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

$$\overrightarrow{F} = q(\overrightarrow{v} x \overrightarrow{B}) \tag{1}$$

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 pontencial 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

$$V_H = R_H \frac{IB}{d} \tag{2}$$

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

$$R_H = \frac{1}{nq} \tag{3}$$

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

$$\mu = R_H \sigma \tag{4}$$

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.

$$R = \frac{V}{I} \tag{5}$$

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

$$\sigma = n_p \mu_p + n_h \mu_h \tag{6}$$

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

$$\sigma = \sigma_0 e^{\frac{-E_g}{2K_bT}} \tag{7}$$

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 un 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-Efectrealizaremos 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 será explícitamente mencionado. Para aquellas magnitudes indirectas se calculará el error asociado según la fórmula habitual

$$\Delta A_i = |\frac{\partial A}{\partial \alpha_i}|\Delta \alpha_i \tag{8}$$

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

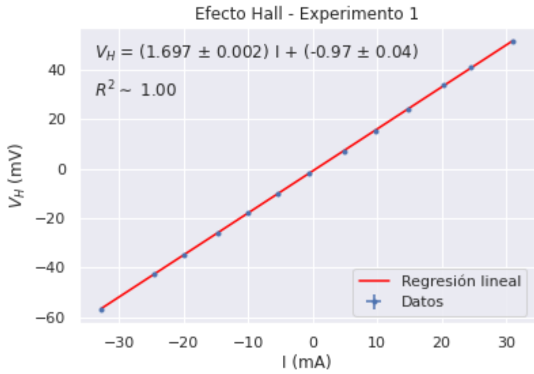

Figura 1: Efecto Hall - Experimento 1: $B = 250 \pm 1$mT

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 $B = 250 \pm 1$mT. 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 my 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 $I = 30{,}0 \pm 0{,}1$mA 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

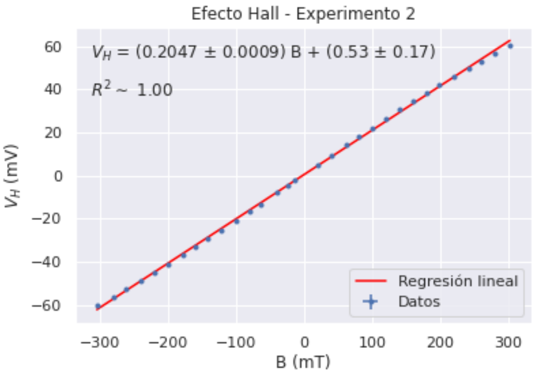

Figura 2: Efecto Hall - Experimento 2: $I = 30{,}0 \pm 0{,}1$mA

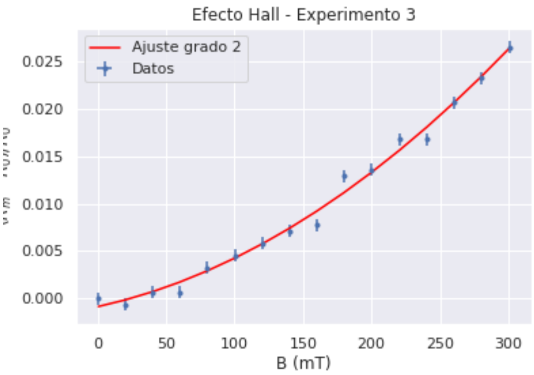

Figura 3: Efecto Hall - Experimento 3: $I = 30{,}0 \pm 0{,}1$mA

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 $I = 30{,}0 \pm 0{,}1$mA medimos voltajes al variar el campo magnético en el rango [0-300mT]. 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 $B = 0$.

$$\frac{R - R_0}{R_0} = \frac{V - V_0}{V_0} \tag{9}$$

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 $R_o = 51{,}6 \pm 0{,}2\Omega$. La conductividad viene dada por la expresión

$$\sigma_o = \frac{l}{R_o \cdot A} \tag{10}$$

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

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 $I = 30{,}0 \pm 0{,}1$mA y el campo magnético en $B = 340 \pm 1$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 $Ln(\frac{1}{V_H})$

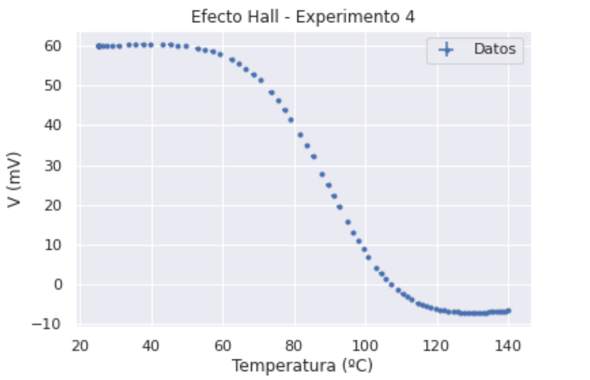

Figura 4: Efecto Hall - Experimento 4: $I = 30{,}0 \pm 0{,}1$mA, $B = 340 \pm 1$mT

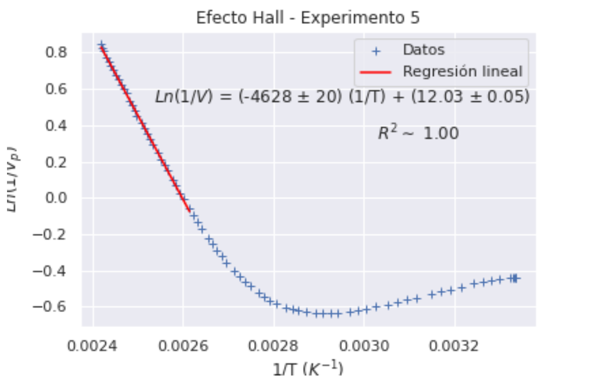

Figura 5: Efecto Hall - Experimento 5

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 $E_g = 0{,}797 \pm 0{,}003$eV. Siendo el valor teórico para el germanio puro de $E_{g.t} = 0{,}67$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 conductivdad 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. *Introduccion a la Mecanica Cuantica*. 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.