

Determinación del Band-gap en Ge

Pablo Pérez y Mariana Zeller

pablperez@yahoo.com, marianzeller@hotmail.com

Laboratorio 5-FCEN-UBA-Curso de verano 2002

En el presente trabajo se determinó el band-gap de una muestra de germanio mediante el estudio de su resistividad en función de la temperatura, utilizando el método de Van der Pauw con un simple dispositivo que puede construirse con elementos usualmente encontrados en un laboratorio para estudiantes. Se encontró que dicho valor es de $(0,73 \pm 0,02)eV$.

Introducción

Según la teoría de bandas existen bandas de conducción y bandas de valencia.

El intervalo de energía entre la banda de conducción y la de valencia es el denominado band-gap. El band-gap es la energía necesaria para llevar un electrón de la banda de valencia a la de conducción.

Dependiendo de cuántos electrones haya en cada una de las bandas los materiales se comportarán como aislantes, conductores o semiconductores.

En el caso del germanio, que es un material semiconductor, existen electrones en la banda de conducción y huecos en la de valencia. El número de pares huecos-electrones varía con la temperatura. En este caso, la conductividad del material viene dada por :

$$\sigma = c \cdot \exp\left(\frac{-E_g}{2KT}\right) \quad (1)$$

donde E_g es la energía del band-gap; K la constante de Boltzman; T la temperatura; y c una constante que puede considerarse independiente de la temperatura si $E_g \gg KT$.

La fórmula (1) es aplicable cuando el grado de impurezas e imperfecciones en la red no es muy alto, pues entonces la movilidad está determinada principalmente por la dispersión de los portadores de carga debido a oscilaciones acústicas de la red para temperaturas superiores a 400K. También sabemos que

$$\rho = 1/\sigma \quad (2)$$

donde ρ es la resistividad.

Si graficamos $\ln \sigma$ en función de $-\frac{1}{2KT}$ encontramos una recta cuya pendiente es E_g .

Desarrollo experimental

El experimento consistió en calcular la resistividad de una muestra de geometría plano paralela, de espesor d, mediante la técnica de van der Pauw. La técnica consiste en enviar corriente por dos electrodos consecutivos de los cuatro que posee la muestra conectados a sus bordes y medir la diferencia de potencial por los otros dos, para dos configuraciones distintas, a una dada temperatura.

Con dichos voltajes y corrientes se pueden definir:

$$R_{AB,CD} = V_{DC} / I_{AB} \quad \text{y} \quad R_{AD,BC} = V_{BC} / I_{AD} \quad (3)$$

y ellas están relacionadas con ρ mediante la siguiente fórmula (4)

$$\exp\left(-\pi R_{AB,CD} d / \rho\right) + \exp\left(-\pi R_{AD,BC} d / \rho\right) = 1$$

donde d es el espesor de la muestra, ρ la resistividad y $R_{ij,kl}$ las resistencias calculadas. Se introdujo, para ello, la muestra en un horno eléctrico y se varió la temperatura utilizando un variac; controlando la misma con una termocupla tipo K y un voltímetro (ver figura 1).

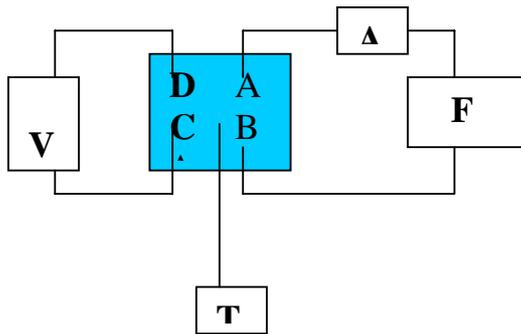


Figura 1: V: voltímetro; T: termocupla tipo K, F: fuente de tensión, A: amperímetro. En azul la muestra de germanio

Manteniendo la temperatura constante se midieron V_{DC} ; V_{BC} ; I_{AB} y I_{AD} y se calcularon $R_{AB,CD}$ y $R_{AD,BC}$.

Para eliminar potenciales termoeléctricos y de contacto en el circuito (V_{TyC}) se midieron además $V_{mult.}(I)$ y $V_{mult.}(-I)$, pues:

$$\begin{aligned} V_{mult.}(I) &= V_{muestra} + V_{TyC} \\ V_{mult.}(-I) &= -V_{muestra} + V_{TyC} \end{aligned} \quad (5)$$

Entonces, para anular dichos efectos :

$$V_{muestra} = \frac{V_{mult.}(I) - V_{mult.}(-I)}{2} \quad (6)$$

Con los datos obtenidos se resolvió numéricamente la ecuación (4) y se obtuvo ρ para distintas temperaturas.

Análisis de resultados

Se realizó una serie de mediciones cubriendo un rango de temperaturas entre 62 y 293°C. Según la teoría para bajas temperaturas, la resistividad aumenta al aumentar la temperatura debido a la mayor agitación térmica de los electrones del material. Si se sigue aumentando la temperatura comienza a verse el efecto de pasaje de electrones de la banda de valencia a la de conducción, reduciendo así la resistividad. Este último efecto se observó en todo el rango de temperatura de medición, a diferencia de un trabajo anterior con silicio donde se observó recién a partir de los 100°C aproximadamente.

En cada medición se fijó la temperatura y se procedió a medir las resistencias $R_{ab,cd}$ y $R_{ad,bc}$ utilizando el método de la inversión de la corriente descrito en las ecuaciones (5) y (6) para eliminar las resistencias de los contactos. A pesar de haberse construido el dispositivo en forma simétrica, se observó una gran asimetría en los valores obtenidos para las resistencias. La resistencia R_{ab} tenía un valor de aproximadamente 20 veces el de R_{ad} , dada una temperatura. Los errores obtenidos para estas resistencias fueron muy grandes. Para R_{ab} se obtuvo un error que rondaba el 5% y que crecía rápidamente hasta el 15% para las temperaturas medidas más altas. Y para

R_{ad} el error rondaba el 15% para alcanzar el 100% en las temperaturas más altas. Estas consideraciones pueden verse reflejadas en las barras de error de los gráficos que se muestran más adelante.

El espesor $d=(1,68\pm 0,01)$ mm de la muestra rectangular de germanio junto con los valores de las resistencias antes mencionadas sirvieron para resolver numéricamente la ecuación (4). Para ello se utilizó un método iterativo numérico implementado con un sencillo programa en una PC, obteniéndose finalmente la conductividad correspondiente a cada valor de temperatura. Siguiendo la fórmula (1) se grafica $\ln\sigma$ vs $\frac{-1}{2KT}$ de forma que la pendiente del gráfico sea la E_g buscada.

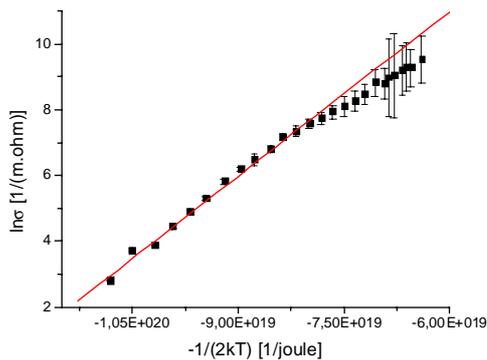


Gráfico 1: la pendiente de la recta que ajusta los puntos es la energía E_g de la banda prohibida con una correlación $R=0.99387$

Tras ajustar los puntos con una recta se obtuvo el valor del ancho de la banda prohibida que resultó ser

$$E_g = (1,05\pm 0,02) \text{ eV},$$

sabiendo que $1\text{eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Sin embargo, se ve a simple vista que la distribución de puntos responde a dos pendientes distintas en las mitades

izquierda y derecha del gráfico. Si se linealizan los puntos de bajas y altas temperaturas por separado, se obtiene el siguiente gráfico.

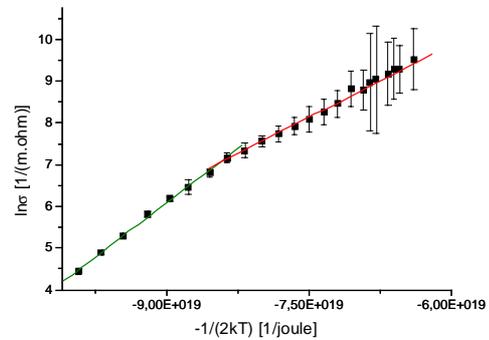


Gráfico 2: las recta de la izquierda ajusta los puntos con una correlación de 0,99897 y la de la derecha con una de 0,99739.

Tras convertir la pendiente obtenida en joules a eV se obtuvo para bajas temperaturas

$$E_{g,baja} = (1,08\pm 0,02) \text{ eV},$$

mientras que para altas el valor fue de

$$E_{g,alta} = (0,73\pm 0,02) \text{ eV}.$$

Si se comparan los resultados obtenidos con los que aparecen en las tablas de los textos, que son 0,78eV para la extrapolación a $T=0^\circ\text{K}$ de la energía de bandgap del Ge, se ve mayor coincidencia a temperaturas más altas.

Conclusiones

Es posible mejorar varias cosas del arreglo experimental empleado para mejorar las mediciones. En esta experiencia no se contó con ningún dispositivo que autorregulara la temperatura. Era necesario fijar el variac

que alimentaba la resistencia del horno a un voltaje fijo y esperar a que se estabilizara la temperatura, para luego subir o bajar nuevamente el variac hasta obtener la temperatura deseada. Este proceso habitualmente era muy trabajoso y obligaba a realizar las mediciones rápidamente antes de que se modificara la temperatura. Esta inestabilidad se acentúa aún más al trabajar con temperaturas altas (superiores a 150°C). Al aumentar la temperatura aumenta la conductividad exponencialmente, por lo que para altas temperaturas la conductividad toma valores muy altos. En estas condiciones una vez que se lograba fijar el valor de la temperatura, pequeñas variaciones del voltaje entre los bornes (A, B, C y D) producían grandes variaciones de la corriente de prueba y ésta misma corriente entre los bornes lograba calentar la muestra desequilibrándola. Por lo tanto, la temperatura del germanio es un equilibrio entre los calentamientos producidos por la resistencia del horno y por la corriente de prueba. En consecuencia, para estudiar este fenómeno físico es necesario contar con un buen sistema de control térmico. Previamente este grupo de trabajo realizó una experiencia análoga con silicio, pero como el germanio tiene un band-gap más chico su conductividad aumenta antes ante incrementos de temperatura en la muestra. Entonces, el efecto de inestabilidad térmica arriba descrito se acentúa más en el germanio.

Además de lograr mejor estabilidad térmica, para mejorar el método sería necesario contar con dispositivos más sensibles y confiables que los multímetros digitales de mano empleados y contar con un excelente cableado, dado que el efecto de este último sobre toda la experiencia es vital.

Es importante el buen posicionamiento de la termocupla. Su

punta debe hacer un contacto adecuado con la muestra y no moverse durante toda la experiencia.

Como ya se mencionó en la sección *Análisis de resultados*, se observó una marcada asimetría entre las resistencias $R_{AB,CD}$ y $R_{AD,BC}$, siendo el valor de la primera veinte veces el de la segunda en iguales condiciones de temperatura. Dado que la muestra de germanio era una placa rectangular con los contactos A, B, C y D dispuestos en forma aproximadamente simétrica sobre sus bordes, no era de esperar semejante asimetría en los resultados. Si bien esto no contradice la técnica de Van der Pauw, podría indicar alguna falla en las conexiones que, de existir, no fue posible encontrar. Curiosamente las mediciones que este grupo realizó en un trabajo previo con otro dispositivo distinto y una pastilla de silicio circular, también con contactos simétricos, mostró también inesperadamente una asimetría semejante entre resistencias (nuevamente una era aproximadamente veinte veces la otra).

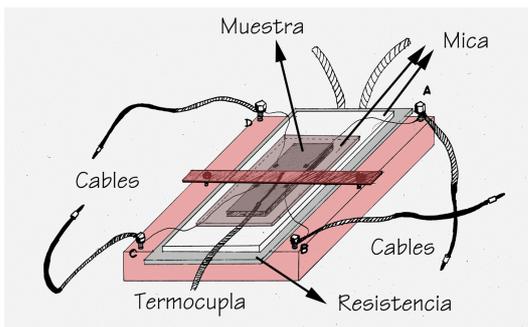
Sería interesante investigar el origen del cambio abrupto de pendiente observado en los ajustes de los datos. Es de esperar según la teoría que los datos se comporten más linealmente a altas temperaturas, motivo por el cual se tomó la mitad de datos de altas temperaturas como el resultado definitivo de la medición (además de ser éstos los que acercaban más el resultado al esperado). A pesar de todo, este mejor comportamiento a altas temperaturas no explica la aparición de dos “rectas” distintas; fenómeno que no se observó en el trabajo anterior con silicio, donde el ajuste se lograba perfectamente con una única recta.

Apéndice 1: Armado del dispositivo

Los elementos utilizados para armar el dispositivo fueron :

- Una plancha aislante
- Una resistencia para calentar la muestra
- Mica para aislar
- Una termocupla tipo K para medir temperaturas
- Muestra de germanio a la cual se le soldaron contactos (ver apéndice 2)
- Tornillos
- Cables

El arreglo de los materiales puede verse en el siguiente gráfico:



Apéndice 2: Preparación de la muestra

Hay que tener especial cuidado en la manera de realizar los contactos sobre la muestra de germanio, pues si ellos están mal hechos pueden malograr el experimento.

Lo primero es conseguir una lámina de caras paralelas de germanio. Conviene tratar de conseguirla lo antes posible, pues si el material debe cortarse puede llevar horas ya que el cristal es muy frágil (es un monocristal). A continuación lo importante es hacer

correctamente los contactos; para ello se debe someter a la muestra a un baño de oro (sputtering) en los sectores en dónde irán dichos contactos. Luego se coloca la muestra en un horno a 120°C para lograr que las moléculas de oro se entrelacen con las de germanio y no se desprenda la película de oro recién depositada.

Una vez pasado un tiempo prudente (idealmente un par de días) se retira la muestra del horno y se le realizan las soldaduras con un epoxi con plata y se le sueldan los cables de tungsteno, que luego se convertirán en los contactos A, B, C y D del método de van der Pauw. Concluido esto la muestra estará lista para ser utilizada.

Bibliografía

- 1- N.W. Ashcroft and N.D. Mermin, "Solid State Physics" (Saunders College Publishing, 1976) pág 562-587.
- 2- D.K. de Vries and A.D. Wieck, "Potential distribution in the van der Pauw technique", Am. J. Phys. 63, 1074-1078 (1995).
- 3- L.J. van der Pauw, "A method for measuring specific resistivity and Hall effect of discs of arbitrary shape", Phillips Res. Report 13, 1-9 (1958).
- 4- H. Ichbach and H. Luth, "Solid-state physics", 2nd Ed, Ed Springer.