

# Evaluación de un montaje para la práctica de laboratorio efecto Hall en semiconductores y modificaciones para elevar su calidad



ISSN 1870-9095

**Arcelio A. Hernández Fereira**

*Departamento de Física, Universidad de Cienfuegos, Carretera a Rodas Km 2, Cuatro Caminos, Cienfuegos, Cuba. CP 55100.*

**E-mail:** archdez@ucf.edu.cu

(Recibido el 12 de diciembre de 2020, aceptado el 15 de febrero de 2021)

## Resumen

Se describe el proceso de montaje y evaluación de un equipo de la firma india Ambala Electronics Instruments conforme con la documentación que lo acompañaba. La misma era muy deficiente en cuanto a los fundamentos teóricos y en los procedimientos prácticos. Al montaje original se le adicionaron dos dispositivos que permitían conmutar el sentido de la corriente por la placa semiconductor y el del campo magnético en la dirección perpendicular a ella. Esto estaba sugerido en el procedimiento para realizar las mediciones del voltaje Hall, pero sin las facilidades para realizarlas y tampoco cómo proceder con las cuatro mediciones obtenidas. Inicialmente se realizaron las mediciones y se procesaron conforme a dicha documentación. Con posterioridad se realizó el procesamiento de las mediciones para minimizar los efectos termo-magnéticos presentes que no se tomaban en cuenta en la documentación de los fabricantes. Se compararon los resultados obtenidos y se muestran las diferencias. Para el nuevo montaje se muestra cómo los resultados obtenidos tienen buena correspondencia con los datos reportados en la literatura.

**Palabras clave:** práctica de laboratorio efecto Hall, semiconductores, modificaciones para elevar su calidad.

## Abstract

In the paper is described the assembly process and evaluation of an equipment of the Indian firm Ambala Electronics Instruments consistent with the documentation that accompanied it. The documentation was very poor in terms of the theoretical foundations and practical procedures. To the original assembly were added two devices permitting switch the direction of current by the semiconductor plate and the magnetic field in the direction perpendicular thereto. This was suggested in the procedure for measurement of the Hall voltage, but without the facilities to perform, nor how to proceed with the four measurements obtained. Initially, measurements were made and processed as indicated in that documentation. Later, subsequent processing of the measurements was performed to minimize the present thermo-magnetic effects that were not taken into account in the documentation of the manufacturers. The results were compared and differences were shown. For the new assembly was shown how obtained results have a good degree of correspondence with the data reported in the literature.

**Keywords:** lab practice, Hall Effect, semiconductors, modifications for increasing quality.

## I. INTRODUCCIÓN

El Departamento de Física y Matemática de la Universidad de Ciencias de la Educación de Bindura en Zimbabue adquirió un equipo de laboratorio para el estudio del efecto Hall de la firma india Ambala Electronics Instruments. El equipo fue montado conforme se especificaba en la documentación que lo acompañaba, se realizaron las corridas experimentales y se valoraron los resultados obtenidos.

Estos, si bien permitían mostrar la dependencia lineal del voltaje Hall con la intensidad corriente y la magnitud del campo magnético exhibían una falta de concordancia con los valores de las propiedades que se podían deducir de ellos para el semiconductor. La documentación era muy deficiente tanto en los fundamentos teóricos como en los procedimientos prácticos. En los fundamentos teóricos no se contemplaba el efecto de los llamados fenómenos termo-

magnéticos que acompañan al efecto Hall (que es un fenómeno galvano-magnético) y sólo se mencionaba el efecto del llamado potencial cero que surge por el no alineamiento de los contactos transversales al sentido de circulación de la corriente. En el manual se recomendaba realizar las mediciones del voltaje Hall conmutando el sentido de la corriente por la placa semiconductor y el del campo magnético aplicado en la dirección perpendicular a ella, pero el equipo no contaba con las facilidades para realizar dichas conmutaciones, ni tampoco especificaba cómo proceder con las cuatro mediciones obtenidas. Al equipo se le adicionaron dos dispositivos confeccionados con un par de interruptores doble polo-doble tiro con los cuales se podían realizar las conmutaciones necesarias. De igual manera se realizó el procesamiento adecuado de las cuatro mediciones del voltaje para tomar en cuenta la influencia de los efectos termo-magnéticos que no se tomaba en cuenta en la documentación de los fabricantes. Los

resultados obtenidos se compararon con los datos reportados en la literatura para las propiedades del semiconductor y exhiben un buen grado de correspondencia. Se redactó una guía para la práctica con todos los elementos y quedó incluida en el sistema de prácticas del Departamento.

## II. DESARROLLO

### A. Fundamento teórico

El efecto Hall fue descubierto en 1879 por Edwin Herbert Hall mientras trabajaba en su tesis doctoral en la Universidad Johns Hopkins en Baltimore, Maryland, Estados Unidos. Hall reportó un método para determinar el signo de los portadores de carga en un conductor, haciendo uso del hecho que la deflexión de la corriente que fluye en un campo magnético tiene una dirección la cual depende de la polaridad de la carga móvil [1]. De forma similar a las mediciones de resistividad usando el método de van der Pauw, las mediciones del efecto Hall son ampliamente usadas para la caracterización de materiales en la investigación y en la industria. Las mediciones del efecto Hall continúan siendo una técnica útil para la caracterización de las propiedades de transporte eléctrico de metales y semiconductores.

El efecto Hall consiste en el surgimiento de una diferencia de potencial (o voltaje) entre los extremos opuestos de una muestra y en la dirección transversal a la dirección por la que circula una corriente cuando hay un campo magnético presente actuando en el plano perpendicular a la muestra (ver figura 1). Inicialmente el efecto Hall fue descubierto para los materiales conductores, pero luego se hizo evidente que en los semiconductores con más baja concentración de portadores era mucho más notable. Supongamos una muestra delgada rectangular de material semiconductor y establezcamos cuatro contactos en sus lados opuestos. Aplicando una diferencia de potencial entre dos de ellos podemos hacer circular una corriente  $I_H$  por la muestra. Si perpendicular al plano de la muestra actúa un campo magnético de intensidad  $B$ , entonces entre los otros dos contactos que se ubican transversales a la dirección de circulación de la corriente aparece una diferencia de potencial que se conoce como voltaje Hall ( $V_H$ ).

Como sabemos la corriente  $I_H$  es el resultado del movimiento de portadores de carga positivos de magnitud  $q$  en el sentido de la misma (o de portadores de carga negativos en el sentido contrario).

Como sabemos la corriente  $I_H$  es el resultado del movimiento.

Con la velocidad de arrastre  $V_D$ . La relación entre la intensidad de la corriente y la velocidad de arrastre es:

$$I_H = nqV_D A, \quad (1)$$

donde  $A$  es el área de la sección transversal por donde fluye la corriente y  $n$  la densidad o concentración de portadores (número de portadores por unidad de volumen).

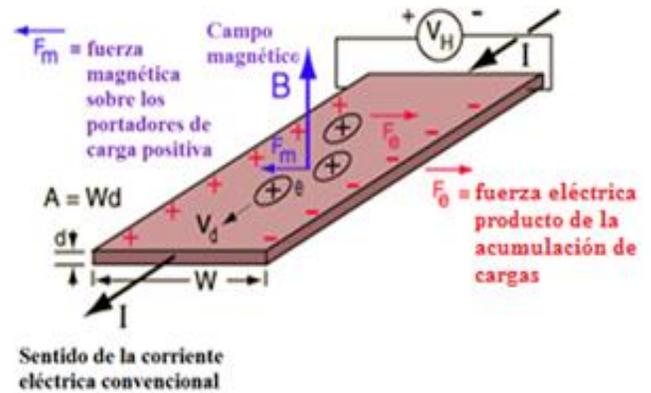


FIGURA 1. Esquema simplificado que muestra los principales elementos para explicar el efecto Hall para un semiconductor con portadores de carga positiva donde  $V_H > 0$ .

Al estar moviéndose los portadores de carga en un campo magnético aparece una fuerza magnética

$$\vec{F}_m = q\vec{v}_D \times \vec{B}, \quad (2)$$

que actúa sobre ellos que los desvía hacia la derecha. La magnitud de esta fuerza viene dada por:  $F_m = qv_D B \sin\theta$  y como  $\theta = 90^\circ$  se obtiene:  $F_m = qv_D B$ . El desvío lateral de los portadores positivos hace que se produzca una acumulación de ellos en la parte derecha y un defecto de los mismos en la contraria lo cual genera un campo eléctrico  $\vec{E}$  con sus líneas de fuerza dirigidas en el sentido contrario a la fuerza magnética. Este campo eléctrico ejerce una fuerza de origen eléctrico

$$\vec{F}_E = q\vec{E}, \quad (3)$$

sobre los portadores de carga que se opone a la fuerza magnética y es quien detiene el proceso de acumulación de cargas, alcanzándose un equilibrio. Cuando se ha establecido el equilibrio antes señalado las dos fuerzas se igualan cumpliéndose:  $q\vec{v}_D \times \vec{B} = q\vec{E}$ . De esta expresión puede obtenerse la magnitud del campo eléctrico:

$$\vec{E} = v_D \vec{B}. \quad (4)$$

De la expresión (1) se puede despejar  $V_D$  y sustituir en la (4) obteniendo:  $E = \frac{I_H B}{nqA}$ . Si el ancho de la muestra es  $L$  y su

espesor es  $d$  se puede escribir  $A = Ld$  y reemplazando en la anterior:

$$E = \frac{I_H B}{nqLd} \Rightarrow EL = \frac{I_H B}{nqd} = V_H \cdot \quad (5)$$

Esta última expresión nos indica que el voltaje Hall es directamente proporcional a la magnitud de la corriente que circula por la muestra y del campo aplicado perpendicularmente a ella e inversamente proporcional al espesor y a la densidad (o concentración) de portadores. Para los metales esta densidad es muy alta (del orden de  $10^{28}$  electrones/m<sup>3</sup>) y por eso los valores del voltaje Hall son difíciles de detectar a pesar de trabajar con campos magnéticos intensos, valores de corriente altos y muestras de espesores pequeños. Sin embargo, en los semiconductores con concentración de portadores del orden de  $10^{14}$ - $10^{19}$  portadores/m<sup>3</sup> (casi 14 órdenes menor) se pueden tener muestras no muy finas, campos no tan intensos y obtener valores del voltaje Hall medidos con un milivoltímetro.

En la expresión (5) se acostumbra a introducir el término

$$R_H = \frac{1}{nq}, \quad (6)$$

llamado coeficiente de Hall y la misma se puede escribir entonces en la forma:

$$V_H = \frac{R_H I_H B}{d}. \quad (7)$$

A su vez, si introducimos el coeficiente de proporcionalidad

$$K_H = \frac{R_H}{d} = \frac{1}{nqd}, \quad (8)$$

llamado sensibilidad de la unidad Hall, entonces la expresión (7) puede escribirse en la forma:

$$V_H = K_H I_H B. \quad (9)$$

Mientras mayor sea el valor de  $K_H$  resultará más conveniente porque la unidad será más sensible para detectar cambios en  $V_H$  con los cambios de  $I_H$  y de  $B$ . Como vemos de la expresión (8) la sensibilidad  $K_H$  de una unidad Hall depende de la concentración  $n$  de portadores de la muestra y de su espesor  $d$  que son sus características determinantes para este efecto.

Generalmente el propósito de la práctica de laboratorio dedicada al estudio del efecto Hall es determinar  $K_H$  a partir de construir las dependencias de  $V_H$  contra  $I_H$  manteniendo el valor de  $B$  constante y de  $V_H$  contra  $B$  manteniendo el valor de  $I_H$  constante, que resultan ser lineales y obtener de ambas la pendiente que es  $K_H$ . Una vez determinada experimentalmente  $K_H$ , como se conocen  $d$  y  $q$ , se puede hallar la concentración  $n$  de portadores en la muestra por simple despeje:

$$n = \frac{1}{K_H q d}. \quad (10)$$

Si se dispone del valor de la resistividad  $\rho$  de la muestra semiconductor, de la que se conoce la concentración de portadores mayoritarios ( $N_D$  o  $N_A$ ), entonces puede determinarse la movilidad dichos portadores (electrones o huecos). Para un semiconductor extrínseco las expresiones son:

$$\mu_n = \frac{1}{N_D e \rho} \text{ para electrones en muestras tipo } n, \quad (11)$$

$$\mu_p = \frac{1}{N_A e \rho} \text{ para huecos en muestras tipo } p. \quad (12)$$

## B. Efectos colaterales presentes junto al efecto hall y tratamiento

Durante la realización de las mediciones hay algunos efectos colaterales asociados a que las mediciones no se realizan isotérmicamente. Dichos efectos hacen que el valor del voltaje medido no sea únicamente debido al efecto Hall, sino que también se incluyan otros voltajes adicionales los cuales traen consigo errores en las mediciones. Tempranamente estos efectos no sólo fueron reportados en la literatura, sino que también se indicaron los procedimientos para compensar los mismos [2] y aplicados en trabajos posteriores [3, 4].

Entre los efectos colaterales están los termo-magnéticos son:

- Efecto Etinghausen debido a que los dos extremos de la placa Hall tienen diferente temperatura. Así aparecerá una diferencia de potencial eléctrico  $V_E$  debida a la diferencia de temperatura, la cual está relacionada con la corriente Hall  $I_H$  y con la dirección del campo magnético  $B$ .
- Efecto Nernst debido al paso de una corriente térmica a través de la placa Hall. aparece una diferencia de potencial  $V_N$ , la cual está relacionada con el campo magnético y la corriente térmica.
- Efecto Righi-Leduc debido a que al pasar una corriente térmica por la placa Hall, esta genera cierta temperatura en ambos extremos de la placa y se produce una diferencia de potencial por diferencia de temperatura  $V_R$ , la cual está relacionada con el campo magnético.

Aparte de estos efectos termo-magnéticos colaterales hay una diferencia de potencial  $V_0$  debida a que los puntos de medición del voltaje Hall no están estrictamente alineados a ambos lados de la muestra. Cuando la corriente Hall pasa a través de la muestra, aún sin estar actuando el campo magnético, existirá una diferencia de potencial  $V_0$  cuya polaridad cambia con el sentido de circulación de  $I_H$ .

Así, para poder contrarrestar la influencia de estos efectos colaterales los sentidos de circulación de  $I_H$  y del campo magnético  $B$  deben cambiarse durante la operación de medición. A continuación, se detallan los datos de cuatro grupos de diferencia de potenciales obtenidos al invertir tanto el sentido de la corriente  $I_H$  como del campo magnético  $B$ :

Cuando  $I_H$  es positivo y  $B$  es positivo,

$$V_1 = V_H + V_0 + V_E + V_N + V_R.$$

Cuando  $I_H$  es negativo y B es positivo,  
 $V_2 = -V_H - V_0 - V_E + V_N + V_R$ .

Cuando  $I_H$  es negativo y B es negativo,  
 $V_3 = V_H - V_0 + V_E - V_N - V_R$ .

Cuando  $I_H$  es positivo y B es negativo,  
 $V_4 = -V_H + V_0 - V_E - V_N - V_R$ .

Haciendo el siguiente cálculo con las cuatro diferencias de potenciales anteriores:

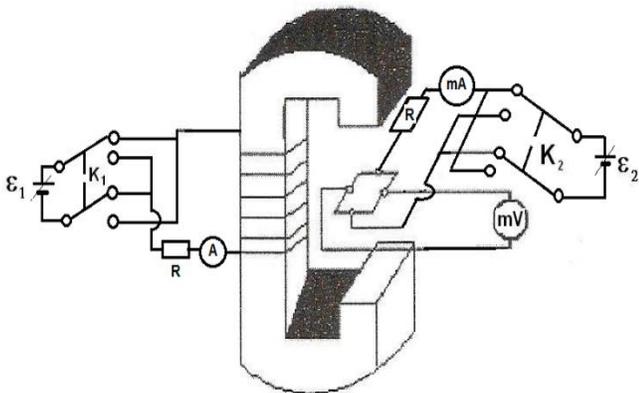
$$V = \frac{(V_1 - V_2) + (V_3 - V_4)}{4} = V_H + V_E \quad (13)$$

Debido a que la dependencia de  $V_H$  y  $V_E$  son las mismas con el sentido de la corriente de Hall y el campo magnético sus efectos no se contrarrestan con la inversión de estos. Sin embargo, generalmente  $V_H \gg V_E$  de manera que podemos despreciarlo y por consiguiente podemos hallar el voltaje Hall. El signo del voltaje Hall nos indica el signo de los portadores de carga.

En las gráficas realizaremos el ploteo del valor modular del voltaje Hall contra la corriente que circula por la placa manteniendo la intensidad el campo magnético constante en un caso y contra la magnitud del campo magnético manteniendo constante la intensidad de la corriente que circula por la placa en el otro.

**C. Materiales y métodos. descripción de la instalación experimental**

El circuito para la realización de las mediciones del voltaje Hall con posibilidad de cambiar el sentido de circulación de la corriente por la placa y el sentido del campo magnético está esquemáticamente representado en la figura 2.



**FIGURA 2.** Esquema de la instalación para medir el voltaje Hall con posibilidades de cambios en el sentido de la corriente por la placa y del campo magnético.

En la misma se puede observar un circuito que alimenta al electroimán con el cual se genera el campo magnético B que se aplica. La intensidad del campo magnético se puede variar mediante la diferencia de potencial variable  $\epsilon_1$ , la cual regula el valor de la intensidad de corriente que circula por el electroimán y que se mide con el amperímetro A. El sentido de circulación de la corriente por los devanados del electroimán se puede invertir con ayuda del interruptor doble polo-doble tiro (DP-DT)  $K_1$  y así invertir el sentido del campo magnético que actúa en la dirección normal a la placa semiconductora.

En la ranura del electroimán está colocada la placa semiconductora con cuatro terminales en sus cuatro lados opuestos. A dos de ellos está conectado un circuito con una resistencia R y una fuente de voltaje variable  $\epsilon_2$  con ayuda de la cual se hace circular la corriente  $I_H$  a través de la placa.

El valor de esta corriente se puede medir con ayuda del mili amperímetro conectado en serie. A los otros dos terminales está conectado un milivoltímetro para medir el voltaje Hall. Como se aprecia, este circuito también incluye un interruptor (DP-DT)  $K_2$  con ayuda del cual podemos invertir el sentido de la corriente por la placa.

Los equipos que componen el montaje aparecen en la figura 3. Las principales características de los equipos son las siguientes:

El electroimán **1** posee un doble enrollado, con polos de acero dulce ajustables mediante manivelas. El mismo se alimenta con una fuente **4** con salida de 90V y 6 A. El gaussímetro **2** posee dos escalas de 2 kGauss y 20 kGauss.

Su sonda es un cristal de arseniuro de galio. El cristal semiconductor para los experimentos es de germanio dopado con impurezas donoras (tipo n) con cuatro contactos tipo resorte conectados a las pistas de una placa de bakelita (vea la figura 4 donde aparecen estos elementos con mayor detalle). A estas pistas están soldados los cuatro cables para su conexión a la unidad de alimentación de la placa **3**. Esta unidad es una fuente de corriente constante en el intervalo 0-20 mA. La variación de la corriente se realiza mediante un potenciómetro y se mide en un mili amperímetro digital incluido en la unidad. De igual manera posee un milivoltímetro digital de alta precisión (inferior a 1µV) para medir el voltaje Hall.

El equipo fue montado conforme se especificaba en la documentación ofrecida por el fabricante que lo acompañaba. Sin embargo, dicha documentación en general era muy deficiente tanto en los fundamentos teóricos como en los procedimientos experimentales.

- En los fundamentos teóricos
- no se contemplaba el efecto de los llamados fenómenos termo-magnéticos que acompañan al efecto Hall (que es un fenómeno galvano-magnético)
  - sólo se mencionaba el efecto del llamado potencial cero que surge por el alineamiento imperfecto de los cuatro contactos en el cristal.



FIGURA 3. Equipos que integran el montaje para el estudio del efecto Hall: electroimán 1, gaussímetro 2, fuente estabilizada de alimentación de corriente constante 3, fuente de alimentación para el electroimán 4.

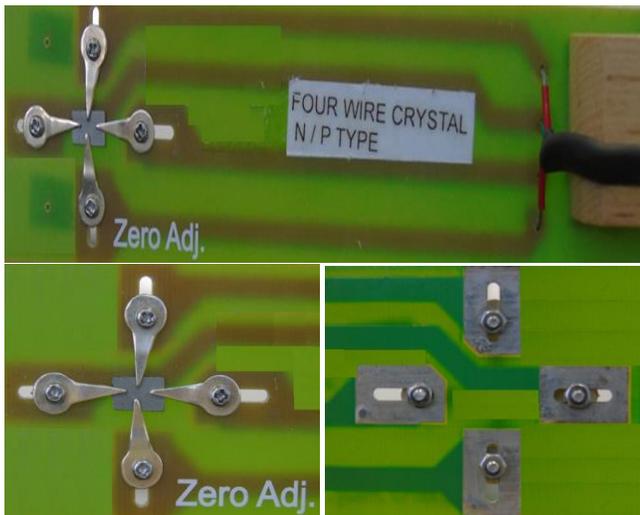


FIGURA 4. Detalles de la placa semiconductor de germanio empleada en los experimentos mostrando las posibilidades de ajustar las posiciones de los contactos sobre el cristal.

En los procedimientos prácticos

- se recomendaba realizar las mediciones del voltaje Hall conmutando el sentido de la corriente por la placa semiconductora y el del campo magnético aplicado en la dirección perpendicular a ella, pero el equipo no contaba con las facilidades para realizar dichas conmutaciones, ni tampoco especificaba cómo proceder con las cuatro mediciones obtenidas.
- no se especificaba la dirección del campo magnético a emplear, ni el sentido de circulación de la corriente por la placa, para obtener los valores correctos del voltaje Hall.
- se sugería construir las dependencias del voltaje Hall con la corriente cuando el campo magnético era constante y con el campo magnético cuando la corriente era constante, sin embargo, especificaba hacer los cálculos para la densidad de portadores de la dependencia del voltaje Hall con el campo magnético sin una fundamentación.

En los datos acerca del cristal de Germanio

- solo aparecía el tipo de semiconductor (Ge tipo n) y el espesor del cristal ( $t = 0,76 \text{ mm}$ ), no suministraba el valor de la resistividad, según debía aparecer en la misma. Ver figura 5.

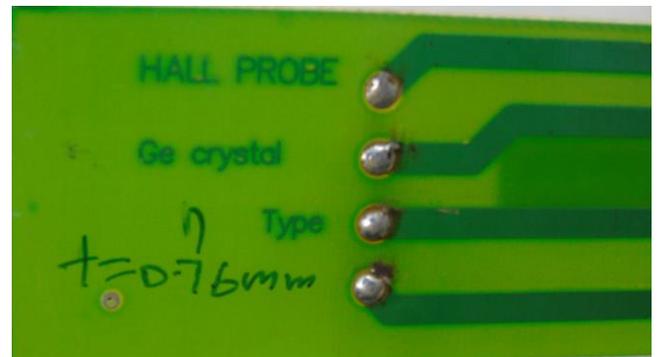
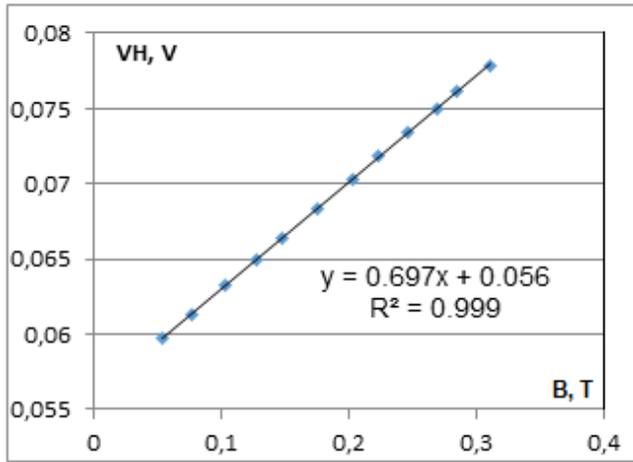


FIGURA 5. Detalles de la placa semiconductor con los datos del cristal de germanio tipo n y su espesor  $t = 0,76 \text{ mm}$ .

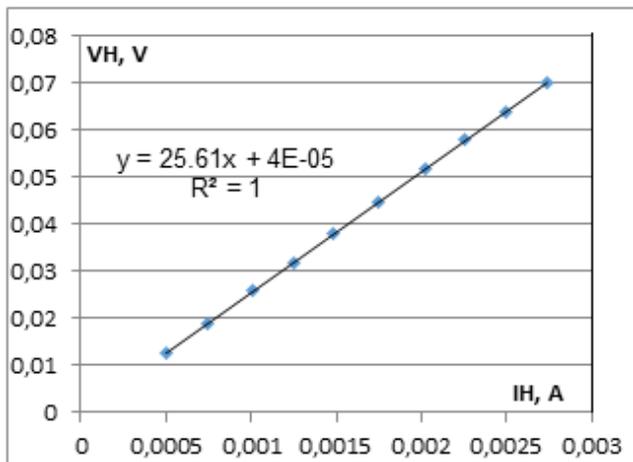
#### D. Resultados y discusión. Resultados obtenidos conforme al montaje sugerido por el fabricante

En la figura 6 aparece la gráfica de los valores del voltaje Hall  $V_H$  contra los valores de la intensidad del campo magnético cuando la intensidad de la corriente por la placa  $I_H$  permanecía constante con un valor de  $0,003 \text{ A}$ . La misma exhibe un comportamiento lineal. Allí aparece también la ecuación de la recta de ajuste y el coeficiente  $R^2$ .



**FIGURA 6.** Gráfica del voltaje Hall  $V_H$  contra el campo magnético para una corriente de placa  $I_H$  constante de 0,003 A con la ecuación de la recta de ajuste y el coeficiente  $R^2$ .

En la figura 7 se muestra la gráfica de los valores del voltaje Hall  $V_H$  contra los valores de la intensidad de la corriente  $I_H$  cuando la intensidad del campo magnético permanecía constante con un valor de 0,317 T. Esta también exhibe un comportamiento lineal. Allí aparece también la ecuación de la recta de ajuste y el coeficiente  $R^2$ .



**FIGURA 7.** Gráfica del voltaje Hall  $V_H$  contra la corriente de placa  $I_H$  con el campo magnético para un valor constante de 0,317 T con la ecuación de la recta de ajuste y el coeficiente  $R^2$ .

Si bien estas dependencias exhiben un carácter lineal muy estricto y pudieran satisfacer los objetivos planteados por los fabricantes no necesariamente significa que los voltajes  $V_H$  que hemos estado midiendo correspondan al verdadero valor del voltaje Hall isotérmico. En este voltaje están incluidos todos los efectos colaterales antes mencionados y una evidencia de ello es que si calculamos la sensibilidad de la unidad Hall la misma no coincide para las dos dependencias. Esto se muestra en la tabla I.

**TABLA I.** Cálculos de la sensibilidad de la unidad Hall.

Parámetro constante	Pendiente de la gráfica	Sensibilidad $K_H$	Coficiente $R^2$
$B = 0,317 \text{ T}$	25,61	80,789	1,00
$I_H = 0,003 \text{ A}$	0,697	232,333	0,999

Con las modificaciones realizadas en el montaje, se pudieron medir los cuatro voltajes necesarios para tener en cuenta los efectos colaterales asociados con los fenómenos termo magnéticos y el voltaje  $V_0$  y se calcularon los voltajes Hall conforme con la ecuación (13) para la correspondiente corrección.

Los resultados de las mediciones de los cuatro valores de voltaje para las combinaciones posibles de sentido de la corriente y del campo magnético aparecen en las tablas II y III. La primera corresponde a las mediciones manteniendo la corriente constante y variando el campo magnético y la segunda corresponde a las mediciones con campo magnético constante y variando la corriente por la placa.

La primera conclusión que se extrae es que se trata de un semiconductor tipo n ya que el signo del voltaje Hall resulta negativo y en ambos casos se observa que su valor modular se incrementa con el aumento del parámetro que se está modificando.

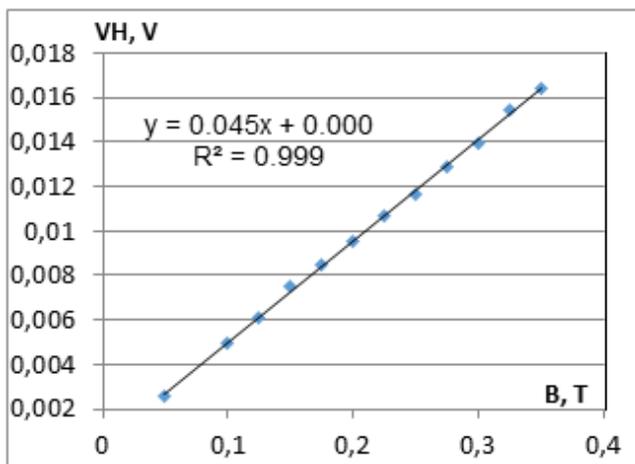
Con estos valores se construyeron las gráficas del valor absoluto del voltaje Hall con la intensidad de la corriente (manteniendo el campo magnético constante) y con la intensidad del campo magnético (manteniendo constante la corriente por la muestra semiconductor). Estas gráficas se presentan en las figuras 8 y 9.

**TABLA II.** Valores del voltaje Hall para corriente constante.

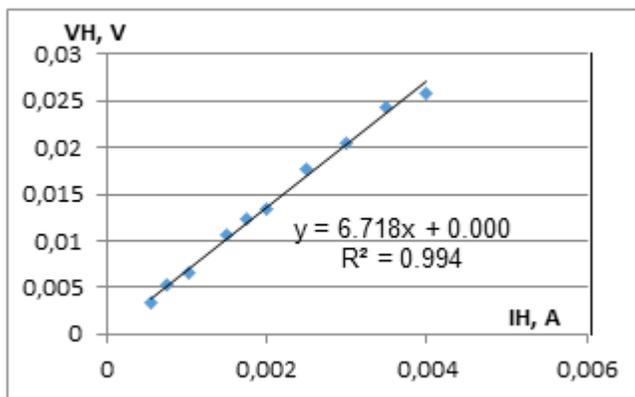
$I_H$ , mA	B, KG	$V_1$ , mV	$V_2$ , mV	$V_3$ , mV	$V_4$ , mV	$V_H$ , mV	Abs $V_H$ , V	B, T
2.01	0.50	-41.2	38.8	34.4	-35.4	-2.55	0.00255	0.050
2.01	1.00	-43.3	41.7	31.6	-33.6	-4.95	0.00495	0.100
2.01	1.25	-44.9	42.8	31.3	-32.0	-6.10	0.00610	0.125
2.01	1.50	-45.0	44.3	28.8	-30.6	-7.47	0.00747	0.150
2.01	1.75	-46.3	44.5	28.0	-29.0	-8.45	0.00845	0.175
2.01	2.00	-46.9	46.1	26.5	-28.2	-9.57	0.00957	0.200
2.01	2.25	-48.3	46.7	25.7	-26.6	-10.67	0.01067	0.225
2.01	2.50	-49.0	48.0	23.9	-26.4	-11.67	0.01167	0.250
2.01	2.75	-50.6	49.0	23.3	-24.7	-12.90	0.01290	0.275
2.01	3.00	-51.5	50.5	21.8	-24.3	-13.97	0.01397	0.300
2.01	3.25	-53.4	51.6	20.9	-22.4	-15.42	0.01542	0.325
2.01	3.50	-54.2	53.2	19.5	-22.1	-16.45	0.01645	0.350

**TABLA III.** Valores del voltaje Hall para campo magnético constante.

B, KG	I <sub>H</sub> , mA	V <sub>1</sub> , mV	V <sub>2</sub> , mV	V <sub>3</sub> , mV	V <sub>4</sub> , mV	V <sub>H</sub> , mV	Abs V <sub>H</sub> , V	I <sub>H</sub> , A
3	0.55	-10.4	10.1	3.6	-3.6	-3.325	0.00332	0.00055
3	0.75	-18.9	18.5	7.9	-8.2	-5.325	0.00532	0.00075
3	1.04	-23.1	22.2	9.3	-10.0	-6.500	0.00650	0.00104
3	1.50	-38.9	37.3	16.2	-17.1	-10.725	0.01072	0.00150
3	1.75	-44.8	44.1	19.1	-20.7	-12.275	0.01227	0.00175
3	2.00	-49.7	48.1	21.3	-22.5	-13.500	0.01350	0.00200
3	2.50	-64.1	63.1	26.8	-29.6	-17.700	0.01770	0.00250
3	3.00	-72.3	69.4	29.1	-30.5	-20.525	0.02052	0.00300
3	3.50	-89.1	85.5	37.6	-40.2	-24.200	0.02420	0.00350
3	4.00	-96.4	96.1	42.1	-46.8	-25.900	0.02590	0.00400



**FIGURA 8.** Dependencia del voltaje Hall con el campo magnético a corriente constante.



**FIGURA 9.** Dependencia del voltaje Hall con la corriente a campo magnético a constante.

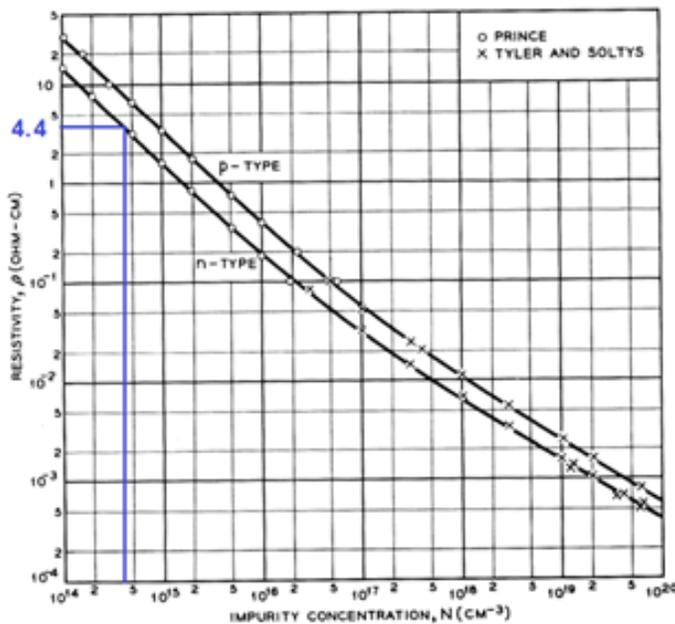
Ambas gráficas exhiben un comportamiento lineal con un alto grado de linealidad evidenciado en el valor de R<sup>2</sup> muy próximo a la unidad. Del ajuste realizado por el método de los mínimos cuadrados empleando Excel obtuvimos las ecuaciones que las describen y de ellas los valores de sus pendientes, los cuales corresponden con el producto de la sensibilidad de la unidad (K<sub>H</sub>) por el valor de la magnitud que se mantuvo constante (I<sub>H</sub> o B). Es fácil encontrar el valor de K<sub>H</sub> para ambos casos y con él la concentración de portadores.

En la tabla IV se ofrecen los valores obtenidos al realizar dichos cálculos.

**TABLA IV.** Cálculos de la sensibilidad de la unidad Hall y la concentración de los portadores.

Parámetro constante	Pendiente de la gráfica	Sensibilidad K <sub>H</sub>	Concentración, electrones/cm <sup>3</sup>
B = 0.3 T	6.718	22.393	3.6724x10 <sup>14</sup>
I <sub>H</sub> = 0.00201 A	0.045	22.388	3.6732x10 <sup>14</sup>

La concentración de portadores, en este caso electrones, resultó igual a 3.67 x 10<sup>14</sup> cm<sup>-3</sup>. A partir de los datos reportados en la literatura relativos a la resistividad del germanio para diferentes concentraciones de impurezas [5] que se muestra en la figura 10 se obtuvo el valor de la resistividad para esta muestra que resultó ser 4.4 Ω.cm.

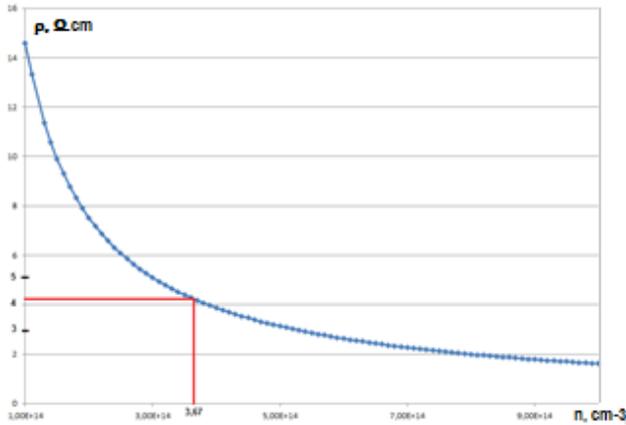


**FIGURA 10.** Dependencia de la resistividad del germanio para diferentes concentraciones de impurezas tipo n y tipo p. Valor obtenido para la concentración de portadores 3,67x10<sup>14</sup> cm<sup>-3</sup>.

En la figura 11 se ofrece el ploteo de la relación

$$\rho = \frac{1}{B} N^{-\alpha}, \quad (14)$$

para los valores de B y  $\alpha$  especificados para cada intervalo de concentraciones en [5] y también el valor de la resistividad obtenido para la concentración de portadores  $3,67 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ .



**FIGURA 11.** Gráfica del ploteo de los valores de la resistividad del germanio para diferentes concentraciones de impurezas según la relación (14) y los valores de B y  $\alpha$  de la referencia [6]. Valor obtenido para la concentración de portadores  $3,67 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ .

En la documentación brindada por el fabricante se afirma que en la placa se especificaban el tipo de semiconductor, el espesor y la resistividad, pero este último dato no aparecía. Ver figura 5. Se le pidió dicho valor e informaron que era 6,5  $\Omega \cdot \text{cm}$ . Este valor de resistividad se corresponde con una concentración de portadores del orden de  $2.3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  y la movilidad calculada resulta ser 4181  $\text{V}^2/\text{cm} \cdot \text{s}$  que supera el valor de la movilidad para el germanio intrínseco [6] y para concentraciones en el intervalo  $10^{14} - 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  a temperatura de 300 K [7]. En virtud de esto fue descartado dicho valor.

Empleamos el valor de la resistividad correspondiente a la concentración obtenida y el valor de dicha concentración para calcular la movilidad que resultó ser 3870  $\text{V}^2/\text{cm} \cdot \text{s}$ . Este valor guarda buena correspondencia con los reportados en varias fuentes en la literatura. Por ejemplo, concuerda con los valores de movilidad para los electrones en el germanio tipo n con concentraciones similares a 300 K [7]. Si empleamos la fórmula propuesta en [8]

$$\mu_n = \mu_{OH} / (1 + N_d \cdot 10^{-17})^{1/2}, \quad (15)$$

donde  $\mu_{OH} \approx 3900 \text{ (cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}\text{)}$ , y  $N_d$  se expresa en  $\text{cm}^{-3}$ , obtenemos 3892  $\text{V}^2/\text{cm} \cdot \text{s}$ , que es un valor razonablemente cercano al nuestro. Si empleamos la fórmula propuesta en [9]

$$\mu_n \approx 4.9 \cdot 10^7 \cdot T^{-1.66} \text{ (cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}\text{)}, \quad (16)$$

para muestras de germanio débilmente dopadas en el intervalo de temperaturas 77-300K, obtenemos 3876

$\text{V}^2/\text{cm} \cdot \text{s}$  que también resulta un valor razonablemente cercano al nuestro. La comparación de nuestro resultado con otras fuentes en que se reporta el valor de la movilidad de electrones en el germanio para diferentes concentraciones de impurezas donoras a diferentes temperaturas [9], también corrobora que el mismo es válido.

### III. CONCLUSIONES

Con el equipo recibido se puede realizar la práctica de laboratorio para el estudio del efecto Hall con los siguientes objetivos:

- la determinación del tipo de semiconductor extrínseco (tipo n o tipo p)
- la determinación de la concentración de los portadores de carga (electrones o huecos) en una muestra de semiconductor extrínseco.
- la determinación de la movilidad Hall de los portadores de carga en el semiconductor extrínseco.

Para ello es necesario considerar la influencia de los efectos termo magnéticos y el llamado potencial cero, así como utilizar los dispositivos complementarios para la conmutación del sentido de la corriente y el campo magnético.

Los resultados experimentales obtenidos tienen una buena correspondencia con los datos reportados en la literatura.

### IV. RECOMENDACIONES

- Adquirir una muestra de semiconductor tipo p para que el experimento resulte más completo.
- Adquirir muestras Hall del mismo tipo, pero con cuatro contactos alineados para poder usar el método de las cuatro puntas en la medición de la resistividad. Este ejercicio puede hacerse con el equipo ya existente.

### AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi sincero agradecimiento al Departamento de Física y Matemática de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Ciencias de la Educación de Bindura, Zimbabue por poner a mi disposición el equipamiento recibido y la documentación que lo acompañaba, lo cual me permitió la realización del presente trabajo. De igual manera a los técnicos del laboratorio de Física por su colaboración.

### REFERENCIAS

- [1] Hall E. H., *On a new action of the magnet on electric currents*, American Journal of Mathematics **2**, 287 (1879).
- [2] Redin R. D., *Thermomagnetic and Galvanomagnetic Effects*. United States Atomic Energy Commission Research

and Development Report Unclassified ISC-907, p. 22, 221957.

[3] Sáenz Ramírez, A., *Aparato para la medición del efecto Hall y la resistividad de metales y aleaciones en forma de películas delgadas*, Revista Mexicana de Física **34**, 85-90 (1988).

[4] Vidal Salgado, L. E., *Diseño y construcción de un sistema de medidas de efecto Hall basado en la técnica de Van der Pauw*, Tesis de Maestría en Física. Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales. Mayo de 2006. 103p.

[5] Cuttriss, D. B., *Relation Between Surface Concentration and Average Conductivity in Diffused Layers of Germanium*, The Bell System Technical Journal. March, 509-523 (1961).

[6] Sze, S. M., Kwok, K. N., *Physics of Semiconductor Devices*, 3rd Edition (John Wiley & Sons, Inc., USA, 2007).

[7] Fistul, V. I., Iglitsyn, M. I., Omelyanovskii, E. M., *Mobility of electrons in germanium strongly doped*, Sov. Phys., Solid State **4**, 784-785 (1962).

[8] Hilsum, C., *Simple empirical relationship between mobility and carrier concentration*, Electron. Lett, **10**, 259-260 (1974).

[9] Debye, P. P., Conwell, E. M., *Electrical Properties of -Type Germanium*, Phys. Rev. **93**, 693-698 (1954).