

La brecha de energía de un semiconductor

L. A. Soto Ruiz

Laboratorio de Física II, ESFM-IPN, CDMX, México

Enviada 10 Septiembre 2024

En esta practica analizamos el comportamiento de un semiconductor a temperatura ambiente viendo como se comporta al aumentar el voltaje que fluye a través de el; y con variaciones de temperatura por medio de un baño Maria en aceite, manteniendo constante la corriente y tomando mediciones de voltaje cada tres grados celsius, así pudimos calcular las magnitudes I_0 , η , E_g y $\frac{dV}{dT}$ para poder determinar que el semiconductor con el que se trabajo en esta practica fue de germanio, esto comparando los resultados obtenidos en la practica y los resultados propuestos de diferentes materiales [1] [2].

Keywords: *Semiconductores, Temperatura, Germanio*

1 Introducción

Un semiconductor es es un solido cristalino en el cual las bandas de conducción están cerca de las bandas de valencia, pero no es así a bajas temperaturas; los semiconductores no son como el resto de metales, en estos los electrones y los huecos son responsables de las propiedades de semiconductor [3]; asi pues este puede estar conformado por dos metales uno denominado n y otro denominado p que en conjunto cumplan con estas características.

ser el germanio, los niveles atómicos 2s y 2p se amplían a bandas de energía así cuando el espacio interatómico disminuye las bandas son cada vez mas anchas y se superponen lo cual hace que se pierda el carácter s y p de los estados electrónicos, provocando que se cree una pequeña dependencia con la temperatura, al suceder esto un electrón queda libre y un hueco se crea en una capa de valencia, ambos migratorios sin embargo estos se moverán en función de un campo eléctrico. [4]

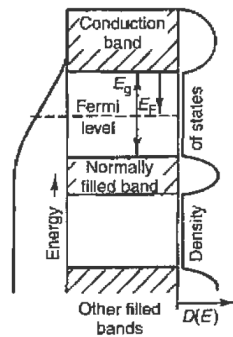


FIGURE 1. Muestra de un semiconductor y sus bandas de conducción [2]

El mecanismo de conducción por electrones como se puede ver en la figura 1 sucede cuando N átomos se combinan en un cristal como lo puede

Existen dos tipos de semiconductores, los semiconductores intrínsecos y los semiconductores extrínsecos, la diferencia entre ellos radica en el hecho de que los primeros son un solo material el cual es capaz de crear huecos y donar electrones, sin embargo los segundos tienen la ayuda de impurezas las cuales ayudan ya sea a donar electrones o a crear huecos para mejorar su funcionamiento como semiconductor [3]

En este caso partiremos de la ecuación de Shockley el cual nos dice que si hay un gradiente de potencial fuera del metal la energía del electrón esta dada por la curva A+B y el trabajo de la función se reduce a $\Delta\phi$ [5]

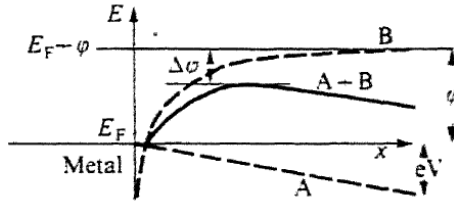


FIGURE 2. Figura 7.8 [5] Muestra el efecto Shockley

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

Donde podemos observar I como el flujo de carga, I_0 como la corriente inversa de saturación, V el voltaje a través de la unión, T la temperatura, k la constante de Boltzmann y η una constante tal que $1 < \eta < 2$. Así pues para voltajes a favor de se puede escribir la función anterior como sigue (Ver apéndice I).

$$\ln(I) = \ln(I_0) + \frac{qV}{\eta kT} \quad (2)$$

Dada la ecuación anterior podemos demostrar lo siguiente [6][Ver apéndice I]

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

Donde gracias al anterior diagrama podemos observar que E_g se trata del ancho de la brecha de energía podemos definir una variación de este en función de la temperatura

$$\alpha = \frac{dE_g}{dT} \quad (4)$$

Sustituyendo las ecuaciones (2) y (3) obtenemos

$$V = \frac{E_g}{q} + \frac{\eta kT}{q} \ln\left(\frac{I}{B}\right) - \frac{3\eta kT}{q} \ln T \quad (5)$$

y por ultimo al derivar la ultima ecuación obtenemos así

$$q \frac{dV}{dT} = \frac{V}{T} - \left(\frac{E_g}{T} - \alpha + 3\eta k \right) \quad (6)$$

2 Desarrollo

En esta practica utilizamos los siguientes materiales:

- Diodo 1n4001
- Cable
- Resistencia 100ohm

y el siguiente equipo de laboratorio

- Cautin
- Soldadura
- Pasta para soldar
- Voltímetro
- Amperímetro
- Cables caimán
- Fuente de alimentación
- Aceite de motor
- Tubo de ensayo
- Calentador
- Vaso de precipitado
- Soportes

Antes de comenzar con el montaje de la practica procedemos a soldar las conexiones de los cables y los componentes, así después facilita el montaje del circuito.

Primero montamos el primer circuito para medir como se comporta el semiconductor variando la corriente a temperatura ambiente, conectamos la resistencia de 100 ohm en serie con el diodo 1n4001 como se muestra en el siguiente diagrama.

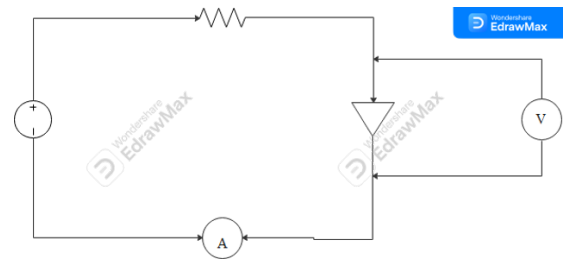


FIGURE 3. Diagrama sin variación de temperatura

Después procedemos a modificar el montaje del experimento para poder alterar la temperatura del semiconductor de manera segura sumergiéndolo en aceite dentro del tubo de ensayo y a su vez este en baño maria en agua calentando con una parrilla como se muestra en el siguiente diagrama:

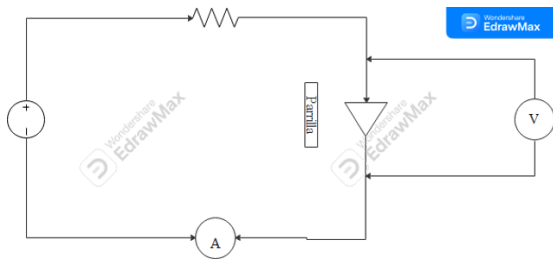


FIGURE 4. Diagrama con variación de temperatura

Voltaje (V)	Corriente (mA)
0.25	0.0014
0.281	0.0016
0.313	0.0024
0.341	0.0039
0.371	0.0071
0.43	0.0283
0.46	0.0559
0.497	0.1307
0.525	0.2346
0.552	0.414
0.583	0.778
0.61	1.35
0.644	2.76
0.673	5.1
0.699	8.93

TABLE I. Mediciones V-I

Así pues esta vez buscamos mantener la corriente constante ajustándola a medida que la temperatura aumenta y tomando nota del voltaje a diferentes temperaturas.

3 Resultados

En las primeras mediciones obtuvimos los siguientes valores para el semiconductor a temperatura ambiente

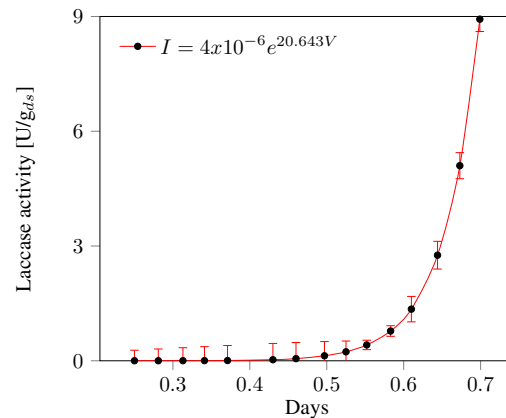


FIGURE 5. Grafica Voltaje-Corriente de un diodo a temperatura ambiente

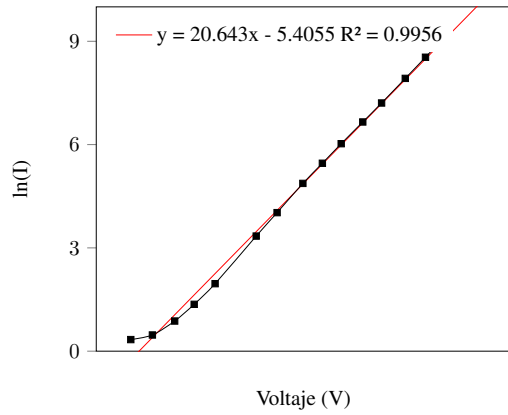


FIGURE 6. Grafica Voltaje - $\ln(I)$ de un diodo a temperatura ambiente

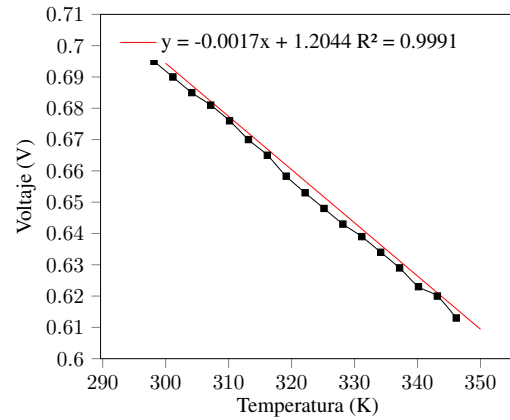


FIGURE 7. Gráfica Voltaje-Temperatura en grados Kelvin de un diodo variando su temperatura

Después, al mantener la corriente estable en 8.66 mA se obtiene la siguiente tabla aumentando la temperatura

Temperatura (K)	Voltaje (v)
295.15	0.7
298.15	0.695
301.15	0.69
304.15	0.685
307.15	0.681
310.15	0.676
313.15	0.67
316.15	0.665
319.15	0.6583
322.15	0.653
325.15	0.648
328.15	0.643
331.15	0.639
334.15	0.634
337.15	0.629
340.15	0.623
343.15	0.62
346.15	0.613

TABLE II. Mediciones de voltaje alterando la temperatura medida en kelvin

4 Análisis de resultados

Dados los gráficos anteriores obtuvimos las funciones que describen la corriente en función del voltaje como sigue

$$I = 4 \times 10^{-6} e^{20.643V} \quad (7)$$

Así pues podemos mostrar que

$$\frac{q}{\eta k T} = 20.643 \quad (8)$$

Ahora bien para obtener I_0 procedemos a tomar

$$\ln I = \ln I_0 + \frac{q}{\eta k T} V \quad (9)$$

sustituyendo tenemos

$$\ln I = \ln I_0 + 20.643V \quad (10)$$

y de la grafica tenemos tambien

$$\ln(I) = 20.643x - 5.4055 \quad (11)$$

Igualando obtenemos

$$\ln I_0 = -5.4055 \quad (12)$$

obteniendo así

$$I_0 = 4.5165 \times 10^{-3} \quad (13)$$

Ahora verifiquemos η tomando el valor ya conocido

$$\frac{q}{\eta k T} = 20.643 \quad (14)$$

Así despejando y teniendo en cuenta la constante de Boltzman y la temperatura ambiente la cual para el experimento era de 22 deg C, que son 295.15K, por ultimo tomando q como 1eV obtenemos

$$\eta = \frac{1 \text{ eV}}{(20.643)(8.62 \times 10^{-5})(295.15)} = 1.90 \quad (15)$$

Así pues esta dentro del rango aceptable de $0 < \eta < 2$, esto termina la primera parte en la que la temperatura es la ambiente, a continuación tomaremos los cálculos con una variación de temperatura.

Del gráfico en el que se expresa la variación de temperatura podemos extrapolar la gráfica

$$V = -0.0017 * T + 1.2044 \quad (16)$$

Comparando con la ecuación

$$V = \frac{E_g}{q} + \frac{\eta k T}{q} \ln \left(\frac{I}{B} \right) - \frac{3 \eta k T}{q} \ln T \quad (17)$$

vemos que los términos independientes de T son

$$\frac{E_g}{q} = 1.2044 \quad (18)$$

Despejando tenemos

$$E_g = 1.2044 \text{ eV} \quad (19)$$

Ahora para calcular B obtenemos de la siguiente ecuación

$$I_0 = B T^3 e^{\left(\frac{-E_g}{\eta k T} \right)} \quad (20)$$

Despejando tenemos

$$B = \frac{I_0}{T^3 e^{\left(\frac{-E_g}{\eta k T} \right)}} \quad (21)$$

Con los valores antes obtenido tenemos

$$B = 6.7394 A \quad (22)$$

Finalmente la derivada de v la denominamos con la función de la gráfica como

$$\frac{dV}{dT} = -1.7 \frac{mV}{K} \quad (23)$$

Evalutando con la función

$$-1.7 = \frac{V}{T} - \left(\frac{E_g}{T} - \alpha + 3 \eta k \right) \quad (24)$$

despejando α obtenemos

$$\alpha = 1.7 + 3 \eta k - \frac{V}{T} + \frac{E_g}{T} \quad (25)$$

así sustituyendo

$$\alpha = 3.859e - 3 = 3.8 \frac{mV}{K} \quad (26)$$

5 Conclusión

Así pues retomando los resultados anteriores podemos observar los valores finales

- $I_0 = 4.5165e-3 A$
- $\eta = 1.90$
- $E_g = 1.2044 \text{ eV}$
- $dV/dT = -1.7$

los cuales concuerdan con los valores propuestos para el germanio [1] tales que

- $I_0 = 3.4e-5 A$
- $\eta = 1.76$
- $E_g = 0.67 \text{ eV}$
- $dV/dT = -1.87$

La variación en los datos de I_0 y de E_g aunque mayores, pueden deberse a los errores al tomar las mediciones de las corrientes, esto dado que al hacer pequeñas modificaciones en el voltaje de la fuente la corriente aumenta exponencialmente como lo vimos en la primera gráfica y al tomar un pequeño error en las mediciones este se traduce en una variación marcada con los datos propuestos, sin embargo estos datos aun con estos errores son capaces de mostrar una correlación con los valores del germanio.

6 Referencias

1. A. G. Thompson, M. Cardona, K. L. Shaklee, and J. C. Woolley, "Electroreflectance in the GaAs-GaP Alloys," *Phys. Rev.*, vol. 146, pp. 601–610, June 1966.
 2. C. Kittel, *Introduction to solid state physics*. Nashville, TN: John Wiley & Sons, 4 ed., July 1971.
 3. A. C. Melissinos and J. Napolitano, *Experiments in Modern Physics*. Fifth Avenue, New York: Academic Press, 1 ed., 1966.
 4. J. P. McKelvey, *Física del Estado Solido y de Semiconductores*. Limusa, 1996.
 5. H. M. Rosenberg, *The Solid State*. Oxford Physics Series, London, England: Oxford University Press, 3 ed., Mar. 1988.
 6. P. M. Chirlian, *Analysis and design of integrated electronic circuits: Semiconductor devices v. 1*. Thousand Oaks, CA: SAGE Publications, July 1982.
-

7 Apéndice I

Tomando la ecuación

$$I = I_0 (e^{(qV/\eta\kappa T)} - 1) \quad (27)$$

Aplicamos logaritmo en ambos lados obteniendo

$$\ln I = \ln I_0 (e^{(qV/\eta\kappa T)} - 1) \quad (28)$$

$$\ln I = \ln I_0 + \ln(e^{(qV/\eta\kappa T)} - 1) \quad (29)$$

Como $V \gg \eta \kappa T/q$ entonces $Vq/\eta \kappa T \gg 1$

$$\ln I = \ln I_0 + \ln \left(e^{\left(\frac{qV}{\eta\kappa T} \right)} \right) \quad (30)$$

$$\ln I = \ln I_0 + \frac{qV}{\eta\kappa T} \quad (31)$$

Para demostrar

$$I_0 = BT^3 \exp(-Eg/\eta\kappa T) \quad (32)$$

Tomemos [6]

$$I_0 \approx \frac{QDp}{L} \approx q \sqrt{\frac{D}{\tau}} \frac{n^2}{N} \approx \left[T^3 \exp\left(-\frac{Eg}{kT}\right) \right] T^{\gamma/2} \quad (33)$$

(42)

Lo cual para cuando $I_0 \approx I$ la corriente aumenta como $T^3 \exp(-\frac{Eg}{kT})$.
Dada la definición

$$\alpha = \frac{dE_g}{dT} \quad (34)$$

Y sustituyendo (3) en (2) obtenemos

$$\ln I = \ln I_0 + \frac{qV}{\eta\kappa T} \quad (35)$$

$$\ln I = \ln BT^3 \exp(-Eg/\eta\kappa T) + \frac{qV}{\eta\kappa T} \quad (36)$$

$$\ln I = \ln BT^3 + \ln \exp(-Eg/\eta\kappa T) + \frac{qV}{\eta\kappa T} \quad (37)$$

$$\ln I = \ln BT^3 - Eg/\eta\kappa T + \frac{qV}{\eta\kappa T} \quad (38)$$

$$\frac{qV}{\eta\kappa T} = \ln I + \frac{Eg}{\eta\kappa T} - \ln B - \ln T^3 \quad (39)$$

$$\frac{qV}{\eta\kappa T} = \ln(I/B) + \frac{Eg}{\eta\kappa T} - 3\ln T \quad (40)$$

$$qV = \eta\kappa T \ln(I/B) + Eg - \eta\kappa T 3\ln T \quad (41)$$

$$V = \frac{\eta\kappa T \ln(I/B)}{q} + \frac{Eg}{q} - \frac{\eta\kappa T 3\ln T}{q}$$