

# Actividad VI.64 – Determinación de la banda de energía prohibida de semiconductores

---

## Objetivo

Estudio de semiconductores mediante experimentos de transmisión óptica y transporte eléctrico. Determinación de la naturaleza de la banda prohibida y del valor de la brecha de energía.

## Introducción

Una característica notable de algunos materiales es que tienen una alta resistividad eléctrica y, en contraste con los que se observa en los metales, esta resistividad decrece con la temperatura. Aunque el comportamiento de estos materiales, llamados *semiconductores*, era conocido desde hacía mucho tiempo, no se lo comprendió totalmente hasta el desarrollo de la *teoría de bandas* de un sólido, alrededor de 1930. En el marco de esta teoría, un semiconductor es un sólido cuyos electrones se distribuyen en dos bandas de energía separadas por una brecha (*gap*) de energía prohibida.<sup>[1,2]</sup> La banda inferior corresponde a los estados de los electrones que participan de la unión de los átomos – generalmente covalente- y se le llama *banda de valencia*. En la banda superior se encuentran los electrones que participan de las corrientes eléctricas y es llamada *banda de conducción*. Si un semiconductor puro estuviese a temperatura absoluta nula ( $T = 0$ ) todos los orbitales de su banda de valencia estarían ocupados y todos los de la banda de conducción estarían vacíos. En una situación de este tipo no puede circular corriente eléctrica, por tanto a  $T = 0$  el semiconductor sería un *aislante*.

A temperaturas distintas de cero la conductividad de un semiconductor no es nula debido a la presencia de electrones en la banda de conducción y de agujeros en la banda de valencia. Esto puede lograrse mediante dos mecanismos. Uno de ellos es por la excitación de electrones de la banda de valencia hacia la banda de conducción. Esta excitación existe siempre a  $T \neq 0$  por el movimiento térmico de los portadores de carga, o puede lograrse externamente, por ejemplo, mediante la irradiación con fotones que entreguen la energía suficiente para superar la banda de energía prohibida. En cualquiera de estos procesos se crean pares de portadores de carga: electrones (negativos,  $n$ ) y huecos (positivos,  $p$ ).

Otra manera de lograr conductividad no nula es por la agregado de impurezas en el material. Si por un proceso de dopaje se introduce en un material semiconductor algún tipo de átomo trivalente (usualmente indio o aluminio), los tres electrones de valencia se unen covalentemente con el material y dejan un agujero o hueco en el cuarto enlace. En esta situación hablamos de un semiconductor *tipo p*. Si la impureza es tal que aporta cinco electrones (usualmente se usa arsénico), cuatro de los cuales se unen mientras que el restante electrón queda libre para moverse en la banda de conducción, lo que tenemos es un semiconductor *tipo n*.

En los siguientes proyectos se estudian semiconductores mediante experimentos de transmisión óptica y mediciones de características corriente-voltaje de juntas semiconductoras. El objetivo es analizar la naturaleza de las transiciones electrónicas de un semiconductor y determinar el ancho de la banda de energía prohibida  $E_g$ .

## Proyecto 1.- Absorción óptica de un semiconductor

**Equipamiento recomendado:** Muestras de Si, Ge y GaAs. Un espectro-fotómetro para medir el coeficiente de transmisión óptico de un material.

Una manera de estudiar el comportamiento de un semiconductor consiste en hacerle incidir fotones de energía conocida que exciten electrones desde estados de menor energía hasta estados de mayor energía superando la banda de energía prohibida, de ancho  $E_g$ . Para esto puede usarse un sistema de medición de transmisión óptica con el que se mide el coeficiente de transmisión de una muestra fina semiconductor. <sup>[3]</sup> El dispositivo se conoce con el nombre de espectro-fotómetro y por lo general está disponible en muchos laboratorios de química universitarios.

El principio de la medición consiste en incidir radiación monocromática sobre la muestra semiconductor. Para esto, el espectro-fotómetro contiene un monocromador para filtrar luz de longitud de onda bien definidas. Cuando la energía de los fotones incidentes

sea tal que favorece la excitación de electrones, se observa un cambio en la respuesta de la transmisión de radiación en función de la longitud de onda.

Las muestras semiconductoras (por ejemplo: Si, Ge, GaAs) deben ser finas para aumentar la sensibilidad de las mediciones. Para esto las muestras deben prepararse cortándolas de un bloque con una sierra de diamante y afinándolas hasta que tengan un espesor no mayor de 0.5 mm. Esto último puede conseguirse puliendo la muestra con abrasivos y realizando una terminación superficial más fina.

Si incide luz monocromática de longitud de onda  $\lambda$  e intensidad  $I_0$  sobre una muestra de espesor  $x$ , emerge una intensidad transmitida  $I$ . Se define el coeficiente de transmisión  $T = I / I_0$ , relacionado con el coeficiente de absorción óptica  $\alpha$  por:<sup>[3]</sup>

$$T = \frac{(1 - R)^2 \exp(-\alpha x)}{1 - R^2 \exp(-2\alpha x)} \quad (64.1)$$

donde  $R$  es el coeficiente de reflexión óptico en la interfase aire-semiconductor.

El mecanismo predominante de la absorción proviene de las transiciones electrónicas desde la banda de valencia a la banda de conducción cruzando la banda de energía prohibida de ancho  $E_g$ . Si el semiconductor es de *gap* directo, es decir, si un fotón incidente solo crea un par electrón-hueco, el coeficiente de absorción está dado por:<sup>[3,4]</sup>

$$\alpha = A(E - E_g)^{1/2} \quad (64.2)$$

donde  $A$  es una constante dependiente del material y  $E$  es la energía del fotón incidente y la relación vale en la aproximación de bandas parabólicas, es decir, si la energía de la banda puede expresarse como  $E(p) \propto p^2$ , donde  $p$  es el momento. En cambio, si hay un apartamiento de este comportamiento –lo que puede ocurrir si hay impurezas o por efecto de la temperatura– el coeficiente se expresa como:

$$\alpha = B \exp(E / E_0) \quad (64.3)$$

donde  $B$  es una constante y  $E_0$  mide el apartamiento de la forma parabólica. Por otro lado, si el semiconductor es de *gap* indirecto, para que se realice la transmisión electrónica debe involucrarse un fonón de energía  $E_p$  para conservar el momento, ya sea absorbiéndolo o emitiéndolo. En este caso el coeficiente se expresa como:

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_e \quad (64.4)$$

donde  $\alpha_a$  describe la absorción con absorción de un fonón y  $\alpha_e$  la absorción con emisión de un fonón:

$$\alpha_a = C(E - E_g + E_p)^2, \quad E > E_g - E_p \quad (64.5.a)$$

$$\alpha_e = D(E - E_g - E_p)^2, \quad E > E_g + E_p \quad (64.5.b)$$

$C$  y  $D$  son constantes que dependen del material y la temperatura.

Por lo tanto, si se mide el coeficiente de transmisión  $T$  en función de la energía del fotón incidente y de la Ec. (64.1) se obtiene el coeficiente  $\alpha$ , a partir de la dependencia de este coeficiente con la energía puede deducirse la naturaleza de la banda de energía prohibida, es decir, si el *gap* es directo o indirecto, obtenerse el valor de  $E_g$  y estudiar, según el caso, la energía del fonón involucrado en la transición óptica.

- Prepare la muestra semiconductor, tratando de afinarla hasta obtener un espesor no mayor que medio milímetro.
- Usando el espectro-fotómetro obtenga la curva de transmisión  $T$  en función de la longitud de onda de la radiación incidente  $\lambda$ . Para esto, elija adecuadamente el rango de variación de la longitud de onda de la radiación incidente y el paso de la variación, de manera de obtener un número razonable de puntos. ¿Qué puede decir de la absorción óptica de la muestra usada para las distintas longitudes de onda de la radiación incidente?

Realice una determinación preliminar del valor de  $E_g$  observando dónde hay un cambio considerable de la transmisión óptica.

- Usando los valores  $T(E)$  y el espesor de la muestra  $x$  obtenga el coeficiente de absorción  $\alpha(E)$ . De la Ec. (64.1) puede deducirse que:<sup>[3]</sup>

$$\alpha = -\frac{1}{x} \cdot \ln \left\{ \frac{\sqrt{(1-R)^4 + 4T^2R^2} - (1-R)^2}{2TR^2} \right\} \quad (64.6)$$

Suponga que el coeficiente de reflexión  $R$  es independiente de la energía y obtenga su valor de la curva  $T(E)$  en la región donde la muestra se comporta como un medio transparente a la radiación incidente, es decir, cuando  $\alpha = 0$ . En este caso, la Ec. (64.1) se reduce a  $T = (1 - R) / (1 + R)$ , de donde puede evaluar  $R$ .

- ✓ Represente gráficamente el coeficiente de absorción  $\alpha$  en función de la energía  $E$  en escala lineal y semilogarítmica en el eje vertical.
  - ✓ Analice estos datos usando las Ecs. (64.2) a (64.5) y discuta la naturaleza de la banda prohibida del semiconductor que estudia y si es de *gap* directo o indirecto.<sup>[3]</sup> Para este análisis represente también  $\alpha^{1/2}$  en función de  $E$  y analice la dependencia observada en los distintos rangos de energía.<sup>[3]</sup>
  - ✓ Obtenga de los gráficos el valor de  $E_g$  del semiconductor en estudio con su incertidumbre.
- Si el semiconductor que estudió es de *gap* indirecto, obtenga también la energía del fonón involucrado en la transición óptica  $E_p$ . Consulte tablas de datos del semiconductor en estudio y compare sus determinaciones con los valores aceptados para estas magnitudes.

## Proyecto 2.- Determinación de $E_g$ del Si y del Ge por medio de mediciones eléctricas

**Equipamiento recomendado:** Diodos de Si (1N4001 o equivalente) y de Ge (1N34A o equivalente). Fuente de corriente hasta 100 mA y un voltímetro o un sistema de adquisición de datos por computadora. Un termómetro que mida desde temperatura de nitrógeno líquido hasta ambiente.

Se tiene una *juntura* o *unión* cuando el dopaje de un semiconductor tiene una dependencia espacial. Una *juntura p-n* tiene una variación abrupta de dopaje en una dirección, con una parte dopada con material *p* y la otra con material *n*.<sup>[1]</sup>

La característica corriente-voltaje de una *juntura* está dada por:

$$I = I_0 \cdot \left[ \exp\left(\frac{eV}{\eta kT}\right) - 1 \right] \quad (64.7)$$

donde  $e$  es la carga del electrón ( $e = 1.6 \times 10^{-19}$  C),  $V$  es el voltaje en Volt,  $\eta$  es un “factor de idealidad” cuyo valor varía dependiendo de la *juntura*,  $k$  es la constante de Boltzmann ( $k = 8.617 \times 10^{-5}$  eV.K<sup>-1</sup>), y  $T$  es la temperatura en Kelvin. El factor de idealidad tiene en cuenta otros fenómenos físicos presentes, como efectos de superficie, recombinación, efecto túnel, etc. El factor  $I_0$  se denomina corriente inversa de saturación del sistema *p-n*, y depende de la temperatura según:

$$I_0 = BT^3 \cdot e^{-\frac{E_g(T)}{\eta kT}} \quad (64.8)$$

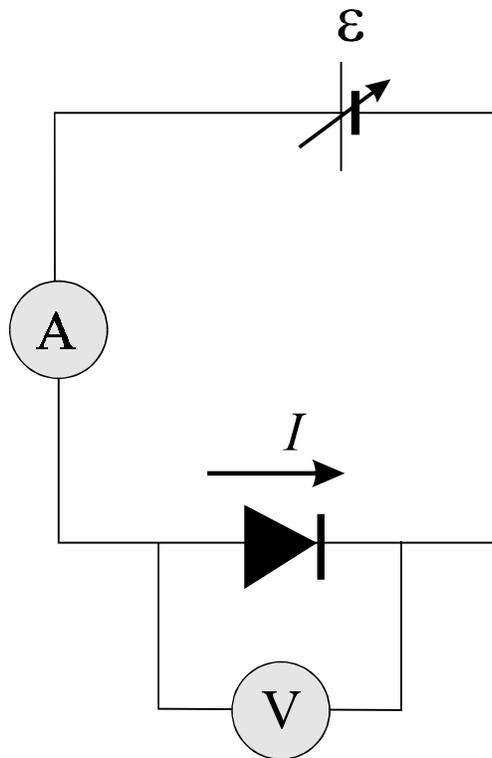
donde  $E_g(T)$  es el valor del *gap* de energía dependiente de la temperatura y  $B$  es una constante que depende de las densidades de portadores  $n$  y  $p$ , y de sus caminos libre medio. En el caso en que  $eV \gg kT$ , la Ec.(64.7) puede aproximarse por:

$$I = I_0 \cdot e^{\frac{eV}{\eta kT}} \quad (64.9)$$

El objetivo de este proyecto es determinar el valor del *gap* de energía de algunos semiconductores por medio de experimentos de transporte eléctrico en una juntura *p-n*, midiendo para esto las características *I-V* a distintas temperaturas. De las Ecs. (64.7) y (64.8) puede verse que si se miden curvas *I-V* a diferentes temperaturas puede determinarse el valor de  $E_g$ .

Los diodos constituyen las junturas semiconductoras más comunes y se fabrican uniendo un semiconductor tipo *p* con uno tipo *n*. Los diodos de Silicio (1N4001 o equivalente) y de Germanio (1N34A o equivalente) son adecuados para estos experimentos.<sup>[4-7]</sup>

El circuito para determinar la característica *I-V* de un diodo se muestra esquemáticamente en la Fig. 64.1.



**Figura 64.1** Circuito para obtener curvas *I-V* de un diodo.

El diodo tiene que estar ubicado en un portamuestras al que se pueda variar la temperatura entre, por ejemplo, la temperatura de nitrógeno líquido y la temperatura ambiente. Para esto puede usarse el método descrito en la Actividad VI.62, colocando el portamuestras en el extremo de un caño de acero inoxidable que se introduzca en un termo con nitrógeno líquido. El portamuestras tiene que tener un termómetro para medir la temperatura. Puede usarse un RDT calibrado (Pt-100 u otro) o una termocupla, que midan en el rango entre 77 K (nitrógeno líquido) y temperatura ambiente.

- Obtenga características  $I$ - $V$  de los diodos a distintas temperaturas. Para ello puede variar la corriente aplicada  $I$  (entre 0 y 100 mA) y medir el voltaje  $V$ , o bien variar el voltaje y medir la corriente resultante, tratando, en cualquier caso, de cubrir el mayor margen de valores posibles de estas magnitudes.
- ✓ Represente gráficamente  $I$  en función de  $V$  para cada temperatura. Represente también  $\ln(I)$  en función de  $V$ . Note que, si valen las condiciones que llevan a la Ec. (64.9), esta última representación se linealiza según:

$$\ln(I) = \ln(I_0) + \frac{eV}{\eta kT} \quad (64.10)$$

Analice sus gráficos y determine el intervalo de temperatura donde puede usar la aproximación dada por la Ec. (64.9) para describir sus datos experimentales. Represente gráficamente  $\ln(I)$  en función de  $e/kT$  y a partir de este gráfico determine el mejor valor del arámetro  $\eta$ .

- ✓ Obtenga también  $\ln(I_0)$  en función de la temperatura. De la Ec. (64.8) puede verse que

$$\ln(I_0) = \ln(B) + 3\ln(T) - \frac{E_g(T)}{\eta kT} \quad (64.11)$$

Represente  $\ln(I_0)$  en función de la inversa de la temperatura o en función de  $(\eta kT)^{-1}$ . A bajas temperaturas la dependencia en temperatura de  $E_g$  puede representarse como:<sup>[1]</sup>

$$E_g(T) = E_g(0) - \alpha T \quad (64.12)$$

donde  $E_g(0)$  es el valor del gap a  $T = 0$ , y  $\alpha$  es una constante positiva. Obtenga el valor de  $E_g(0)$  y compare el valor que obtiene para el Si y el Ge con los valores aceptados a  $T = 0$ :<sup>[1]</sup>

$$E_g(\text{Si}) = 1.17 \text{ eV} \quad E_g(\text{Ge}) = 0.75 \text{ eV}$$

Analice el apartamiento de la linealidad del gráfico de  $\ln(I_0)$  en función de  $T^{-1}$  (o en función de  $1/\eta kT$ ) por efecto del término  $\ln(T)$ .

## Bibliografía

1. N. W. Ashcroft y N. D. Mermin, *Solid State Physics* (Saunders College Publishing, 1976).
2. C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics* (John Wiley & Sons, Inc., ).
3. J. M. Essick, R. T. Mather and S. Cornbleet, "Characterization of a bulk semiconductor's band gap via a near-absorption edge optical transmission experiment," *Am. J. Phys.* **61**, 650 (1993).
4. I. Mártil and G. González Díaz, "Undergraduate laboratory experiment: Measurement of the complex refractive index and the band gap of thin film semiconductor," *Am. J. Phys.* **60**, 83 (1992).

5. A. Sconza, G. Torzo and G. Viola, "Experiment on a pn junction," *Am. J. Phys.* **62**, 66 (1994).
6. L. Kirchup and F. Placido, "Undergraduate experiment: Determination of the band gap in germanium and silicon," *Am. J. Phys.* **54**, 918 (1986).
7. C. Fisher, "Elementary technique to measure the energy band gap and diffusion potential of pn junctions," *Am. J. Phys.* **50**, 1103 (1982).
8. P. Collings, "Simple measurement of the band gap in silicon and germanium," *Am. J. Phys.* **48**, 197 (1980).