

# Efecto Hall en p-Germanium

Félix Rodríguez Lagonell  
<frodrigue1117@alumno.uned.es>  
Técnicas Experimentales IV - UNED

Septiembre 2021

## Resumen

Se estudia el comportamiento de los portadores de carga en una lámina de p-Germanium al someterla a un campo magnético cuando por ella circula una corriente eléctrica. Se comprueba el efecto Hall, la magnetorresistencia del material y la dependencia de la conductividad con la temperatura.

## 1. Introducción

### 1.1. Efecto Hall

Se conoce como efecto Hall a la aparición de un campo eléctrico en el interior de un conductor por el que circula una corriente  $I$  en presencia de un campo magnético  $B$ . Las cargas que circulan por el conductor están sometidas a la fuerza de Lorentz

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (1)$$

Con lo cual aparece una fuerza magnética en los portadores de carga que los reagrupa a ambos lados del conductor de anchura  $d$ , apareciendo así una diferencia de potencial en el conductor que origina un campo eléctrico perpendicular al campo magnético. Este campo eléctrico es el denominado campo Hall  $E_H$ , y ligada a él aparece la tensión Hall  $V_H$  según la fórmula

$$V_H = R_H \frac{IB}{d} \quad (2)$$

Donde la constante  $R_H$  se conoce como constante de Hall y equivale a

$$R_H = \frac{1}{nq} \quad (3)$$

Siendo  $n$  la densidad de portadores de carga y  $q$  la carga correspondiente. Además, según [2], dicha

constante se puede relacionar con la conductividad  $\sigma$  y con la movilidad  $\mu_H$  mediante la ecuación

$$\mu = R_H \sigma \quad (4)$$

### 1.2. Efecto Hall y magnetorresistencia

La magnetorresistencia, descubierta por William Thomson en 1857, es la propiedad que tienen algunos materiales de variar su resistencia eléctrica cuando son sometidos a un campo magnético. Este fenómeno puede relacionarse con el efecto Hall a través de la Ley de Ohm.

$$R = \frac{V}{I} \quad (5)$$

### 1.3. Efecto Hall y temperatura

Un semiconductor puede clasificarse según su conductividad en intrínseco y extrínseco. En los semiconductores intrínsecos los agentes conductores son los electrones y huecos que el material es capaz de generar térmicamente. El p-Germanium es un semiconductor extrínseco ya que es un semiconductor (intrínseco) dopado con materiales que lo proveen de un exceso de huecos para favorecer la conducción a bajas temperaturas. Partiendo del modelo clásico, la conductividad total será la suma de las contribuciones individuales de cada tipo de portador de carga libre, según la expresión

$$\sigma = n_p \mu_p + n_h \mu_h \quad (6)$$

Siendo  $n_{p,h}$  la densidad de portadores y  $\mu_{p,h}$  la movilidad (el subíndice se refiere a portadores y huecos). Aplicando la estadística de Fermi-Dirac a la anterior ecuación y teniendo en cuenta que ambas poblaciones siguen la ley de acción de masas o del equilibrio  $n_p n_h = n_i^2$  tenemos que se cumple

$$\sigma = \sigma_0 e^{\frac{-E_g}{2k_b T}} \quad (7)$$

Donde  $\sigma_0$  es un prefactor que depende de la movilidad y la densidad de estados efectivos en las bandas de conducción y valencia,  $E_g$  representa la energía del intervalo prohibido,  $K_b$  es la constante de Boltzmann y  $T$  la temperatura.

## 2. Metodología

Contamos con una lámina de p-Germanium de 1mm de grosor y 2cm de largo con una sección transversal de  $10^{-5}m^2$  y un dispositivo experimental controlado por ordenador. Mediante el programa MEASURE con el plugin Çobra3 Hall-Efect realizaremos la toma de medidas de manera automática. Podremos configurar y variar intensidades de campo magnético, intensidad de corriente y voltaje gracias a una fuente de alimentación. Además, podremos cambiar la escala para calentar la lámina y medir así la temperatura. Todas aquellas medidas que tengan incertidumbre asociada serán explícitamente mencionadas. Para aquellas magnitudes indirectas se calculará el error asociado según la fórmula habitual

$$\Delta A_i = \left| \frac{\partial A}{\partial \alpha_i} \right| \Delta \alpha_i \quad (8)$$

## 3. Implementación

El desarrollo del trabajo se estructura en cinco experimentos. En primer lugar, en el experimento 1 y 2, estudiaremos el efecto Hall variando la intensidad y campo magnético, respectivamente. Pasaremos al estudio de la magnetorresistencia en el experimento 3 para luego analizar el comportamiento de los portadores al variar la temperatura en el experimento 4. Para finalizar, y con los resultados anteriores, en el experimento 5 calcularemos de manera experimental la energía de la banda prohibida del p-Germanium.

## 4. Resultados

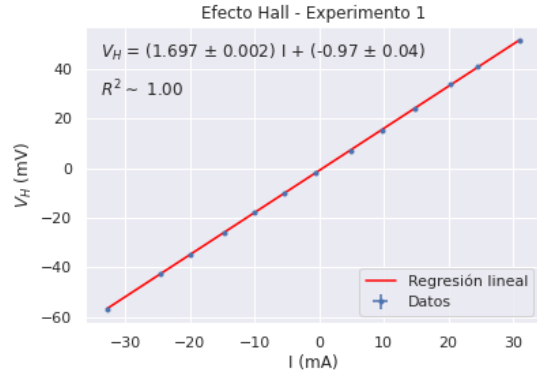


Figura 1: Efecto Hall - Experimento 1:  $B = 250 \pm 1mT$

### 4.1. Experimento 1. Efecto Hall en función de intensidad de corriente

Representamos gráficamente las medidas tomadas para voltaje al variar la intensidad de corriente manteniendo el campo magnético constante y de valor  $B = 250 \pm 1mT$ . El efecto Hall en este caso tendrá la forma  $V_H = \alpha I$ , con lo que identificamos  $\alpha = R_H \frac{B}{d} = \frac{B}{nqd}$  con el coeficiente de una regresión lineal.

La regresión lineal se presenta en la figura (1), donde obtenemos un buen ajuste al ser  $R^2$  muy próximo a la unidad, y a partir de la cual calculamos el coeficiente Hall  $R_H = (6786,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-6}m/C$  y la densidad de portadores de carga  $n = (9,19 \pm 0,04) \cdot 10^{20}$  portadores/m.

### 4.2. Experimento 2. Efecto Hall en función de campo magnético

Llevamos a cabo el mismo análisis que en el experimento 1, sin embargo, esta vez mantenemos fijado el valor de la intensidad de corriente en  $I = 30,0 \pm 0,1mA$  y variamos las medidas de campo magnético. En este caso nuestra regresión tendrá la forma  $V_H = \beta B$ , siendo  $\beta = R_H \frac{I}{d} = \frac{I}{nqd}$

En la figura (2) presentamos los resultados donde nuevamente el  $R^2$  tiende a la unidad. En este caso obtenemos un valor para el coeficiente Hall de  $R_H = (6823,1 \pm 0,5) \cdot 10^{-6}m/C$  mientras que la densidad de portadores es  $n = (9,15 \pm 0,07) \cdot 10^{20}$  portadores/m.

Podemos ver que, aunque los valores obtenidos para la densidad de portadores no comparten cifra significativa, sí ocurre que éstos solapan dentro del

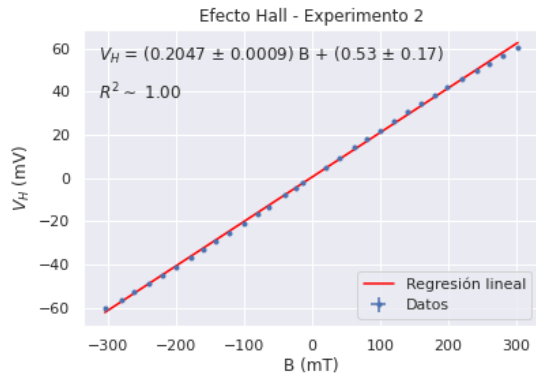


Figura 2: Efecto Hall - Experimento 2:  $I = 30,0 \pm 0,1\text{mA}$

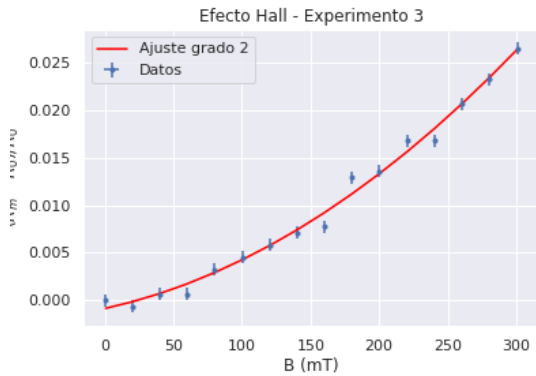


Figura 3: Efecto Hall - Experimento 3:  $I = 30,0 \pm 0,1\text{mA}$

error o incertidumbre además de que tienen el mismo orden de magnitud. Concluimos entonces que ambos experimentos ofrecen resultados aceptables.

### 4.3. Experimento 3. Efecto Hall y magnetorresistencia

Manteniendo la intensidad de corriente en  $I = 30,0 \pm 0,1\text{mA}$  medimos voltajes al variar el campo magnético en el rango  $[0-300\text{mT}]$ . Con estos datos, y partir de la Ley de Ohm, podemos representar gráficamente el cambio relativo de la resistencia frente a su valor inicial  $V_0$  cuando  $B = 0$ .

$$\frac{R - R_0}{R_0} = \frac{V - V_0}{V_0} \quad (9)$$

En la figura (3) se muestran los resultados experimentales sometidos a un ajuste polinómico de segundo orden con coeficientes  $1,97 \cdot 10^{-7} B^2 + 3,15 \cdot 10^{-5} B - 8,80 \cdot 10^{-4}$ . Vemos que la resistencia aumenta de manera no lineal al aumentar el campo magnético, en este caso la relación cuadrática ofrece un ajuste aceptable con un residuo de  $r = 1,06 \cdot 10^{-5}$ . Este fenómeno se conoce como magnetorresistencia, y es debido a que los conductores en el seno de un campo magnético experimentan una disminución de su conductividad efectiva, al ser desviada parte de la carga que fluye en dirección a la intensidad de corriente.

Gracias a los datos obtenidos podemos estimar la resistencia a temperatura ambiente, cuyo valor es  $R_0 = 51,6 \pm 0,2\Omega$ . La conductividad viene dada por la expresión

$$\sigma_0 = \frac{l}{R_0 \cdot A} \quad (10)$$

Con  $l$  el largo de la lámina y  $A$  la sección transversal. Sustituyendo los valores tenemos  $\sigma_0 = 38,75 \pm 0,15 \frac{1}{\text{m}\Omega}$  y la movilidad  $\mu_h = 0,264 \pm 0,003 \frac{1}{\text{C}\Omega}$

### 4.4. Experimento 4. Efecto Hall en función de la temperatura.

Para comprobar la variación del potencial Hall con la temperatura fijamos la intensidad de corriente en  $I = 30,0 \pm 0,1\text{mA}$  y el campo magnético en  $B = 340 \pm 1\text{mT}$ . Como podemos ver en la figura (4), el potencial decrece con la temperatura, ya que en este caso el coeficiente Hall depende de la temperatura de manera indirecta a través de la densidad de portadores. Se aprecia en la figura que incluso el potencial llega a invertirse. La explicación a este fenómeno radica en un exceso de huecos frente a portadores electrónicos debido a la transición de semiconductor extrínseco a intrínseco del p-Germanium, rompiendo así condición de la ley de acción de masas.

### 4.5. Experimento 5. Efecto Hall en función de la temperatura.

De manera similar al experimento anterior, y con intención de verificar la conductividad del p-Germanium, representamos los datos de  $\ln(\frac{1}{V_H})$

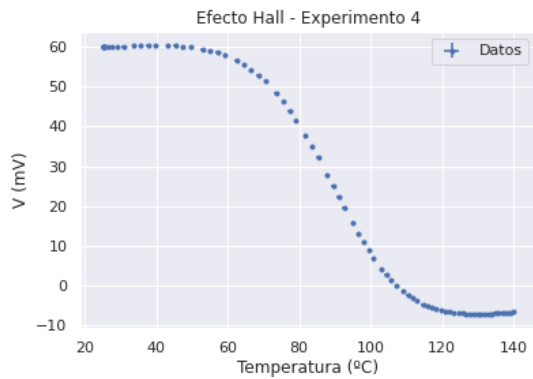


Figura 4: Efecto Hall - Experimento 4:  $I = 30,0 \pm 0,1\text{mA}$ ,  $B = 340 \pm 1\text{mT}$

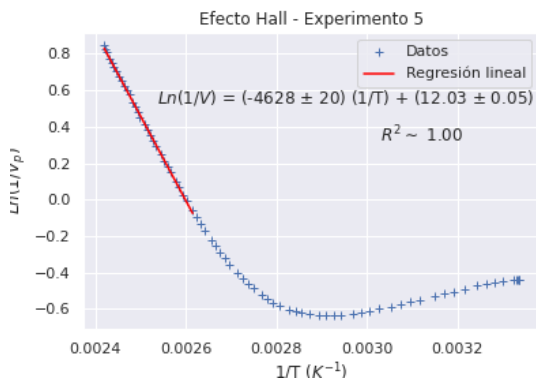


Figura 5: Efecto Hall - Experimento 5

frente a  $\frac{1}{T}$  en la figura (5). En ella se presenta el ajuste lineal para la conductividad en la zona intrínseca, dada por  $\sigma \propto \frac{1}{V}$ , donde la pendiente representa la magnitud  $\frac{E_g}{2k_b}$ . De esta forma podemos calcular la energía de la banda prohibida de la muestra  $E_g = 0,797 \pm 0,003\text{eV}$ . Siendo el valor teórico para el germanio puro de  $E_{g,t} = 0,67\text{eV}$  tenemos una diferencia de alrededor del 19%.

## 5. Conclusiones

En esta práctica se ha estudiado el efecto Hall en una muestra de p-Germanium. Hemos verificado la relación lineal a través del coeficiente Hall  $R_H$  entre el voltaje Hall y la intensidad de corriente por un lado y el campo magnético por otro. Gracias a este análisis hemos calculado la densidad de portadores

de la muestra así como la correspondiente conductividad y movilidad de los portadores dentro del material.

También hemos comprobado experimentalmente la aparición del fenómeno conocido como magnetorresistencia, siendo el p-Germanium un material que aumenta su resistencia al someterlo a un campo magnético.

Se ha hecho un análisis semiclásico de la conductividad al hacer variar la temperatura de la lámina, comprobándose así la teoría estadística de Fermi-Dirac para semiconductores dopados, es decir, inversión de voltaje al aumentar la temperatura y cálculo de la energía gap del material, siendo el valor obtenido es un 19 % superior al del material puro.

## Referencias

- [1] L. de la Peña. *Introducción a la Mecánica Cuántica*. Fondo de Cultura Económica, 2013.
- [2] J. H. Davies. *The Physics of Low-dimensional Semiconductors. An Introduction*. Cambridge University Press, 1997.
- [3] C. Kittel. *Introduction to Solid State Physics*. John Wiley and Sons, 2005.