

Medición del Band Gap en semiconductores de Si y Ge

Abigail Ganopol*, Leandro Giuliani† y María Luz Martínez Ricci‡

Laboratorio de Física 5-Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Universidad de Buenos Aires

Febrero de 2002

En la experiencia se trató de determinar la banda de energía prohibida de dos semiconductores, silicio y germanio, mediante el ajuste de un modelo sencillo de transporte eléctrico. Se obtuvo para el silicio resultados que concuerdan con los valores aceptados, mientras que para el germanio se observó una discrepancia significativa respecto del valor tabulado.

I. Introducción

Para estudiar el band gap (E_g) en semiconductores se usó silicio y germanio, que son las sustancias semiconductoras más frecuentemente utilizadas en la actualidad. Estos elementos son aisladores a temperaturas muy bajas, cerca del cero absoluto, pero conducen electricidad a temperatura ambiente.⁽¹⁾

Para materiales conductores existe al menos un nivel de energía parcialmente completo, mientras que los materiales aislantes tienen todos sus niveles totalmente ocupados o bien totalmente vacíos, lo cual evita que haya conducción. Se los suele caracterizar por su diferencia entre la energía del nivel más alto completo, y el más bajo vacío: esto es el gap de energía. Para temperaturas distintas del cero absoluto, aparece una corriente observable pues algunos electrones pueden abandonar las bandas ocupadas más altas (bandas de valencia) para pasar a bandas vacías más bajas (bandas de conducción). Se trata de materiales semiconductores. Los electrones excitados que originan una

corriente inducen a su vez otra de huecos, generada por aquellos electrones que en las bandas de valencia que otros electrones han abandonado.

Denominamos n al número de electrones por unidad de volumen en la banda de conducción, y p al número de huecos por unidad de volumen en la banda de valencia. Tanto n como p dependen del grado de impureza del material.

Existe una gran cantidad de semiconductores conocidos. El silicio y el germanio son los más usados hoy en día. Estos elementos cristalizan en la red del diamante, un tipo de estructura cúbica en la que los átomos tienen enlaces tetraédricos con sus cuatro vecinos más cercanos. Son aislantes a temperaturas muy bajas (cerca del cero absoluto), pero conducen la electricidad a temperatura ambiente.

A un conductor puro (por ejemplo un cristal de germanio) se le reemplaza un átomo de Ge por uno de arsénico. Los átomos de germanio tienen valencia 4, estando la estructura cristalina controlada por los 4 electrones de valencia. Por otra parte, el arsénico tiene

* mailto: candelize@yahoo.fr

† mailto: leandroeg@yahoo.com

‡ mailto: marliebe@yahoo.com

valencia 5. Pero debido a su tamaño, un solo átomo del mismo puede instalarse en la red del germanio. Para hacerlo debe actuar como un átomo que tiene valencia 4. El electrón adicional está muy flojamente ligado, pudiendo moverse por la red como un electrón libre a temperatura ambiente. Un átomo de impureza tal como el arsénico se denomina dador porque puede dar un portador negativo al cristal. Si se incluye en el germanio un átomo de impureza cuya valencia es 3 (como el aluminio), éste actúa como aceptador, porque acepta un electrón.

Cuando se agrega una impureza dadora o aceptadora a un semiconductor, decimos que el cristal está dopado. Una juntura pn es un cristal semiconductor tal que su nivel de impurezas varía en una de las direcciones del mismo, y sólo en una pequeña porción, conteniendo en una región dadores, mientras que en la otra, sólo aceptores.

Con el objeto de calcular el ancho de E_g se partió de la relación entre corriente y voltaje de una juntura p-n dada por:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{eV}{\eta kT}} - 1 \right) \quad (1)$$

donde e es la carga del electrón, V es el voltaje en Volts, η es un factor de idealidad dependiente de la juntura, k es la constantes de Boltzmann y T es la tempertura en Kelvin. El factor I_0 se denomina corriente inversa de saturación del sistema $p-n$ y viene dada por:

$$I_0 = BT^3 e^{-\frac{E_g(T)}{\eta kT}} \quad (2)$$

donde $E_g(T)$ es el valor del gap de energía dependiente de la temperatura y B una constante que depende de las

densidades de portadores n y p y de sus caminos libres medios. En el caso en que $eV \gg kT$, la ecuación (1) se puede aproximar por:

$$I = I_0 e^{\frac{eV}{\eta kT}} \quad (3)$$

II. El experimento

Como junturas semiconductoras se emplearon dos diodos, uno de silicio y uno de germanio. Se construyó un circuito como el de la figura 1 para determinar la curva característica $I-V$ de cada diodo.

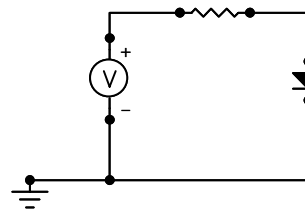


Fig N°1: Modelo del circuito utilizado para medir $E_g(0)$

El diodo fue colocado junto con *Pt100*, previamente calibrado (Ver Apéndice), en el extremo de una varilla que pudiese ser introducida en un termo con nitrógeno líquido. A medida que el diodo iba siendo introducido en el termo, se fueron levantando diferentes curvas de $I-V$ variando la temperatura en el rango desde la ambiente hasta valores cercanos a la del nitrógeno líquido.

Las curvas observadas eran semejantes a la que se muestra a continuación (Fig. 2):

A partir de estos gráficos se determinaron los valores de I_0 y de $\frac{1}{\eta kT}$ con el objetivo de conocer el valor del gap a $T=0K$ ($E_g(0)$) a partir de la

ecuación (2) y de la dependencia en temperatura de E_g que se puede representar como⁽²⁾:

$$E_g(T) = E_g(0) - \alpha T \quad (4)$$

donde α es una constante positiva.

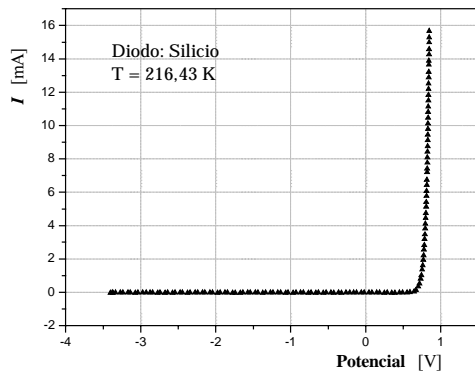


Fig. N°2: Gráfico ejemplificativo de I vs V para el diodo de silicio

Linealizando la ecuación (2) y utilizando la (4) puede llegarse a una única expresión para la relación entre el $\ln(I_0)$ y $\frac{1}{\eta kT}$, dada por:

$$\ln(I_0) = ctes - \frac{E_g(0)}{\eta kT} \quad (5)$$

III. Análisis de datos

a) Silicio

Se graficó el $\ln(I_0)$ en función de eV y se observó una relación lineal entre ellos, como era de esperarse de la ecuación (3). La figura 3 muestra un ejemplo de este comportamiento. Realizando un ajuste lineal para cada uno de estos gráficos, se obtuvieron los valores de $\ln(I_0)$ y de $\frac{1}{\eta kT}$ para cada temperatura.

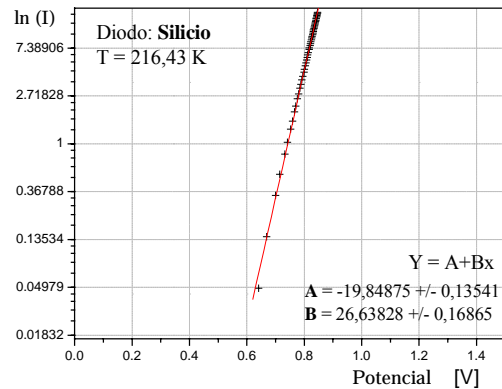


Fig N°3: Gráfico ejemplificativo de la curva $\ln(I)$ vs V para el diodo de silicio

Con estos datos se realizó la figura 4 en donde se ve el comportamiento lineal previsto en la ecuación (5).

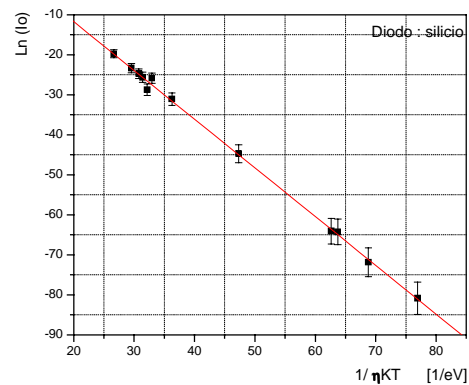


Fig. N°4: Gráfico de $\ln(I_0)$ vs $1/\eta kT$ para el diodo de silicio. Se obtiene un valor para $E_g(0)$ de 1,21 eV.

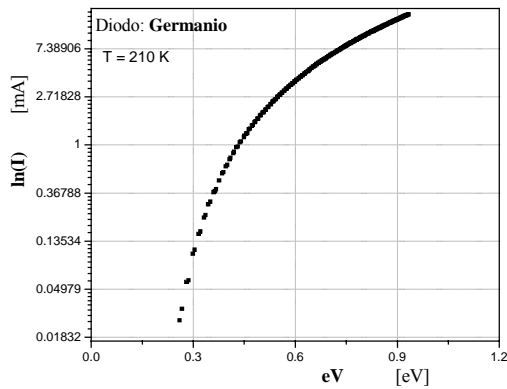
Realizando una regresión lineal se calculó el valor de la pendiente correspondiente a $-E_g(0)$, obteniéndose para dicho gap un valor de **(1,21±0,08)eV**.

Para realizar el ajuste y calcular los errores se definió el peso de los datos como $w_i=1/E_i^2$, donde E_i es el error absoluto correspondiente al dato i ⁽⁵⁾.

b) Germanio

Repetiendo el procedimiento realizado para el diodo de silicio, se

realizó el gráfico de $\ln(I)$ vs eV para cada temperatura. Un ejemplo de estos se muestra a continuación en la figura 5.



En estos gráficos se observa que el comportamiento no es lineal como había ocurrido para el diodo de silicio, resultando imposible realizar el ajuste.

En un principio, se supuso que no era válida la aproximación de que $eV \gg kT$ y se decidió utilizar solo la última parte de la curva, ya que en esa región los valores de eV son mayores y se observa un comportamiento más lineal. En la figura 6 se observa uno de los gráficos obtenidos y el ajuste lineal realizado.

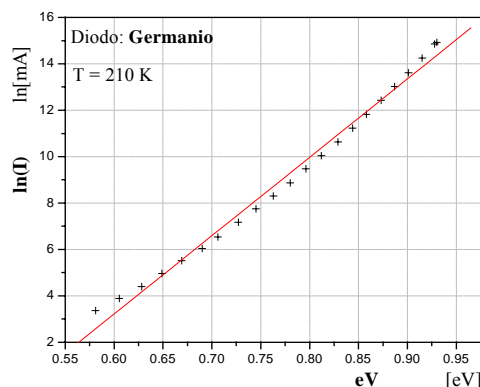


Fig. N°6: Gráfico $\ln(I)$ vs eV con ajuste lineal de los últimos datos de la curva original

Mediante este ajuste se obtuvieron los valores de $\ln(I_0)$ y de $\frac{1}{\eta kT}$ para cada temperatura. Con estos valores se realizó el gráfico de $\ln(I_0)$ vs $\frac{1}{\eta kT}$ así como se hizo para el caso del silicio, pudiéndose observar el mismo en la figura 7.

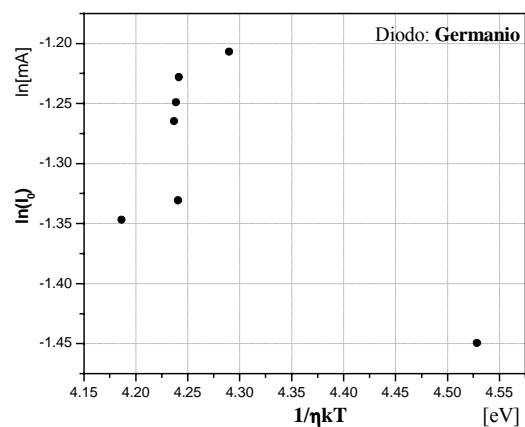


Fig. N°7: Gráfico de $\ln(I_0)$ vs $1/\eta kT$ de los obtenidos para el diodo de germanio para el ajuste con los últimos datos de cada temperatura

El resultado obtenido no concuerda con lo esperado ya que claramente no presenta un comportamiento lineal. También se puede ver que el valor obtenido para $\frac{1}{\eta kT}$ es el mismo para varias temperaturas.

A continuación, teniendo en cuenta que quizás no era válida la aproximación que nos permitía utilizar la ecuación (3), se decidió realizar el ajuste usando una expresión como la de la ecuación (1). Con los valores obtenidos mediante este procedimiento, se volvió a

realizar un gráfico de $\ln(I_0)$ vs $\frac{1}{\eta kT}$ que se muestra en la figura 8.

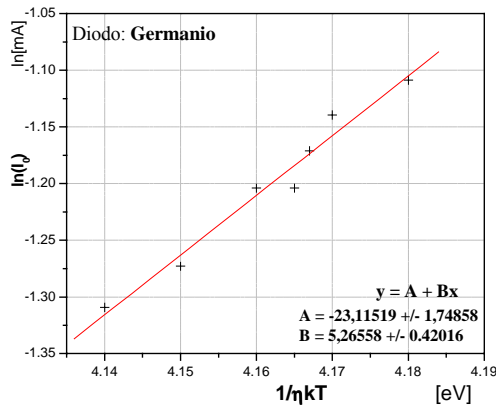


Fig. N°8: Gráfico $\ln(I_0)$ vs $1/\eta kT$ para el ajuste exponencial sin la aproximación $eV \gg kT$

En este gráfico se observa un comportamiento más lineal, aunque a primera vista se advierte que la pendiente no es la adecuada debido a que tendría que ser negativa. De todos modos se realizó el ajuste lineal que dio como resultado para el gap un valor de $(-5,2 \pm 0,4) eV$ con un coeficiente de correlación de 0,98. Este valor no concuerda con el que se esperaba obtener, ya que el valor aceptado para el mismo es de $0,68 eV$

IV. Conclusiones

Diodo	Eg(0) [eV]	
	Experimental	Tabulado
Silicio	$1,21 \pm 0,08$	1,17
Germanio	$5,2 \pm 0,4$	0,68

Tabla N°1: datos obtenidos y tabulados

En el caso del silicio se puede observar que el valor obtenido para el band gap a $T=0K$ es aceptable

comparado con el valor tabulado. Esto da muestras de que el modelo utilizado describe bien el fenómeno en el caso del silicio, y del cumplimiento de las suposiciones realizadas. Para este tipo de diodos, se concluye que este método es bastante bueno para la medición del band-gap.

No sucede lo mismo en el caso del germanio. Para este semiconductor, se aprecia que ninguno de los tres ajustes realizados nos arrojan como resultado un valor compatible con el ya tabulado. Atribuimos esta marcada diferencia a que el rango de temperaturas con el cual se trabajó no fue lo suficientemente bajo como para que valgan las ecuaciones propuestas para modelar este semiconductor. Es decir, cuando se comenzó a bajar la temperatura del diodo para obtener diferentes mediciones para diferentes temperaturas, el termo en donde se encontraba el nitrógeno líquido estaba prácticamente lleno. Como consecuencia no se dispuso de una diferencia de alturas sustancial entre el borde del termo y el del nitrógeno líquido como para llegar a las temperaturas lo suficientemente bajas. Por lo tanto, se concluye que para los datos obtenidos el modelo propuesto no ajusta a este semiconductor.

Sin embargo, se deja propuesto realizar nuevas mediciones de este semiconductor como para asegurar lo mencionado anteriormente.

Apéndice : Calibración Pt100

Para calibrar la resistencia de platino, se utilizó la ecuación:

$$R(T) = R_0 (1 + \alpha \Delta T)$$

Donde: $R_0 = (98,1 \pm 0,1)\Omega$

$$\alpha = 0,003927 \text{ 1/}^\circ\text{C}$$

Un análisis de los resultados obtenidos mostró que se podrían haber empleado las siguientes ecuaciones:

- Si $0 < T < 850^\circ\text{C}$:

$$R(T) = R_0 (1 + \alpha \Delta T + \beta \Delta T^2)$$

- $-200^\circ\text{C} < T < 0^\circ\text{C}$:

$$R(T) = R_0 (1 + \alpha \Delta T + \beta \Delta T^2 + \gamma(T - 100^\circ\text{C})\Delta T^2)$$

Donde $\beta = -0,58.2 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}$
 $\gamma = -4,2735 \cdot 10^{-12} \text{ }^\circ\text{C}^{-3}$

Referencias

- (1) **Feymann/ Leighton/ Sands**, *Feynman Vol III*, Addison Wesley, 1971
- (2) **Harald Ibach/ Hans Lüth**, *Solid State Physics*, Springer, 1995
- (3) **Aschroft & Mermin**, *Solid State Physics*, Saunders College Publishing, 1976
- (4) **A. Sconza, G.Torzo and G. Viola**, "Experiment on a pn junction", *Am. J. Phys.* **62**, 66 (1994)
- (5) www.fisicareativa.com, **S. Gil y E. Rodríguez**, *Métodos cuantitativos de análisis gráficos. Cap.3.3.*