muestra en  $cm$ . Los valores  $f_A$  y  $f_B$  son los factores geométricos de la muestra, basados en la geometría de esta.

$$\rho_A = \frac{\pi}{\ln 2} f_A t_s \frac{(V_{21,34} - V_{12,34} + V_{32,41} - V_{23,41})}{i} \quad (6)$$

$$\rho_B = \frac{\pi}{\ln 2} f_B t_s \frac{(V_{43,12} - V_{24,12} + V_{14,23} - V_{41,23})}{i} \quad (7)$$

Los términos  $Q_A$  y  $Q_B$  de las ecuaciones 8 y 9 relacionan la razón de las dos resistencias y definen la homogeneidad de las muestras.

$$Q_A = \frac{V_{21,34} - V_{12,34}}{V_{32,41} - V_{23,41}} \quad (8)$$

$$Q_B = \frac{V_{43,12} - V_{34,12}}{V_{14,23} - V_{41,23}} \quad (9)$$

Si  $Q$  resulta menor que 1 se trata de muestras no homogéneas y se desechan las lecturas, con los valores conocidos  $\rho_A$  y  $\rho_B$ , la resistividad promedio ( $\rho_{promedio}$ ) se determina mediante la ecuación 10.

$$\rho_{promedio} = \frac{\rho_A + \rho_B}{2} \quad (10)$$

Para el efecto Hall el coeficiente, la resistencia y el voltaje:

- Con campo magnético norte-sur  $\odot$ , ecuación 11, saliendo de la superficie.

$$R_{H_1} = \frac{2.5 \times 10^7}{Bi} t_s (V_{31,42} - V_{13,42} + V_{13,42} - V_{31,42}) \quad (11)$$

- Con el campo magnético sur-norte  $\otimes$ , ecuación 12, entrando a la superficie.

$$R_{H_2} = \frac{2.5 \times 10^7}{Bi} t_s (V_{42,13} - V_{24,13} + V_{24,13} - V_{42,13}) \quad (12)$$

Donde  $R_{H_1}$  y  $R_{H_2}$  son los coeficientes Hall resultantes con diferente orientación del campo magnético en  $\frac{cm^3}{c}$ ,  $B$  es el flujo magnético Gauss. De estos parámetros se obtiene el coeficiente Hall promedio [Hernández, 2022], ecuación 13.

$$R_H = \frac{R_{H_1} + R_{H_2}}{2} \quad (13)$$

La movilidad se obtiene de ecuaciones 10 y 13 como se muestra en ecuación 14.

$$\mu_H = \frac{R_{H_{promedio}}}{\rho_{promedio}} \quad (14)$$

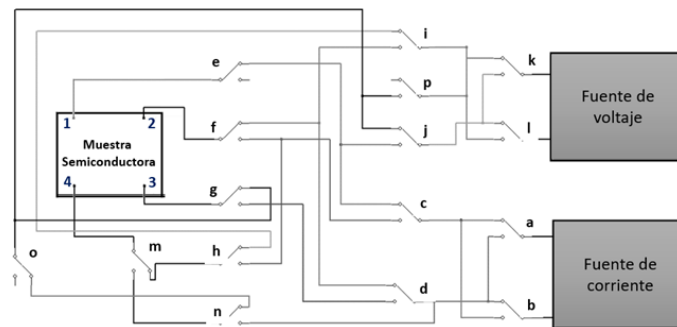
La concentración de portadores de carga  $n$  se obtiene de la ecuación 15, el signo (-) indica los que predominan con carga negativa tipo  $n$  y, el signo (+) los mayoritarios del tipo  $p$ , solo si la densidad de carga es mayor a  $10^{16}$ .

$$n = \frac{1}{(q \rho_{promedio})} \quad (15)$$

## 2. Métodos

El medidor de voltaje y la fuente de corriente están conectados en la configuración que se presenta en el arreglo de la conmutación de los relevadores de la figura 3 que corresponde al esquema de los contactos (1-4) de la muestra

semiconductora de GaAs [Rasero, 2021], el cambio para el flujo de corriente y medición del voltaje se lleva a través de los micro relevadores, etiquetados de (a-h y m-n), para realizar la medición de voltaje se realiza a través de la conmutación de los relevadores (j-l y o-p).



*Fuente: elaboración propia.*

Figura 3 Diagrama para conexiones de Van der Pauw.

Para que la corriente circule a través del circuito y se asegure que pase por la muestra, se utilizó una fuente controlada por voltaje empleando la configuración del amplificador operacional de voltaje corriente con carga flotante. La intensidad se fija con el microcontrolador con salida de modulación por ancho de pulso (PWM). La corriente máxima generada es de 20 mA para evitar que el amplificador trabaje sin saturarse para no dañar las muestras semiconductoras.

Cada lectura de voltaje corriente corresponde a un estado de conmutación en la combinación de los 16 micro relevadores en donde la corriente circula en sentido de las manecillas de reloj o inverso, todo esto se hizo con el microcontrolador y este mismo envía los datos recibidos a la interfaz gráfica, la corriente que se suministra en la muestra es enviada y seleccionada a través de la interfaz gráfica, que manda una señal al micro para que este lo procese y retroalimente la corriente. Para la medición del voltaje se utilizó un canal analógico del microcontrolador con una resolución de 12 bits.

## Software

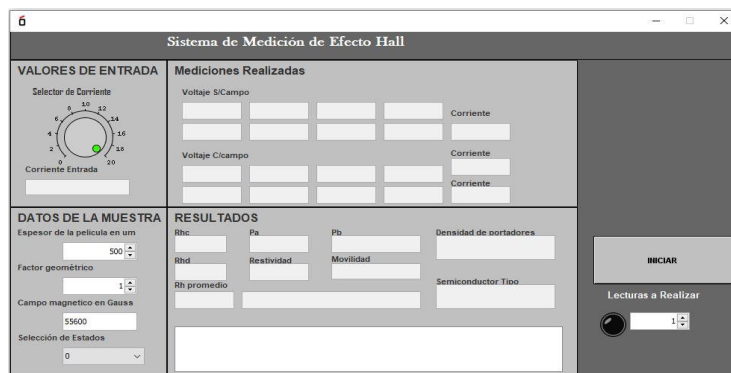
El software de MyOpenLab [Aguirre, 2021] es un entorno de programación visual escrito en Java, es multiplataforma, puede ejecutarse en Linux, Windows o MAC,

orientado a aplicaciones de modelado y simulación. Ejecuta varias líneas en paralelo y permite una comunicación serial (USB UART) con microcontroladores, usando bloques que llevan funcionalidades y conexiones específicas.

MyOpenLab es una alternativa gratuita libre de código abierto. La programación es por bloques y cuenta con un panel frontal donde se ubican los controles e indicadores; y el panel del circuito donde se encuentran los bloques funcionales que permiten la lógica entre los elementos del programa. En el proyecto se tomó la ventaja de esta interfaz para controlar la tarjeta de conmutación, el suministro de corriente y la medición de voltaje, la conexión entre la aplicación gráfica de MyOpenLab se hace por medio de un módulo de comunicación RS232. El microcontrolador recibe los datos del software como serían los datos determinados por el usuario a través de una entrada interactiva en el panel frontal, el cual se comunica con el dispositivo con una cadena de caracteres que manda MyOpenLab. La corriente continuamente se monitorea para disminuir variaciones y evitar lecturas falsas al emplearlas en las ecuaciones. En el registro de los voltajes se ajustó a un arreglo de cadena de texto donde el programa separa la cadena y muestra los datos en la interfaz. Posteriormente continúa con las instrucciones, realiza la conmutación de los relevadores y procede a registrar las mediciones, y a guardar los datos en un arreglo. Los datos de entrada se definen por el usuario en el panel frontal como son el espesor de la película semiconductor con control numérico, teniendo en cuenta que las unidades son en micras, el factor geométrico considerando una muestra homogénea de valor 1 y la magnitud del campo magnético es constante con un valor de  $0.5 \text{ Tesla} = 5000 \text{ Gauss}$ . En la sección de análisis el programa registra las lecturas por cada estado, cada lectura registrada es el promedio del número de lecturas registradas por el puerto analógico. En el programa ejecuta la conmutación entre los voltajes de 1 a 4 en sentido de las manecillas del reloj y después en contra, los primeros cuatro estados que corresponde a la medida sin campo magnético, en donde inicia el programa con la corriente aplicada en el sentido horario, terminando los 4 estados repite la medición, pero aplicando la corriente en el sentido inverso. El programa permite hacer las lecturas con campo magnético cuando está deshabilitado el botón (sin campo magnético), pero si se habilita el botón con campo



magnético se aplican 8 estados, 4 con campo magnético y aplicando en el sentido horario la corriente y en los otros 4 estados se pide invertir el flujo magnético, esto se logra rotando físicamente la posición de los imanes y el programa invierte el sentido de la corriente. Los voltajes con y sin campo magnético se indican en arreglo tipo tabla dentro del programa, así como la corriente aplicada, debajo de la tabla se visualizan indicadores numéricos de voltaje y corriente que registran los voltajes en cada estado, así como la corriente aplicada. En la sección de salida se encuentran los valores que son los resultados de las ecuaciones 1 a 8, en estos se muestra la resistencia Hall promedio  $R_H$  y parciales  $R_{H1}$  y  $R_{H2}$  La resistividad promedio  $\rho$  y las parciales  $\rho_A$ ,  $\rho_B$  finalmente se muestran los indicadores de movilidad y de densidad de portadores. En la parte de debajo de la interfaz, se localizan dos señalizadores de texto, en un indicador se visualiza la etapa de la medición en donde muestra en que contactos se está aplicado la corriente, y en el segundo se visualiza el tipo de dopaje si es tipo n o tipo p de acuerdo con el signo de la ecuación 15, si el cálculo arroja que la densidad es inferior a  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , aparece un mensaje que indica que la muestra es intrínseca. En la interfaz gráfica que es la que se muestra en la figura 4, se visualizan los voltajes medidos, así como las características de la muestra semiconductor que se está midiendo, además de que permite guardar los datos en un archivo (.csv) o un documento de texto (.txt).

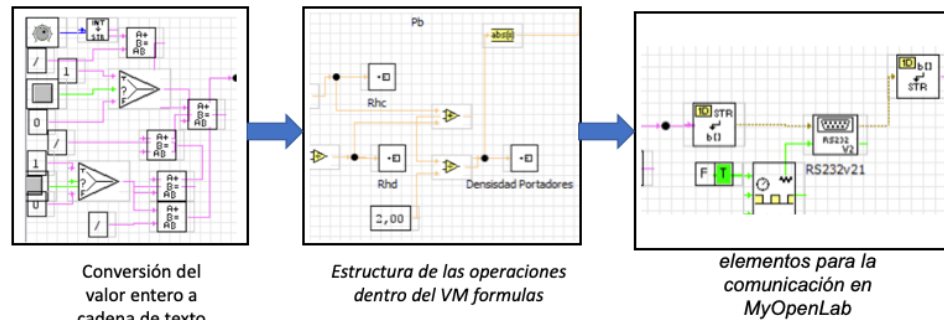


Fuente: elaboración propia.

Figura 4 Interfaz del programa de MyOpenLab.

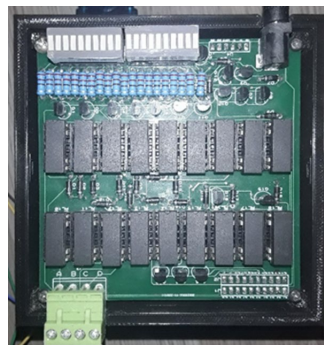
En la figura 5 se señala el circuito que corresponde a la programación por bloques, cada bloque representa una función diferente, empezando con la función de enviar,

esta función lo que hace es formar una cadena de caracteres con el botón iniciar y restablecer la manija para controlar la corriente. Esa salida se conecta al adaptador del puerto RS232 [Ariza, 2019], después de la corriente se toma un registro de lecturas a realizar en cada estado, posteriormente aparece el bloque de fórmulas en donde se procesan los resultados y enseguida el bloque de guardar, este recibe información de los bloques y fórmulas para guardar los datos que realizan toda la lógica de la programación de la lectura de los voltajes. En la figura 6 se muestra la tarjeta electrónica del circuito conmutador que se fabricó, esta tarjeta se conecta microcontrolador PIC18F4550 [Fatma, 2019] y permite la conmutación de micro relevadores HE721C0500.



Fuente: elaboración propia.

Figura 5 Diagrama de bloques de la programación en MyOpenLab.



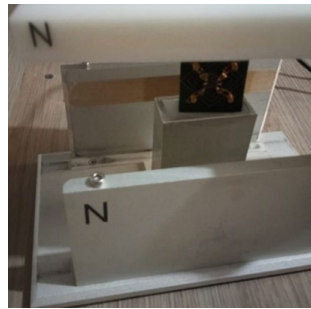
Fuente: elaboración propia.

Figura 6 Circuito Impreso de la conmutación de los microrelevadores.

De acuerdo con la programación para el suministro de corriente y lectura de voltaje, se comprueba la activación de los micro relevadores con LED's tipo barra que permiten identificar el encendido de estos dispositivos, los cuales se disparan con

un transistor por cada relevador. En la clema se encuentra la salida para conectar una placa donde se encuentra los contactos de la muestra semiconductor.

En la figura 7 se muestra la base del soporte del imán. El portamuestra con la placa semiconductor se introduce en el centro de la base perpendicular al imán, para realizar las mediciones con campo magnético, la inversión de los polos del campo se realiza en forma manual girando el imán. Para las mediciones sin campo magnético se retira el imán. En la figura 8 se observa de manera detallada la colocación de la muestra semiconductor en la placa, esta cuenta con 4 pinzas ajustables con tornillos que se alargan o retraen en función de la posición del contacto. En el extremo de la placa se encuentra un peine macho que se inserta en un receptáculo, lo cual reduce la manipulación de la muestra durante la medición.



*Fuente: elaboración propia.*

Figura 7 Base magnética con portamuestra.



*Fuente: elaboración propia.*

Figura 8 Soporte de portamuestra con sus puntas de contacto.

### **3. Resultados**

La muestra utilizada en la medición corresponde a una oblea de material semiconductor de Arseniuro de Galio (GaAs) las cuales se cortaron en piezas de

tamaños de  $1 \text{ cm}^2$ . Los contactos se colocaron por soldadura que consiste en fundir pequeñas gotas de Indio (In) hasta que se derriten y funden entre sí, los contactos son la principal causa de error, ya que podrían producir resultados erróneos en la medición. Las mediciones se realizaron a temperatura ambiente, se obtuvieron los siguientes resultados que se muestran en la tabla 1 sin campo magnético y en la tabla 2 con campo magnético. La muestra que se caracterizó corresponde a una oblea de GaAs (110) donde el dato reportado por el fabricante es de  $2.9 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .

Tabla 1 Mediciones sin campo magnético. Tabla 2 Mediciones con campo magnético

Muestra (substrato de GaAs tipo N) Espesor $t_s = .5 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-3}$ ; Corriente $= 0.05 \times 10^{-3}$ ;
Voltajes sin campo magnético
$V_{12,34} = -0.02292$
$V_{21,34} = 0.0247$
$V_{23,41} = -0.01172$
$V_{23,341} = 0.01174$
$V_{34,12} = -0.02379$
$V_{43,12} = 0.024066$
$V_{41,23} = -0.01098$
$V_{14,23} = 0.01249$
$\rho = 0.0808195 \Omega - \text{cm}$ $Q_A = 2.029838$ $Q_B = 2.039028$

Fuente: elaboración propia.

Campo magnético B	Voltajes
norte sur $\odot$	$V_{13,42} = 0.0102$
norte sur $\odot$	$V_{31,42} = -0.013271$
norte sur $\odot$	$V_{24,13} = -0.01212$
norte sur $\odot$	$V_{42,13} = 0.01297$
sur norte $\otimes$	$V_{13,42} = 0.01103$
sur norte $\otimes$	$V_{31,42} = -0.014027$
sur norte $\otimes$	$V_{24,13} = -0.011512$
sur norte $\otimes$	$V_{42,13} = 0.012286$
Material semiconductor tipo P	
Coeficiente Hall	
$R_H = 7.195 \frac{\text{cm}^3}{\text{C}}$	
Densidad de carga	
$n = 8.68659 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	
Movilidad	
$\mu = 89.1793 \frac{\text{cm}^2}{\Omega \text{ C}}$	

Fuente: elaboración propia.

## 4. Discusión

El presente proyecto de investigación da oportunidad de obtener información visual de cada uno de los parámetros importantes en el efecto Hall, que es una herramienta para el conocimiento de las propiedades electrónicas de los semiconductores. Las mediciones Hall se realizaron mediante el método de Van der Pauw a temperatura ambiente. El programa de MyOpenLab desarrollado permite realizar mediciones rápidas y confiables en semiconductores dopados.

El costo de los elementos utilizados es menor en comparación con los graficadores de última generación, a los que desafortunadamente nuestra institución no tiene acceso. Por consideraciones prácticas se utilizaron de geometrías regulares con factores  $f_A = 1$  y  $f_B = 1$ .

## 5. Conclusiones

- Se diseñó e implementó el sistema de medición Hall, que aporta un beneficio notable en el laboratorio de dispositivos optoelectrónicos del Instituto Tecnológico de San Luis Potosí ITS LP-TECNM.
- Este sistema permite realizar mediciones en muestras semiconductoras con baja resistividad siempre que se cuente con los contactos adecuados y resulten óhmicos, dado que se presentan dificultades en las mediciones para muestras con alta resistividad.
- El proyecto es una mejora del expuesto en el Coloquio de Investigación Multidisciplinaria que se presentó en 2021, en la que se incluye una interfaz código abierto y en la parte del circuito de conmutación se realizan las mediciones en una placa electrónica.
- Es importante aclarar que la comparación no se hizo contra otro instrumento, ya que no se contó con instituciones de educación superior que realicen experimentos con sistemas similares en la ciudad y solo se compara con los datos de la oblea semiconductor reportada por el fabricante.
- En la parte del software se tiene que trabajar en mejorar la interpretación de la información de comunicación entre la interfaz y el software MyOpenLab, porque en ciertas rutinas el programa se bloquea y se tiene que reiniciar, no es muy común, pero sí se presenta. Esto es en parte a que es un software de arquitectura abierta que no ha sido muy utilizado de manera común.
- En un futuro se pretende aumentar el rango de medidas de resistividad para valores inferiores si se adquiere un electrómetro y una fuente de corriente y agregar un sistema criogénico para realizar las mediciones a diferentes temperaturas.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] Aguirre, C. C.; Morocho, L. M.; Malla, E. E. G. Línea de Cerveza Artesanal Con Control Proporcional Integral Derivativo de Temperatura En Maceración y Fermentación. Paúl Baldeón Egas, Grisel Pérez, Julio C. Riascos, Brigitte González, Eduardo José Campechano, Bertha Ulloa Rubio, Ruth Elena Cuasialpud, Cristian Samir Ulloa y Jonnathan Opazo Hernández-Ecuador: Editorial UISRAEL, agosto 2021. 284 páginas; 21, 0 x 29, 7 cm. Libro digital-PDF, p. 161, 2021.
- [2] Ariza, H. M.; Santa, F. M.; Gómez, E. J. Implementation of Bluetooth Protocol For Scada Systems with Open Source Tools. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 12, n. 11, 2019.
- [3] Fatma, M.; Hamid, M., PWM speed control of dc permanent magnet motor using a PIC18F4550 microcontroller. IOP Publishing. 012017, 2019.
- [4] Ferreira, A. A. H. Evaluación de un montaje para la práctica de laboratorio efecto Hall en semiconductores y modificaciones para elevar su calidad. *Latin-American Journal of Physics Education*, 15, n. 1, p. 8, 2021.
- [5] García Peña, J. M. Conductividad eléctrica superficial de electrodos en capa fina de  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  en diferentes estados de carga para baterías de Li-ion. 2021.
- [6] Geng, Y., Mathematical analysis of Van der Pauw's method for measuring resistivity. IOP Publishing. 012027, 2022.
- [7] Hernández, A. Modificaciones en el planteamiento y alcance de la práctica de laboratorio Efecto Hall en Semiconductores para carreras de ingeniería. *Rev. Cubana Fis*, 39, p. 27, 2022.
- [8] Nayak, P. K. Two-dimensional Materials: Synthesis, Characterization and Potential Applications. BoD–Books on Demand, 2016.
- [9] Pulzara Mora, C. A. Aleaciones Semi-magnéticas de GaSbMn para Aplicaciones en el Desarrollo de Sensores de Campo Magnético por Efecto Hall. 2019.
- [10] Rasero, D. A.; Portacio, A. A.; Suescún, D. Estructura Electrónica de GaAs y AlAs usando un Hamiltoniano Tight-Binding sp 3 s. *Ciencia en Desarrollo*, 12, n. 2, p. 43-48, 2021.