

# DETERMINACIÓN DE LA BANDA PROHIBIDA (BAND GAP) EN Si

*Travizano, Matías, Romano, Sebastián y Kamienkowski, Juan  
Laboratorio 5, Departamento de física, UBA- 2002*

## **Resumen**

*En este trabajo se realizó la medición del ancho de la banda de energía prohibida (Band Gap) de semiconductores de Silicio. Para ello, se estudió el comportamiento de la resistividad en función de la temperatura, y se utilizó el método de “cuatro puntas”, obteniéndose un valor de  $E_g=(1.18 \pm 0.03)$ .*

## **Introducción**

Los semiconductores son materiales que se caracterizan por tener una conductividad que es directamente proporcional a la temperatura, al contrario de los metales. Son peores conductores que estos últimos pero mejores que los aislantes. Se pueden describir como sólidos cuyas *bandas de energía* (niveles de energía modificados a través de los cuales se mueven los electrones en una red) están divididas en dos por una pequeña brecha denominada *band gap* o *banda prohibida*. La banda de energía inferior, *banda de valencia*, contiene electrones que participan en uniones atómicas, mientras que la superior o *de conducción* contiene electrones involucrados en las corrientes eléctricas. Como en el caso de los aislantes, la banda de valencia de los semiconductores está completa, pero a diferencia de ellos, cuyo band gap tiene alrededor de 5 eV, la banda prohibida de los semiconductores es menor (aproximadamente de 1 eV). Debido a que esta banda es más angosta, es más fácil para los electrones trasladarse de la banda de valencia a la de conducción. Por ejemplo, si aumenta la temperatura, los electrones absorben la energía necesaria para saltar a la banda superior. De esta forma aumenta la cantidad de electrones en la banda de conducción y disminuyen en la de valencia, pareciéndose más a un metal. Que haya menos electrones en la banda de valencia también contribuye a aumentar la conductividad, ya que aumentan los denominados *huecos* que son considerados como portadores de carga positivos.

En el caso del Silicio (Si) toman parte en la conducción tanto electrones (n) como tres tipos de huecos (p). Su conductividad puede expresarse como:

$$\sigma = e \cdot (\mu_n \cdot n + \mu_{ef} \cdot p) \quad (1)$$

donde  $e$  es la carga de un electrón,  $n$  y  $p$  son las densidades de electrones y huecos respectivamente,  $\mu_n$  es la movilidad de los electrones y  $\mu_{ef}$  el promedio pesado de las movilidades de los tres tipos de huecos.

En el caso del Si intrínseco ( $n = p$ ), puede probarse que:

$$n \approx p \propto T^{3/2} \cdot e^{-E_g/2kT} \quad (2)$$

donde  $T$  es la temperatura,  $k$  la constante de Boltzman y  $E_g$  el band gap.

Si además el grado de impurezas e imperfecciones en la red no son muy altos, la movilidad a temperaturas superiores a los 400° K cumple que:

$$\mu_{ef}, \mu_n \propto T^{-3/2} \quad (3)$$

Por lo tanto, si se combinan las ecuaciones (1), (2) y (3), se obtiene:

$$\sigma = K \cdot e^{-E_g/2kT} \quad (4)$$

donde  $K$  varía lentamente con la temperatura en comparación con el factor exponencial que multiplica, siempre y cuando  $E_g \gg kT$ . Por lo que para temperaturas no muy altas, vale considerar a  $K$  como una constante. De la ecuación (4) se puede obtener la siguiente relación:

$$\ln(\sigma) = \ln(K) + \frac{-E_g}{2} \cdot \frac{1}{k \cdot T} \quad (5)$$

El objetivo de este trabajo es el de determinar  $E_g$ , calculando la pendiente de la recta obtenida al graficar  $\ln(\sigma)$  en función de  $1/2kT$ .

## Desarrollo experimental

Durante esta experiencia se utiliza una muestra de Si hiperpuro con impurezas de Boro (aproximadamente un átomo de Boro cada  $10^{13}$  de Si). A altas temperaturas (zona intrínseca) cumple la hipótesis de que las densidades de electrones y huecos sean aproximadamente iguales, por lo tanto, se consideran las mediciones superiores a los 400°K.

Para obtener la conductividad se mide la resistividad  $\rho$ , que es su inversa, mediante la técnica de "cuatro puntas". Para ello se conectan cuatro electrodos de tungsteno (ya que este material mantiene su elasticidad a altas temperaturas) en los bordes de la muestra de Si, inyectando corriente por dos y midiendo la diferencia de potencial entre los otros dos (ver figura 1).

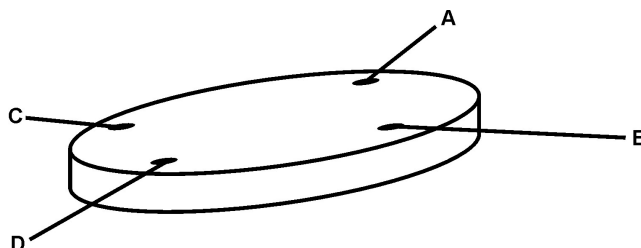


Fig. 1: La muestra con las conexiones en las que alternadamente se va inyectando corriente y midiendo corriente y voltaje, en ambos sentidos.

Se hace esto para dos configuraciones distintas, lo que permite definir las siguientes resistencias:

$$R_{BC,DA} = \frac{V_{AD}}{I_{BC}} \quad R_{AB,CD} = \frac{V_{DC}}{I_{AB}} \quad (6)$$

Puede probarse que se satisface:

$$\exp\left(\frac{-\pi \cdot R_{AB,CD} \cdot d}{\rho}\right) + \exp\left(\frac{-\pi \cdot R_{BC,DA} \cdot d}{\rho}\right) = 1 \quad (7)$$

donde  $d$  representa el espesor de la muestra. La muestra que utilizamos tiene un  $d = (0,0047 \pm 0,0001) \text{ mm}$ .

Se realizan mediciones a diferentes temperaturas de las corrientes y voltajes correspondientes para obtener las resistencias definidas anteriormente. Para ello se coloca la muestra dentro de un horno eléctrico al que se le varía la temperatura. Estas temperaturas se midieron con un error de 1 grado, debido a la dificultad que presenta estabilizar térmicamente a la muestra como para realizar todas las mediciones correspondientes a una temperatura fija (son ocho mediciones para cada temperatura).

Durante todo el proceso se mantiene una diferencia de potencial de aproximadamente 19 V, entre los electrodos correspondientes, para inyectar la corriente.

Para eliminar los potenciales termoeléctricos y de contacto que están incluidos en  $V_{CD}$  y  $V_{DA}$  y que por lo tanto no son el potencial real de la muestra, se pasaron corrientes en ambos sentidos y se realiza el siguiente cálculo:

$$V_{leído}(\pm I) = V_{muestra}(\pm I) + V_{contacto} \quad (8)$$

Con lo que se obtiene el valor “real” del voltaje de la muestra,  $V_{muestra}$ , que responde a la siguiente ecuación:

$$V_{muestra} = \frac{V_{leído}(I) - V_{leído}(-I)}{2} \quad (9)$$

## Resultados

Tomando en cuenta las ecuaciones (8) y (9), a partir de las corrientes y los potenciales medidos, se calculan las resistencias de la ecuación (6). Con ellas y  $d$  se calculan las resistividades a distintas temperaturas resolviendo la ecuación (7) numéricamente con el comando “FindRoot” del programa Mathematica 4 de Wolfram Research. De esta forma se obtienen una serie de valores de conductividades (inversa multiplicativa de la resistividad) para distintas temperaturas. A continuación se presenta un gráfico de  $\ln(\sigma)$  vs  $1/2kT$  (ver figura 3).

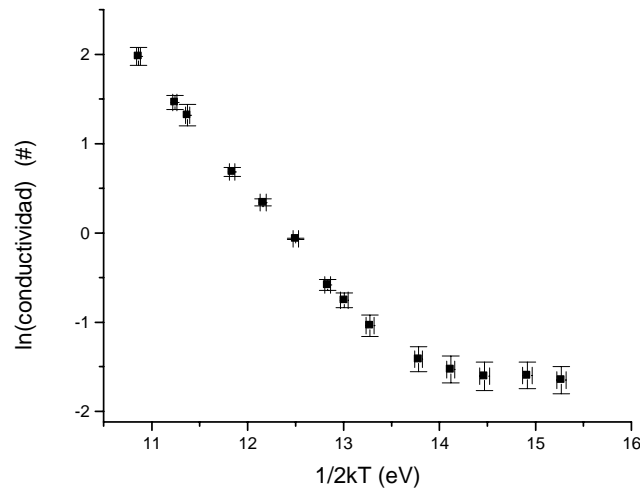


Figura 3: Gráfico de  $\ln(\sigma)$  vs  $1/2kT$ , utilizándose temperaturas desde los 379.5°K hasta los 533.5°K.

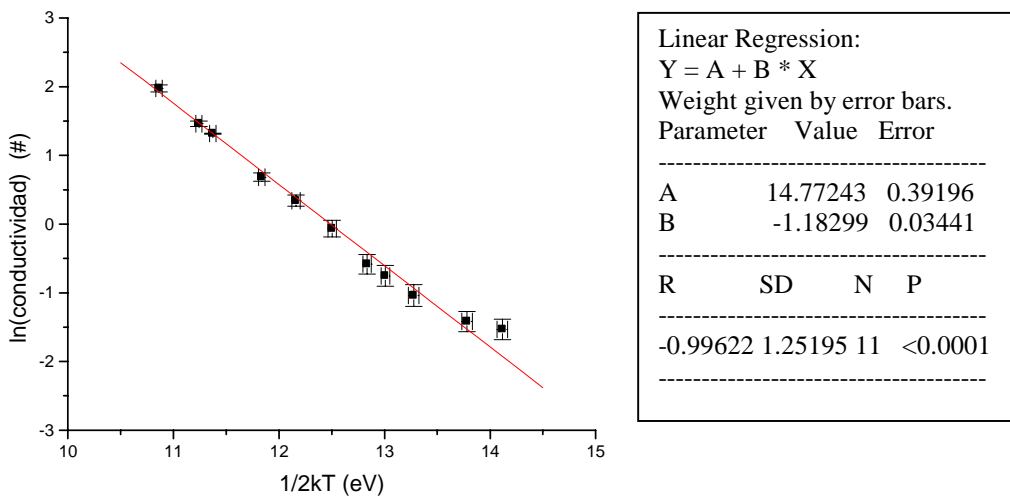


Fig. 3: Gráfico y ajuste de  $\ln(\sigma)$  vs  $1/2kT$  para temperaturas correspondientes a la zona intrínseca.

Los errores en el eje de las abscisas provienen de la propagación del error de la medición de la temperatura. Para obtener los errores del eje de ordenadas, se propagan los errores de voltajes y corrientes de la ecuación (6), obteniéndose valores máximos y mínimos para las resistencias definidas por esta ecuación. Luego se despeja numéricamente la ecuación (7) utilizándose estos valores, de esta forma se obtienen valores máximos y mínimos para las resistividades, que permiten definir la banda de error de esta magnitud. Finalmente se propaga este error para obtener el error del eje de ordenadas. En este gráfico se observa un desvío del comportamiento lineal esperado para los últimos puntos, pero éstos corresponden a temperaturas inferiores a los 400°K, por lo que son desechados por no corresponder a la zona intrínseca. A continuación se

gráfica  $\ln(\sigma)$  vs  $1/2kT$  para temperaturas superiores a los 400°K, y se realiza un ajuste con la ecuación (5), obteniéndose el valor de  $E_g$  mediante la pendiente de la recta ajustada.

$$E_g = (1.18 \pm 0.03) \text{ eV}$$

El error es el presentado por el programa Origin al realizar el ajuste.

## Análisis y conclusiones

El valor obtenido para el band gap del Si es de  $E_g=(1.18 \pm 0.03)\text{eV}$ , que concuerda con el valor tabulado (1.17 eV). El error relativo de la medición es del 2,5% aproximadamente. Este error proviene principalmente de la dificultad de estabilizar térmicamente la muestra el tiempo suficiente como para realizar las ocho mediciones correspondientes a cada temperatura. Cabe destacar que las mediciones realizadas que caen dentro de la zona intrínseca son escasas, lo que también contribuye al error final de la medición del band gap. Se observa la existencia de un límite en los 400°K a partir del cual la conductividad del Si se comporta según la ecuación (4), tal como predice la teoría. Para temperaturas más bajas la conductividad no responde a dicha relación.

La técnica utilizada para la medición es efectiva, pero deben tomarse recaudos para controlar la temperatura de la muestra. Si se deja estabilizar la muestra, luego no hay tiempo para realizar suficientes mediciones, como fue el caso de esta experiencia.

Se propone para futuras experiencias, idear un sistema que permita controlar la temperatura de la muestra de forma más efectiva, o elevar ésta de una forma más gradual.

Existen otros métodos para medir el band gap que pueden resultar efectivos, como por ejemplo el método óptico <sup>(2)</sup>. Con este método lo que se mide es el coeficiente de transmisión a partir del cual se puede obtener la energía del band gap.

## Bibliografía

- (1) Apunte de Laboratorio 5, “Determinación de la banda prohibida (Band Gap) en Si y Ge” – [www.geocities.com/gil\\_1953](http://www.geocities.com/gil_1953)
- (2) Medición del ancho de banda en Si y Ge mediante un método óptico, Martín Bellino, Laboratorio 5, UBA.
- (3) N. W. Ashcroft and N. D. Mermin, “*Solid State Physics*”, Saunders College Publishing, 1976, pag 566
- (4) Medición de la banda prohibida del Silicio, Ana Amador y Fernando Rausch, Laboratorio 5, UBA