

# Estudio de la banda de energía prohibida en semiconductores (*Band Gap*) a bajas temperaturas

Mariano Poisson, Enzo Tagliacuci

Laboratorio 5, FCEyN – UBA

12 de octubre de 2007

En el presente trabajo se estudió la banda de energía prohibida en semiconductores (diodos) de silicio y germanio a bajas temperaturas y sus factores de idealidad. Se obtuvieron valores de  $1,35 \pm 0,05$  eV y  $0,43 \pm 0,09$  eV respectivamente para la brecha de energía y factores de idealidad de  $1,9 \pm 0,1$  y  $4,6 \pm 0,3$ . Dichas magnitudes concuerdan dentro de límites razonables con los hallados en la literatura.

## 1. INTRODUCCIÓN Y TEORÍA

Una peculiaridad de los materiales conocidos como semiconductores es que la resistividad disminuye con la temperatura, a diferencia de los metales, en los cuales la situación es la inversa. A fines de explicar este fenómeno se desarrolló la teoría de bandas. De acuerdo a esta teoría, los electrones se distribuyen en bandas de energía bien diferenciadas, y la distancia entre ellas se denomina brecha (o “gap”). Los electrones, entonces, pueden acomodarse en dos bandas: en una de ellas (banda de valencia) se encuentran los que participan de las uniones atómicas, y en la otra (banda de conducción) se encuentran los que participan en las corrientes eléctricas presentes en el material.

En un buen conductor, la banda de conducción se encuentra ocupada solo parcialmente, favoreciendo el transporte de electrones y la conducción eléctrica. En cambio, en un aislante la banda de valencia se encuentra totalmente ocupada y separada de la banda de conducción por una brecha del orden de 10 eV.

En un semiconductor la situación es similar: las bandas de valencia y conducción se encuentran separadas por una brecha de energía. No obstante, existe una diferencia fundamental, ya que la energía de separación entre las bandas es menor que en un aislante (típicamente del orden de 1 eV). Debido a esta pequeña diferencia es posible excitar térmicamente los electrones de la banda de valencia hasta la banda de conducción. Al aumentar la temperatura, cada

vez más electrones migran de banda de energía. Cuando se ocupa parcialmente la banda de conducción, el material actúa como un conductor con cargas negativas en la misma, y cargas positivas (“agujeros” dejados por los electrones migrados). La presencia de electrones en la banda de conducción implica un aumento en la conductividad, de esta forma la teoría de bandas predice correctamente esta característica de los semiconductores.

Para una juntura tipo *n-p* (diodo) la dependencia característica de la corriente con el voltaje aplicado es

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

donde  $I_0$  representa la corriente inversa de saturación,  $T$  la temperatura en grados Kelvin,  $e$  es la carga del electrón ( $1.6 \times 10^{-19}$  C),  $k$  es la constante de Boltzmann ( $8.617 \times 10^{-5}$  eV.K<sup>-1</sup>) y  $\eta$  es el factor adimensional de idealidad y depende específicamente de cada diodo.

La dependencia con la temperatura viene dada por la siguiente expresión

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

en la cual  $E_g(T)$  es el “*band-gap*” a temperatura  $T$  y  $B$  es una constante.

El objetivo de este trabajo será realizar mediciones de la corriente inversa de saturación y mediante ajustes adecuados determinar los valores de la brecha de energía y la constante de idealidad para diodos de silicio y germanio. Para

llevar a cabo esta tarea primero debemos realizar algunas simplificaciones y manipulaciones sobre las fórmulas 1 y 2. En primer lugar, observamos que si  $eV \gg \eta kT$ , la fórmula 1 puede simplificarse a

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

Tomando logaritmos y linealizando la ecuación 1 llegamos a

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

Realizando el mismo procedimiento sobre la ecuación 2 tenemos

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

Por último, puede demostrarse que a bajas temperaturas existe una constante positiva  $\alpha$  tal que  $E_g = E_g(0) - \alpha T$ , por lo que toda la expresión 5 puede escribirse en términos de esta constante y la brecha de energía a 0 °K como

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

Si bien esta fórmula es no lineal por la presencia del logaritmo de la temperatura, podemos aproximar a este término como una constante argumentando que el crecimiento del logaritmo es despreciable frente al de  $T^{-1}$ .

Emplearemos entonces la fórmula 5 para hallar, a partir de su pendiente, el factor de idealidad  $\eta$  y la fórmula 6 para encontrar el valor de  $E_g(0)$ .

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El objetivo del procedimiento experimental es realizar mediciones de corriente vs. voltaje sobre el diodo para encontrar la corriente inversa de saturación en función de la temperatura. Para realizarlas se preparó un circuito como se muestra en la figura 1.

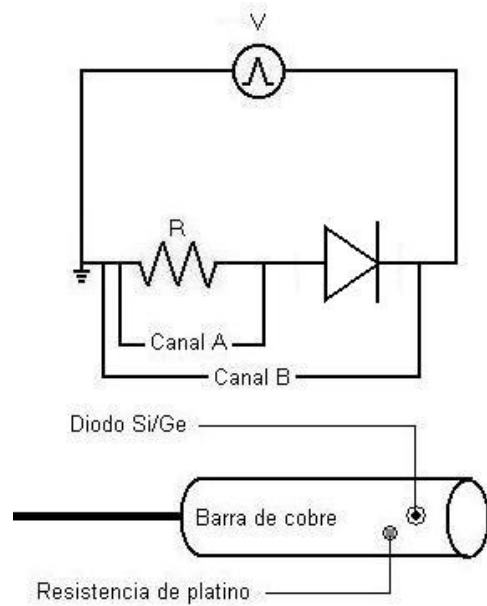


Fig 1: Diagrama del circuito utilizado para la medición de la caída de potencial sobre la resistencia y el diodo (arriba) Diodo y termocupla montadas en una barra de cobre para la medición a distintas temperaturas (abajo).

Como fuente de tensión se utilizó un generador de funciones que entregó una señal triangular de aproximadamente 5 V y una frecuencia de 1.3 Hz. Para regular la tensión en el primer diodo se usó una resistencia de  $558 \pm 2 \Omega$  y para el segundo una de  $1167 \pm 2 \Omega$ . Se registraron las mediciones de voltaje en los Canales A y B, indicados en la figura 1, mediante una placa de adquisición MPLI para cada valor de temperatura fijo. Para regular esta última, se introdujo la barra de cobre con los diodos y la resistencia de platino en un recipiente con nitrógeno líquido, de esta manera fue posible recorrer un rango de temperaturas entre 0 °C y -130 °C. Las mediciones de la temperatura fueron realizadas con un multímetro, registrándose los valores de la resistencia de platino y luego recurriéndose a la fórmula de calibración adecuada.

## 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Una vez realizadas las mediciones de  $I$  vs  $V$  para distintas temperaturas para ambos diodos, procedemos a calcular los factores de idealidad. Para ello realizamos un ajuste lineal de  $\ln(I)$  vs  $V$  a una temperatura fija (figuras 2 y 3)

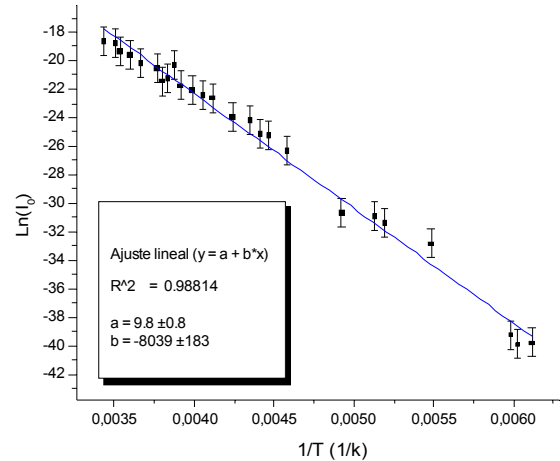
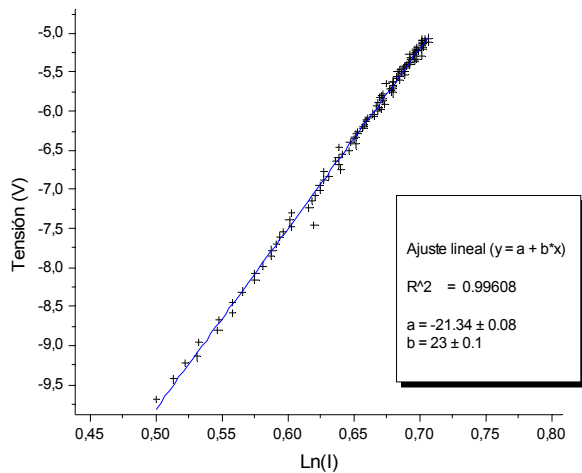


Fig 2 y 3: Ajustes lineales de  $\ln(I)$  vs  $V$  a temperatura fija para diodos de Si y Ge respectivamente (barras de error dentro de la dimensión de los puntos experimentales)

Fig 4 y 5: Ajustes lineales de  $\ln(I_0)$  vs  $T^{-1}$  para diodos de Si y Ge respectivamente

A partir de las pendientes del ajuste (de acuerdo con la fórmula 4) encontramos valores de  $\eta_{Si} = 1,9 \pm 0,1$  y  $\eta_{Ger} = 4,6 \pm 0,3$ .

Luego encontramos la ordenada de origen en cada uno de los gráficos de  $\ln(I)$  vs  $V$  dentro del rango de temperaturas recorrido. Para encontrar el valor de la brecha de energía  $E_g(0)$  tanto para el silicio como para el germanio, graficamos cada uno de los valores de  $\ln(I_0)$  en función de  $T^{-1}$  y, de acuerdo con la fórmula 6, podemos despejar de la pendiente del ajuste el valor del “band gap”. Dichos ajustes se muestran en las figuras 4 y 5 para los diodos de silicio y germanio, respectivamente.

Recurriendo a la información brindada por estos ajustes encontramos valores de  $E_g(0)_{Si} = 1,35 \pm 0,05$  eV y  $E_g(0)_{Ger} = 0,43 \pm 0,09$  eV.

Nuestras principales fuentes de errores de medición fueron la temperatura (medida como el valor de la resistencia de platino y luego convertida mediante una calibración) y el error en la determinación de la ordenada de origen en la fórmula 4. Ambos errores son de aproximadamente la misma magnitud y representan un error relativo de alrededor de 2%.

Representamos las magnitudes medidas y las encontradas en la literatura en la tabla 1 a fin de facilitar su comparación (los factores de idealidad no

poseen un valor definido ya que no solo dependen del material del diodo sino del diodo mismo, su historia, construcción, etc. Sin embargo luego de buscar distintos valores en la bibliografía encontramos las magnitudes aproximadas listadas en la tabla 1)

|                | Valores experimentales | Valores tabulados <sup>(1)</sup> |
|----------------|------------------------|----------------------------------|
| $E_g(0)_{Sil}$ | $1,35 \pm 0,05$ eV     | 1,23 eV                          |
| $E_g(0)_{Ger}$ | $0,43 \pm 0,09$ eV     | 0,67 eV                          |
| $\eta_{Sil}$   | $1,9 \pm 0,1$          | $\approx 1,5$                    |
| $\eta_{Ger}$   | $4,6 \pm 0,3$          | $\approx 4$                      |

Tabla 1: Magnitudes experimentales y tabuladas

#### 4. DISCUSIÓN FINAL

En esta experiencia hallamos valores de “band gap” que creemos razonablemente concordantes con aquellos tabulados. Si bien pretender un acuerdo exacto sería ir demasiado lejos (ya que realizamos simplificaciones y despreciamos términos – por ejemplo  $3\ln(T)$  en la fórmula 6) el modelo se presenta como satisfactorio dentro del rango de temperaturas explorado y la precisión de nuestro instrumental.

Comparando ambos diodos, encontramos que el comportamiento del de silicio se ajusta mucho mejor por la fórmula 1 sin correcciones (i.e. con factor de idealidad unitario), lo cual también pudimos apreciar de las figuras 2 y 3 (el logaritmo de la corriente en el diodo de silicio presenta un comportamiento prácticamente lineal, mientras en el diodo de germanio observamos que el rango lineal es mucho menor). Esto se traduce en un mayor error en la determinación de la ordenada de origen en los ajustes para el diodo de germanio, como ilustran las barras de error de las figuras 4 y 5, y por consiguiente en un mayor error final a la hora de calcular  $E_g(0)_{Ger}$ .

Concluimos que el método experimental es apropiado y dentro de su simplicidad presenta una alternativa viable para el estudio de la banda de energía prohibida en materiales semiconductores. Su restricción más obvia es que sólo es aplicable a bajas temperaturas, aunque luego de realizar una corrección de algunas aproximaciones en las fórmulas empleadas para los ajustes y de reemplazar el estaño en las soldaduras de la resistencia de platino, podría utilizarse para altas temperaturas

reemplazando el nitrógeno líquido por arena o aceite caliente.

Lograr una buena cantidad de puntos experimentales fue uno de los mayores problemas: al bajar lentamente el dispositivo en el recipiente con el nitrógeno líquido y esperar que la temperatura se estabilice es difícil medir densamente sobre todo el rango de temperaturas. Un recipiente de mayores dimensiones u otro líquido refrigerante suplirían esta falencia.

Finalmente, el experimento podría extenderse a otros diodos, por ejemplo LEDs (*Light Emmiting Diodes*), es decir, diodos que emiten energía electromagnética en el visible. Nosotros intentamos medir el “band gap” en LEDs empleando este procedimiento experimental, pero encontramos que el comportamiento de I vs V difiere demasiado del descrito por la fórmula 1. Esto hace que no tenga sentido aplicar todas las linealizaciones subsiguientes y por lo tanto sería necesario partir de otro modelo teórico para analizar correctamente los datos.

#### 5. REFERENCIAS

1. W. Precker, M. da Silva, “Experimental estimation of the band gap in silicon and germanium from the temperatura – voltage curve of diode thermometers”. Am J. Phys 70 (11), 2002.
2. Determinacion de la banda prohibida de silicio y germanio  
[http://www.df.uba.ar/users/acha/Lab5/band\\_gap99.pdf](http://www.df.uba.ar/users/acha/Lab5/band_gap99.pdf)
3. C. Scannapieco, M.A. Kuroda, “Medición del gap de energía en materiales semiconductores de silicio y germanio”  
[http://www.fisicarecreativa.com/informes/infor\\_mod/semicon\\_gap.pdf](http://www.fisicarecreativa.com/informes/infor_mod/semicon_gap.pdf)

