

Determinación de la banda de energía prohibida (*Band Gap*) en semiconductores de Si y Ge

Sebastián Nuza y Diego Zocco (mailto: sebasn@hotmail.com , dieduke@yahoo.com)

Laboratorio de Física 5, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Universidad de Buenos Aires
Buenos Aires, febrero de 2001

En el presente trabajo se estudió la banda de energía prohibida (*Band gap* o E_g) en Semiconductores (diodos) de Silicio y Germanio mediante un método basado en el transporte eléctrico obteniéndose un valor para $T=0$ °K de (1.26 ± 0.01) eV y (0.68 ± 0.01) eV respectivamente.

1. Introducción y marco teórico.

Existen algunos materiales en los que la resistividad eléctrica, en clara contradicción con los metales, decrece con la temperatura, estos son los llamados *semiconductores*.

La comprensión de este tipo de materiales comenzó alrededor de 1930 con el desarrollo de la llamada *teoría de bandas*. Esta teoría describe a los semiconductores como a un sólido cuyos electrones se distribuyen en dos bandas de energía separadas por una brecha o *gap*.^(1,2) Los electrones que se encuentran en la banda de energía inferior son los que participan de las uniones atómicas y esta banda es normalmente denominada *banda de valencia*. Los que se encuentran en la banda superior, la llamada *banda de conducción*, son los que participan en las corrientes eléctricas. Debido al hecho antes mencionado de la disminución de la resistividad con la temperatura, un semiconductor a 0 °K se convierte en un aislante.

A temperaturas distintas de cero la conductividad de un conductor es no nula debido a la presencia de electrones (n) en la banda de conducción y de huecos positivos (p) en la banda de valencia.

Una manera de aumentar la conductividad de un semiconductor es mediante el agregado de impurezas en el material. Dependiendo de cual sea esta impureza en el dopaje logramos semiconductores de tipo n ó p. Para el primero se usa generalmente *Indio* o *Aluminio* (trivalentes) y para el segundo *Arsénico* (pentavalente).

Se tiene una juntura cuando el dopaje varía según la posición. Esto es lo que sucede con los diodos, los cuales en nuestro caso son de Si y Ge. En estos componentes se encuentran en contacto dos semiconductores de tipo p y n generando una zona de polaridad positiva y otra de polaridad negativa⁽¹⁾.

La ecuación de corriente en función del voltaje para una juntura viene dado por:

$$I = I_0 \cdot [e^{\frac{e.V}{\eta.k.T}} - 1] \quad (1)$$

donde e es la carga del electrón (1.6×10^{-19} C), V es el voltaje en Volts, η es un factor de idealidad cuyo valor depende de que juntura se trate, k es la constante de Boltzmann ($k = 8.617 \times 10^{-5}$ eV.K⁻¹) y T es la temperatura en grados Kelvin. El factor I_0 se llama *corriente inversa de saturación* y viene dado por:

$$I_0 = B.T^3 \cdot e^{-\frac{E_g(T)}{\eta.k.T}} \quad (2)$$

donde $E_g(T)$ es el valor de la brecha de energía y B es una constante que depende de las densidades de los portadores n y p, y de sus caminos libres medios.

En el caso en que $e.V \gg kT$ la ecuación (1) puede aproximarse por:

$$I = I_0 \cdot e^{\frac{e.V}{\eta.k.T}} \quad (3)$$

El objetivo de este trabajo es el de determinar la brecha o *gap* de energía de dos semiconductores (diodos), a saber de Silicio y Germanio.

2. Descripción del experimento.

La tarea consiste en armar un circuito para la medición de la corriente I y el voltaje V sobre el diodo a una determinada temperatura T en un mismo instante, hacer repetidas mediciones de lo anterior, cambiar la temperatura y repetir el procedimiento.

Para esto armamos el dispositivo de la figura 1. Alimentamos al circuito con un generador que enviaba una señal de voltaje triangular con el fin de

variar la corriente en el circuito. Conocíamos I al medir la caída de potencial en una resistencia de 100Ω en serie con la fuente. A su vez el potencial V sobre el diodo lo medíamos directamente sobre este.

La temperatura en el diodo se midió con un termómetro de resistencia, la cual variaba con la temperatura. El termómetro se alimentaba con una corriente I_t de aproximadamente 12 mA y lo que hicimos fue medir cambios en esta resistencia (vía $R = V_t / I_t$, donde lo que medíamos realmente era V_t) para luego interpretar estos cambios de resistencia como cambios de temperatura con la ayuda de la calibración resistencia-temperatura del mismo.

La temperatura la fuimos variando desde la del ambiente hasta la del nitrógeno líquido. Esto lo hicimos acercando el diodo a un recipiente térmico que contenía nitrógeno líquido hasta sumergirlo en él. Realizamos esto siempre tomando datos de temperatura, corriente y diferencia de potencial sobre el diodo con la ayuda de un sistema de adquisición de

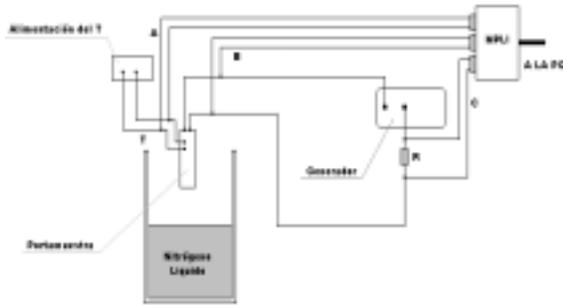


Figura 1 - Dispositivo experimental. Referencias:
 T - Termómetro, R - Resistencia de 100 ohms ,
 A - Termómetro al MPLI, B - Potencial V al MPLI,
 C - Potencial sobre R al MPLI

datos (MPLI) conectado a una computadora con el fin de recolectar la información.

Para llevar a cabo la experiencia debemos trabajar con las ecuaciones (2) y (3). Al linealizar la ecuación (3) obtenemos:

$$\ln(I) = \ln(I_0) + \frac{eV}{\eta \cdot k \cdot T} \quad (4)$$

De esta ecuación y de los datos experimentales se puede deducir el valor del coeficiente de idealidad η .

También se puede aplicar la función logaritmo natural a la ecuación (2), obteniéndose:

$$\ln(I_0) = \ln(B) + 3\ln(T) - \frac{E_g(T)}{\eta \cdot k \cdot T} \quad (5)$$

$$\ln(I_0) = \ln(B) + \frac{\alpha}{\eta \cdot k} + 3\ln(T) - \frac{E_g(0)}{\eta \cdot k \cdot T} \quad (6)$$

De esta ecuación y usando el hecho de que a bajas temperaturas $E_g = E_g(0) - \alpha \cdot T$ (α es una constante positiva) podemos deducir el valor del *gap* a $T = 0$ ya que graficando $\ln(I_0)$ en función de $(\eta \cdot k \cdot T)^{-1}$ podemos

asociar este valor a la pendiente de la recta. La ecuación que resulta es la (6).

Es interesante notar que el termino $3 \cdot \ln(T)$ va a introducir desviaciones en la linealidad, pero como primera aproximación consideramos la recta que mejor ajusta al gráfico y asociamos su pendiente con $E_g(0)$. Por último comparamos los valores obtenidos del *gap* para el diodo de Silicio y de Germanio con los valores sacados de tablas.

3. Análisis de datos.

De la ecuación (4) se realizaron los gráficos de $\ln(I)$ en función del potencial V para los diodos de germanio (figura 2) y silicio (figura 3), donde se puede observar un comportamiento más lineal para este último. A partir de los ajustes de las curvas antes

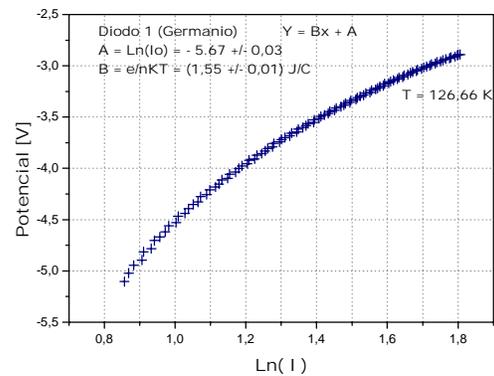


Figura 2 - Gráfico típico de $\ln(I)$ vs. V para el diodo de Germanio (temperatura = $126,66 \text{ K}$). Se puede observar la falta de linealidad para este diodo.

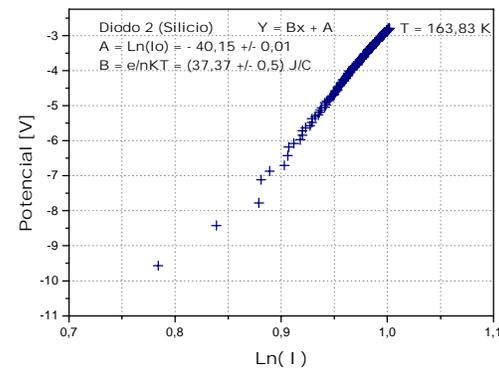


Figura 3 - Gráfico típico de $\ln(I)$ vs. V para el diodo de Silicio (temperatura = $163,83 \text{ K}$). En este caso los datos reflejan un ajuste más lineal.

mencionadas, y teniendo en cuenta la ecuación (6) se procedió a graficar el $\ln(I_0)$ en función de $(\eta \cdot k \cdot T)^{-1}$, obteniendo los valores experimentales de $E_g(0)$ tanto para el diodo de Germanio como para el de silicio. Los resultados se pueden observar en las figuras 4 y 5. Vemos que los valores de la brecha de energía a T

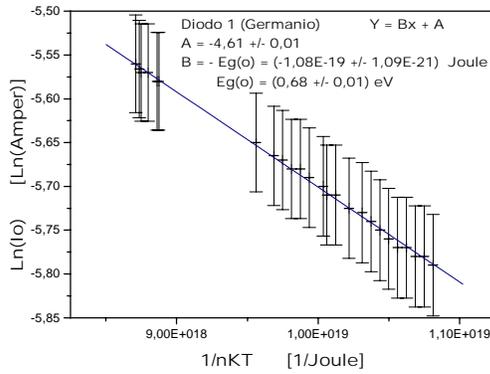


Figura 4 – Gráfico $\ln(I_0)$ vs. $1/\eta KT$ para el diodo de Germanio. Se observa un valor de $E_{g(0)}$ de 0,68 eV.

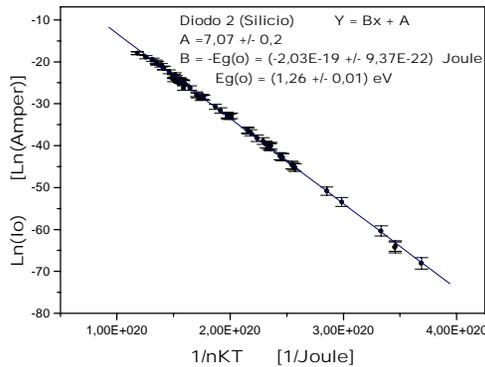


Figura 5 – Gráfico $\ln(I_0)$ vs. $1/\eta KT$ para el diodo de Silicio. Se observa un valor de $E_{g(0)}$ de 1,26 eV.

= 0 obtenidos experimentalmente se encuentran dentro del orden de magnitud esperado, el cual viene dado por los valores aceptados como reales (ver tabla 1). Las bandas de errores vienen dadas por un error atribuido a cada valor del 1 %, el cual sobrepasa levemente el obtenido para cada temperatura, los cuales oscilaban entre el 0,5 y el 1 %.

Se pudo determinar el valor de η utilizando que en la ecuación (4) $B = e/\eta KT$, el cual fue obtenido experimentalmente para cada temperatura, y realizando una estadística concluimos en los resultados presentados en la tabla 1.

Diodo	Eg(0) [eV]		η
	Experimental	Aceptado	
Germanio	0,68 +/- 0,01	0,75	60,73 +/- 20,57
Silicio	1,26 +/- 0,01	1,17	1,78 +/- 0,45

Tabla 1 – Resumen de datos experimentales.

4. Conclusiones

Vemos que si bien los datos obtenidos experimentalmente arrojan valores de la banda gap dentro del orden correcto, no concuerdan exactamente con

los aceptados comúnmente. Esto debemos atribuirlo a diferentes factores que colaboran en esta diferencia. En primer lugar debemos comentar que las curvas de $\ln(I_0)$ vs. V (ec. 4) no presentaban una linealidad perfecta, por lo que debimos ‘depurar’ los puntos correspondientes para cada temperatura y quedarnos sólo con la parte más lineal. Este defecto se debió a que la señal triangular proveniente del generador de funciones que utilizamos para realizar el barrido de tensiones no mantenía la forma deseada al observarla con la computadora, sino que se desformaba para los valores pequeños de potencial debido seguramente a problemas de conexiones, además que deja de valer la aproximación realizada en la ecuación 4. Esto se mejoró considerablemente realizando soldaduras en las conexiones principales, con lo que el problema permaneció pero en menor medida.

Otro punto a considerar es el término no lineal de $3\ln(T)$ en la ecuación (6), el cual no fue tenido en cuenta al momento de ajustar dicha ecuación con una recta, aunque las bandas de errores abarcan dicho ajuste, lo cual presupone que el efecto de dicha no – linealidad no es tan importante, pudiendo despreciarse sin importantes consecuencias.

Debemos aclarar que nos sorprendió el valor elevado del coeficiente η obtenido para el diodo de germanio, no así el del silicio que sabemos varía entre 0 y 1. Si bien no conocemos el orden de dicho valor para el primer diodo, creemos que es muy distinto al del segundo, lo cual le atribuimos especialmente a la falta importante de linealidad de los datos graficados en $\ln(I_0)$ vs. V para este diodo para cada temperatura, con lo cual concluimos que el ajuste con una recta de dichas curvas no fue el más indicado.

Finalmente podemos comentar que se podría implementar un dispositivo de enfriamiento de las muestras semiconductoras distinto al utilizado por nosotros (termo), ya que se dificultaba la inmersión o extracción cuidadosa de dicho sistema en el nitrógeno líquido, lo cual provocó quizás cambios bruscos en la temperatura de los diodos.

5. Bibliografía

- (I) N. W. Ashcroft y N.D. Mermin, *Solid State Physics* (Saunders College Publishinh, 1976)
- (II) C. Kittel, *Introduction to solid State Physics* (John Wiley & Sons, Inc.)
- (III) A. Sconza, G. Torzo and G. Viola, “Experiment on a pn junction,” *Am. J. Phys.* 62, 66 (1994).
- (IV) P. Collings, “Simple measurement of the band gap in silicon and germanium,” *Am. J. Phys.* 48, 197 (1980)