PRÁCTICA Nº 4

PROPIEDADES DE TRANSPORTE DE LOS SEMICONDUCTORES
MEDIDAS DE RESISTIVIDAD Y EFECTO HALL

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Modelo de Drude para semiconductores

El modelo de Drude es el modelo más sencillo para interpretar las propiedades de transporte de un sólido. Consiste en suponer que los portadores de carga (electrones o huecos en una banda) interactúan con los defectos y vibraciones de la red, de modo que, en promedio realizan un choque cada cierto intervalo de tiempo al que se llama **tiempo de relajación** (dicho tiempo se supone independiente de la energía de los electrones). Si suponemos que la energía ganada por el electrón entre choque y choque se pierde al siguiente choque, siendo transferida a la red, ello equivale a introducir una fuerza disipativa proporcional a la velocidad. La constante de amortiguamiento será proporcional a la inversa del tiempo de relajación τ. La ecuación del movimiento en presencia de un campo eléctrico uniforme quedaría:

$$m^* \frac{d\vec{v}}{dt} = -e\vec{E} - m^* \frac{\vec{v}}{\tau} \qquad [4.1]$$

En el estado estacionario, la velocidad será constante :

$$\vec{v} = -\frac{e\tau}{m^*}\vec{E} = -\mu\vec{E} \qquad [4.2]$$

Esta velocidad corresponde al exceso de velocidad que gana cada electrón al aplicar el campo eléctrico. La constante de proporcionalidad entre la velocidad y el campo, o lo que es lo mismo, la velocidad de los electrones en un campo eléctrico unidad, es lo que se llama la **movilidad** de los electrones. Si en la banda está ocupada por n electrones por unidad de volumen, la densidad de carga por unidad de volumen será (- e n) , y, recordando la relación entre velocidad y densidad de carga, podremos obtener la relación entre la densidad de corriente y el campo eléctrico, es decir, la **ley de Ohm** en el modelo de Drude, lo que nos permitirá obtener la conductividad σ del semiconductor:

$$\vec{J} = -en\vec{v} = \frac{e^2 n\tau}{m^*}\vec{E} = \sigma\vec{E} \qquad \sigma = \frac{e^2 n\tau}{m^*} = en\mu \qquad [4.3]$$

La resistividad ρ se define como la inversa de la conductividad, ρ =1/σ

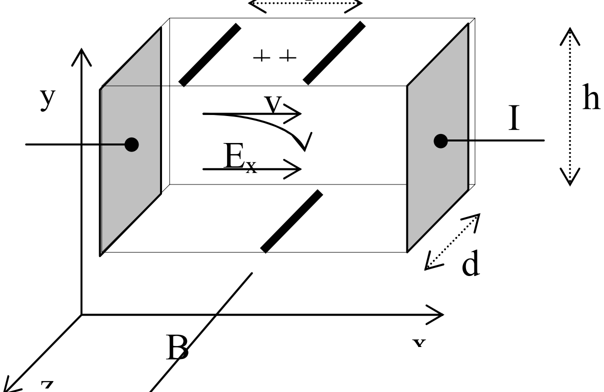


Figura 4.1

Supongamos ahora que sometemos una muestra de semiconductor la acción de un campo eléctrico y un campo magnético perpendiculares entre sí. Supongamos que el campo eléctrico aplicado está dirigido en la dirección del eje X y el campo magnético en la dirección del eje Z. La fuerza magnética desviará a los electrones en la dirección perpendicular a ambos (dirección del eje Y). Si la muestra es finita, los electrones tenderán a acumularse en uno de los bordes, dejando una carga positiva no compensada en el otro, lo que conlleva la aparición de un campo eléctrico en la dirección del eje Y, tal como muestra la Figura 1.

Dicho campo es el campo de Hall. Es fácil deducir el valor del campo de Hall. Dado que en la situación estacionaria no habrá corriente en la dirección del eje Y, el campo de Hall debe compensar la acción del campo magnético, de manera que E_H=vB . Como, por otra parte v= J/en (ec. [4.3]), E_H=BJ/en, es decir que el campo de Hall es proporcional a la densidad de corriente y al campo magnético. A la constante de proporcionalidad se le llama coeficiente de Hall, R_H= 1/en, y se suele expresar en cm^3/Coulomb.

1.2 Dependencia en función de la temperatura

En un semiconductor, la dependencia en temperatura de la movilidad electrónica está determinada por el tipo de mecanismo con el que interactúan predominantemente los portadores. A bajas temperaturas, cuando las vibraciones de la red no están excitadas, son los defectos e impurezas ionizadas los que predominan en los procesos de dispersión. La dependencia en temperatura es entonces del tipo μ = Cte $T^{3/2}$. A altas temperaturas, el mecanismo predominante es la dispersión por fonones acústicos longitudinales, lo que da lugar a una dependencia del tipo μ = Cte $T^{-3/2}$.

En cuanto a la concentración de portadores, si el semiconductor es **intrínseco**, su dependencia en temperatura viene dada por la expresión:

$$n_i = \sqrt{N_C N_V}\, e^{-\frac{E_g}{2kT}} = 2\left(\frac{kT}{\pi h^2}\right)^{\frac{3}{2}} \left(m_e^* m_h^*\right)^{\frac{3}{4}} e^{-\frac{E_g}{2kT}} \qquad [4.4]$$

donde E_g es la banda prohibida del semiconductor y $m_{e,h}^*$ las masas efectivas de electrones y huecos.

Cuando el semiconductor es **extrínseco** pueden reconocerse tres rangos de temperatura (por orden de temperaturas crecientes):

a) <u>rango extrínseco A:</u> las impurezas del nivel dador se están ionizando (los electrones de dicho nivel pasan a la banda de conducción). La dependencia en temperatura de la concentración de portadores viene dada por:

$$n_i = \sqrt{\frac{N_C N_D}{2}}\, e^{-\frac{\Delta E_D}{2kT}} \qquad [4.5]$$

donde N_D es la concentración de impurezas dadoras y ΔE_D su energía de ionización.

b) <u>rango extrínseco B</u>: rango de temperatura en el que las impurezas están completamente ionizadas, pero todavía hay pocos electrones provenientes de la banda de valencia. En este rango n=N_D, es decir, la concentración de electrones coincide con la de impurezas dadoras y no varía con la temperatura.

c) <u>rango intrínseco</u>: rango de temperatura en el que la concentracón de electrones provenientes de la banda de valencia es predominante (n=N_D+n_i). Por lo que la concentración de electrones aumenta con la temperatura según la expresión [4.4].

1.3 Medidas de resistividad y efecto Hall

Lo que medimos con los instrumentos eléctricos son corrientes y tensiones, de manera que nos interesa conocer la relación entre las corrientes y tensiones medidas y las magnitudes que hemos definido. Para medir la resistividad es necesario realizar cuatro contactos en la muestra: por dos de ellos (por ejemplo las caras perpendiculares al eje X de la figura 1) se introduce una corriente I. Si d es el grosor y h la altura de la muestra, la densidad de corriente J será J= I/S = I/dh. Entre los otros dos, situados sobre una cara paralela al flujo de corriente, se mide la diferencia de potencial (como el voltímetro tiene impedancia infinita, no pasa corriente a través de dichos contactos, por tanto no hay caída de tensión en los propios contactos, y la tensión medida corresponde a la caída óhmica en la muestra). La diferencia de potencial entre los dos contactos será V_ρ= IR=Iρl / hd, luego

$$\rho = \frac{V_\rho}{I}\frac{dh}{l} \qquad [4.6]$$

Por otra parte, medimos el efecto Hall. La tensión de Hall es el cambio de la diferencia de potencial entre las dos caras paralelas al eje al aplicar un campo magnético. La tensión de Hall será: V_H=h E_H=h R_HBJ=R_HBI/d, luego:

$$R_H = \frac{V_H d}{IB} \qquad [4.7]$$

A partir de la resistividad y el coeficiente de Hall obtenemos la movilidad, $\mu=R_H/\rho$ y la concentración de portadores, n= 1/eR_H.

A veces no se utiliza una muestra paralelepipédica en estas medidas, sino una muestra cuadrada con cuatro contactos (uno en cada vértice) y con un grosor d. En ese caso, se utiliza el llamado **método de Van der Pauw** para medir la **resistividad**. Llamemos A,B,C,D a los cuatro vértices. Se hace pasar la corriente por dos contactos contiguos I_{AB} y se mide la caida de tensión en los otros dos, V_{CD}. Se calcula $R_1=V_{CD}/I_{AB}$.

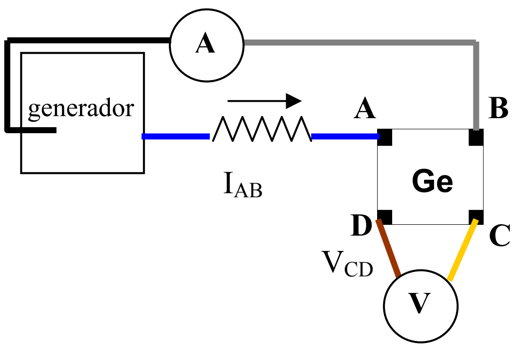


Figura 4.2 a)

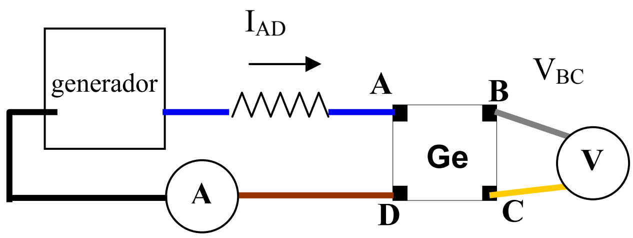


Figura 4.2 b)

Luego se cambia uno de los contactos de entrada de corriente, I_{BC} , de manera que esta siga entrando por dos contactos contiguos y se mide la tensión entre los otros dos, V_{AD}, y se calcula $R_2=V_{DA}/I_{BC}$. La resistividad viene dada por la expresión:

$$\rho = \frac{d\pi}{ln\,2}\frac{R_1 + R_2}{2}F\left(\frac{R_1}{R_2}\right) \qquad [4.8]$$

Donde F(R_1/R_2) es una función que vale 1 cuando R_1 y R_2 son muy próximas.

Para la **medida del efecto Hall** se hace pasar la corriente por dos vértices opuestos (A y C, por ejemplo), y se mide la variación de la diferencia de potencial entre los otros dos, aplicando el campo magnético V_{BD}(B) y sin aplicarlo V_{BD}(0). La tensión de Hall V_H será la diferencia entre ambos valores (V_H =V_{BD}(B)- V_{BD}(0)).

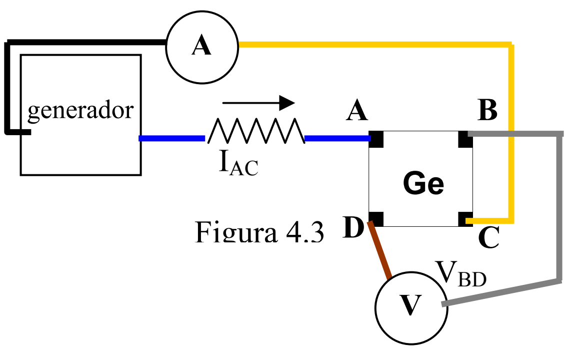
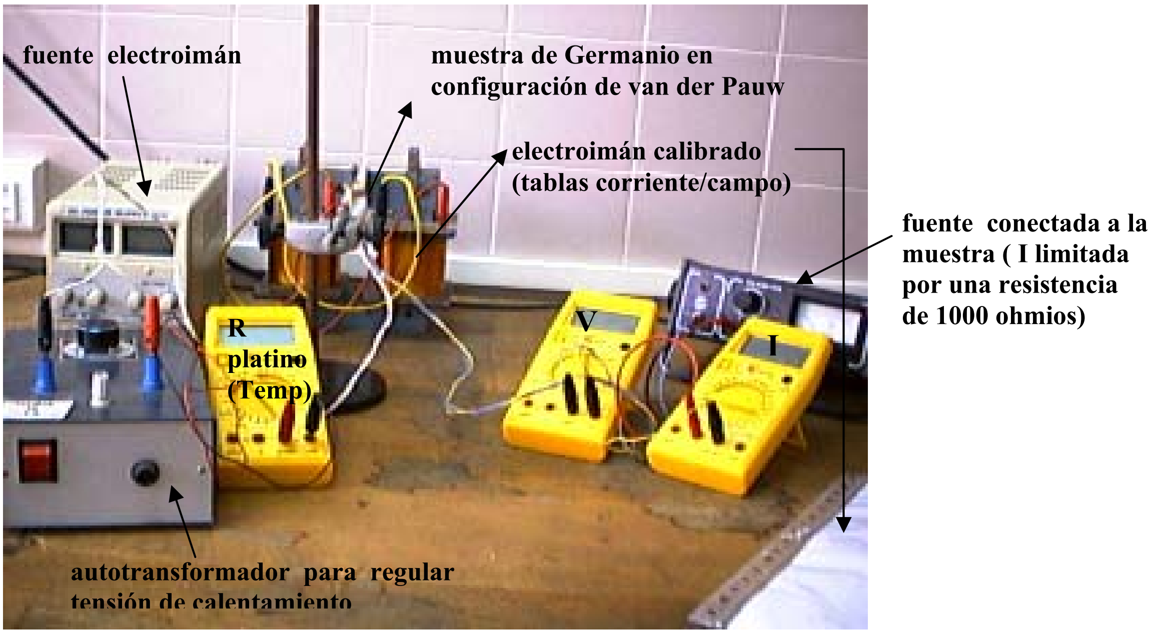
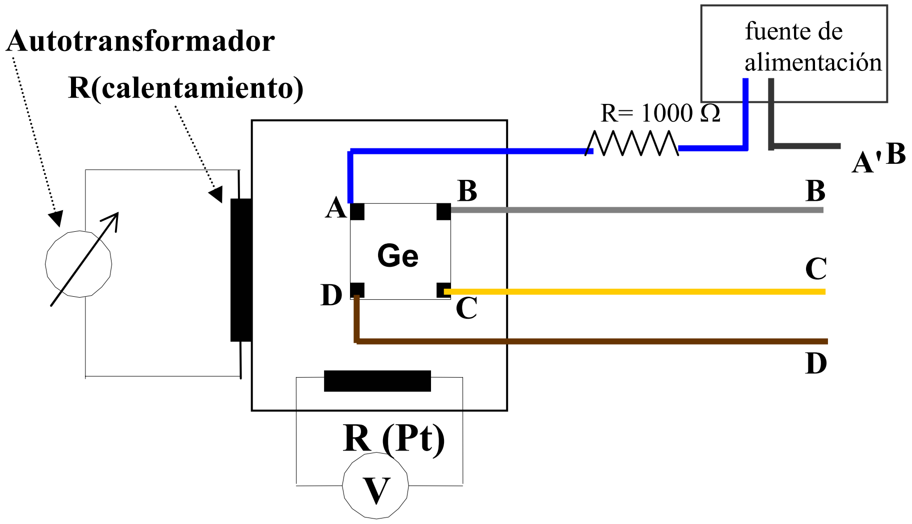


Figura 4.3

2. MATERIAL DISPONIBLE



La muestra cuadrada de **Germanio** (de **0.5 mm** de grosor) está montada en un sistema de calentamiento formado por una resistencia de soldador, un portamuestras y una resistencia de platino embutida en el portamuestras como sensor de temperatura. Del sistema salen ocho hilos: dos de la resistencia de calentamiento (negros), dos de la resistencia de platino (negro y rojo, a conectar en un polímetro) y cuatro de la muestra **(A: azul; B: gris; C: amarillo y D: marrón)**:



Puesto que el hilo azul (A) está conectado a la fuente de alimentación, es el hilo que sale de ésta (A') el que ha de usarse siempre para medidas de corriente, junto con cualquier otro que se quiera considerar (amperímetro en serie). Es decir, independientemente de la configuración de hilos que se elija para medidas de tensión y corriente por el método de van der Pauw, EL HILO QUE SALE DE LA FUENTE (A') SIEMPRE DEBE ESTAR CONECTADO AL POLÍMETRO QUE MIDE CORRIENTE.

Existe un programa de simulación (Simul-EH) de esta práctica, descargable desde la página web de la asignatura (http://www.uv.es/~elecfis/fisol/Fisol.htm). ¡Probadlo!. Es muy realista : ¡hasta se puede enfriar la muestra virtualmente!.

3. MEDIDAS A REALIZAR

3.1 A temperatura ambiente:

a) Verifica la linealidad de V_{CD} en función de I_{AB}, y obtened la resistencia (y de ella la resistividad) a partir de la pendiente.
b) Asegúrate de que se trata de una muestra cuadrada y, por lo tanto, la resistencia medida segun las dos configuraciones 4.2 a) y b) es aproximadamente la misma.
c) Predispón los cables para la medida de la tensión de Hall (intercambio de los cables amarillo y marrón) y, fijando el valor del campo magnético aplicado, verificad la linealidad de la tensión de Hall ($V_H = V_{BD}(B) - V_{BD}(0)$) con la corriente que atraviesa la muestra (I_{BD}). Asimismo, fija dicha corriente y verifica la linealidad de la tensión de Hall con el campo magnético aplicado. En ambos casos obtén el coeficiente de Hall a partir del ajuste lineal de los datos.

3.2 En función de la temperatura:

Para variar la temperatura hay que ir aumentando, con el mando del autotransformador, la tensión en la resistencia de soldador y esperar a que se estabilice la temperatura (es decir, a que la resistencia de platino tenga un valor estable -basta con que lo esté en el intervalo de tiempo que dura una medida completa-).

Fija la corriente que atraviese la muestra (alrededor de 10 mA) así como el campo magnético que se aplicará para la medida de efecto Hall (2-4 kGauss aprox.).
Mide V_{CD}, I_{AB} (resistividad), I_{AC}, V_{BD} (B=0) y V_{BD} (B) (efecto Hall) para 15-20 temperaturas entre la temperatura ambiente y un máximo de 200-210 ºC (180 ohmios de la resistencia de platino).

ATENCIÓN: Enciende el electroimán SOLO en los instantes en que se tome la medida de tensión de Hall.

4. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1 Calcula la resistividad, el coeficiente de Hall, la concentración de portadores y la movilidad en función de la temperatura absoluta.

4.2 Representa la resistividad y el coeficiente de Hall. Explica por qué presentan dicho comportamiento en términos de un paso de régimen extrínseco a régimen intrínseco en el semiconductor. Calcula la concentración de impurezas del semiconductor.

4.3 Representa la movilidad en papel doble logaritmico y extrae consecuencias sobre el tipo de mecanismo de dispersión predominante.

4.4 Representa $nT^{-3/2}$ en papel semilogarítmico (diagrama de Arrhenius: $\log((nT^{-3/2})$ frente a 1000/T) . Determina la concentración de impurezas del semiconductor así como la energía de la banda prohibida. Compara con un valor tabulado.