

Efecto Hall en p-Germanium

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

Septiembre 2021

Abstract

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 σ y con la movilidad μ_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 σ_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 "Cobra3 Hall-Effect" 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

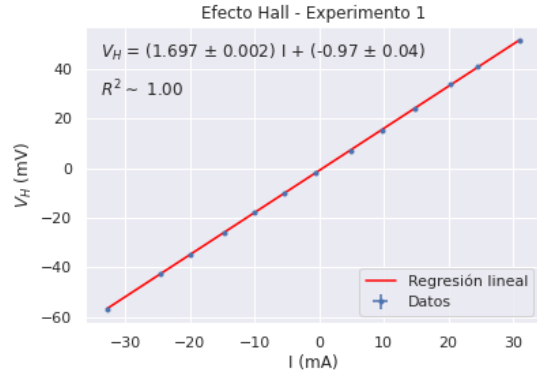


Figure 1: Efecto Hall - Experimento 1: $B = 250 \pm 1mT$

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

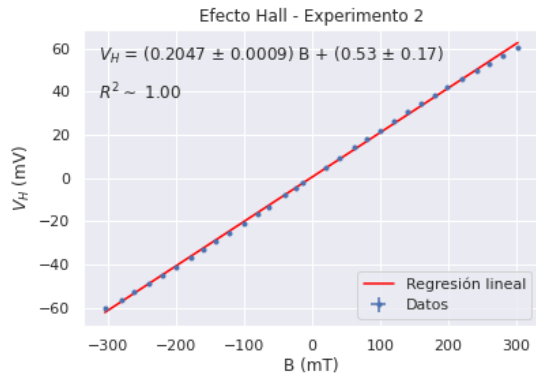


Figure 2: Efecto Hall - Experimento 2: $I = 30.0 \pm 0.1\text{mA}$

del 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

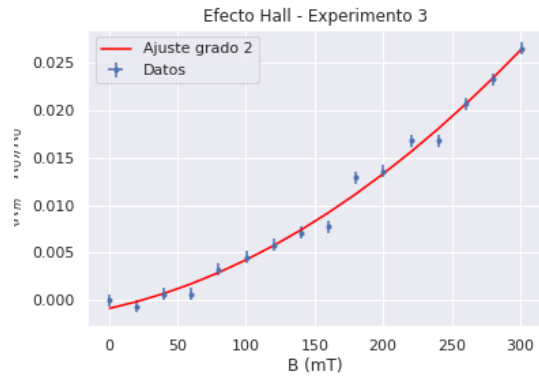


Figure 3: Efecto Hall - Experimento 3: $I = 30.0 \pm 0.1\text{mA}$

es $R_0 = 51.6 \pm 0.2\Omega$. La conductividad viene dada por la expresión

$$\sigma_o = \frac{l}{R_o \cdot A} \quad (10)$$

Con l el largo de la lámina y A la sección transversal. Sustituyendo los valores tenemos $\sigma_o = 38.75 \pm 0.15 \frac{1}{\text{m}\Omega}$ 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 $\ln(\frac{1}{V_H})$

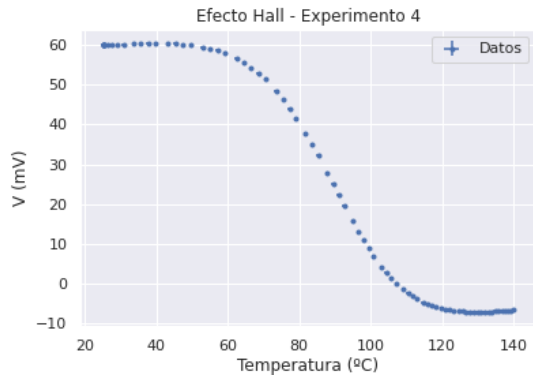


Figure 4: Efecto Hall - Experimento 4: $I = 30.0 \pm 0.1\text{mA}$, $B = 340 \pm 1\text{mT}$

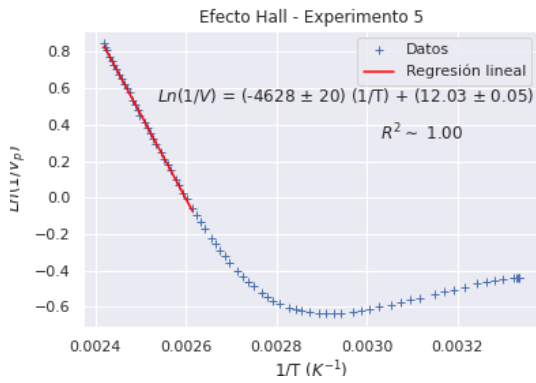


Figure 5: Efecto Hall - Experimento 5

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.

References

- [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.