



Práctica 1

La Brecha de Energía en semiconductores

Carlos Esteves Flores
carlos.stvs@ciencias.unam.mx

Maricruz Rosas Velázquez
maricruzrv@ciencias.unam.mx

Facultad de Ciencias
Universidad Nacional Autónoma de México

Fecha de entrega: 6 de marzo de 2023

Resumen

En este trabajo, se determinó experimentalmente la brecha de energía y el coeficiente de temperatura α para dos diodos semiconductores de silicio y germanio. Se utilizaron dos configuraciones de circuito: en la primera, se registró la corriente en función del voltaje suministrado por una fuente conectada en serie con el diodo; en la segunda, se utilizó arreglo idéntico, donde se registró el voltaje en el diodo suministrando una corriente constante con la fuente — de 0.15 mA para el diodo de silicio modelo 1N4003, y de 470 mA para el diodo de germanio ITT modelo EM120 — con el diodo sumergido en aceite, aumentando su temperatura de manera controlada. Se realizó un ajuste lineal, con el software *OriginLab*. Se comparó el ajuste con las ecuaciones de Shockley, se calculó la corriente de saturación I_0 y el coeficiente de emisión η , necesarios para el cálculo de la brecha de energía E_g y el coeficiente de temperatura de la brecha α . Se obtuvo como resultado para el diodo de silicio: $E_g = (1.000 \pm 0.004) \text{ eV}$, $\alpha = (0.00356 \pm 0.00002) \text{ eV/K}$ con un error del 8.2 % con respecto al valor teórico; y para el germanio: $E_g = (0.7202 \pm 0.004) \text{ eV}$, $\alpha = (0.00174 \pm 0.00001) \text{ eV/K}$ con un error menor al 1 % respecto al valor teórico.

Palabras clave: semiconductor, diodo, brecha de energía, temperatura, voltaje, corriente de saturación.

1. Introducción

Los semiconductores tienen una relevancia importante en la vida cotidiana, ya que estos forman parte del día a día, pues son un componente básico en los millones de dispositivos electrónicos que se utilizan en la educación, salud, comunicaciones, transporte, energía, investigación y otros sectores. Las computadoras, los teléfonos inteligentes, los automóviles, etcétera; son sólo algunos ejemplos de las aplicaciones de estos materiales por medio de transistores, circuitos integrados, o bien, diodos —los cuales serán de ayuda para el objetivo de este experimento. Uno de los pioneros en estudiar los semiconductores (y de cuya teoría nos apoyaremos para analizar los resultados), fue William Bradford Shockley. Fue un físico estadounidense quien, después de la Segunda Guerra Mundial, centró su trabajo en buscar una alternativa a los tubos de vacío, que eran el estándar para los

dispositivos electrónicos en aquella época. Por ello, después de desarrollar su trabajo sobre estos materiales, fue que se logró la invención del transistor semiconductor, con lo que fue premiado con el Nobel de Física en 1956.

1.1. Semiconductores

Estos se definen, en términos simples, como *materiales que —dependiendo de su temperatura, presión, radiación y campos magnéticos— pueden actuar como conductores, permitiendo el paso de la corriente, o como aislantes, impidiendo el paso de la misma*. [2] Son materiales cuya conductividad está en el rango de $10^{-3} - 10^3 \text{ S/m}$, y varía con la temperatura. Los semiconductores más utilizados son los que están fabricados de silicio (Si) y germanio (Ge), ya que la última capa de estos átomos tiene cuatro electrones, los cuales se unen a otros átomos mediante enlaces covalentes. A temperaturas bajas, los electrones con-

tinúan formando estos enlaces y, aunque se aplique un campo eléctrico externo, no pueden moverse, por lo cual actúan como un aislante. A temperaturas más altas, algunos de estos electrones poseen energía suficiente como trasladarse a niveles energéticos superiores en los cuales no están ligados, y por ende, permiten que el material pueda actuar como conductor.

Centraremos nuestra atención en los semiconductores dopados, que son semiconductores puros a los que se les añadieron impurezas para conducir de mejor forma la electricidad. Existen dos tipos de semiconductores dopados:

- **Tipo N:** estos se obtienen añadiendo algunos átomos pentavalentes (cinco electrones en su última capa) a un semiconductor puro. De los cinco electrones, cuatro están en enlaces covalentes y uno de ellos está libre. Un semiconductor de este tipo contiene un número mayoritario de electrones portadores de carga y tiene huecos que son portadores minoritarios.

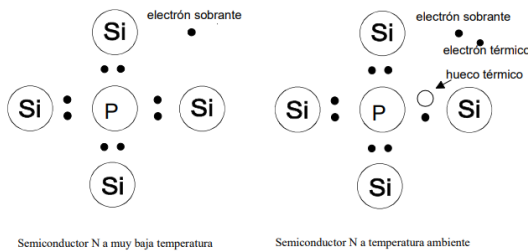


Figura 1. Enlaces en un semiconductor de tipo N. Recuperada de [4].

- **Tipo P:** estos se obtiene añadiendo algunos átomos trivalentes (tres electrones en su última capa). En este caso, los electrones del átomo añadido están covalentemente enlazados con tres de los cuatro átomos del semiconductor puro, por lo que el sobrante queda libre; entonces, dado que en este caso faltan electrones para poder formar enlaces covalentes, se tiene un mayor número de huecos que de electrones portadores de carga.

1.2. Diodos

A la unión de dos semiconductores N y P se le denomina *diodo*. Esta unión hace que los electrones libres del semiconductor N salten a los huecos del semiconductor tipo P. Por cada electrón que pasa de N a P, aparece una carga negativa en N y una positiva en P, y en consecuencia, estas cargas producen un campo eléctrico que va de N a P.

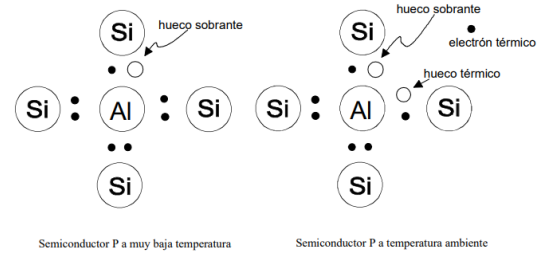


Figura 2. Enlaces en un semiconductor de tipo P. Recuperada de [4].

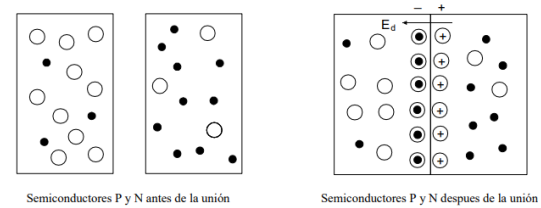


Figura 3. Representación de la unión de semiconductores P y N. Recuperada de [4].

Al conectar una fuente de corriente directa a un diodo, se dice que se está *polarizando*. Esta polarización puede ser directa o inversa, y según sea el caso, el diodo seguirá cierto comportamiento.

La *polarización directa* sucede cuando la fuente se conecta en el polo positivo a la zona P y el polo negativo a la zona N. Esto genera un campo eléctrico que va de P a N, que tendrá mayor magnitud al campo generado por la unión, que irá en dirección contraria, por lo cual, el paso de la corriente será permitido; con ello, se dice que en directa, el diodo conduce, o dicho de otra manera, actúa como un conductor.

La *polarización inversa* sucede cuando la fuente se conecta en el polo positivo a la zona N y el polo negativo a la zona P, por lo que el campo eléctrico generado por la fuente va en la misma dirección que el generado por la unión de semiconductores, y eso provocará que los electrones no puedan pasar fácilmente a la zona. En consecuencia, el paso de la corriente será prohibido; con ello, se dice que en inversa, el diodo no conduce, o mejor dicho, actúa como un aislante. (ver Figura 4)

1.3. Brecha de energía

Se le denomina *brecha de energía* a la diferencia de energía entre la parte superior de la banda de valen-

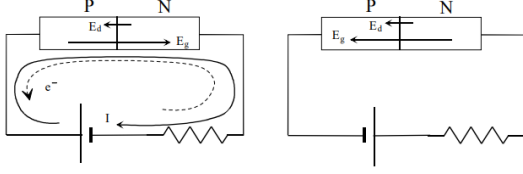


Figura 4. Izq: polarización directa.
Der: polarización inversa. Recuperada de [4].

cia y la parte inferior de la banda de conducción [3]. Para cada material, este valor es distinto. En el caso de los metales, el valor de esta brecha es negativo, ya que la banda de valencia y la banda de conducción están sobrepuestas. Para semiconductores, las bandas tienen una separación que se traduce en valores positivos de energía. Para aislantes, la brecha de energía es demasiado grande, por lo que es muy difícil lograr que un electrón vaya de la banda de valencia a la banda de conducción en estos materiales. Para nuestros fines, mencionamos la brecha de energía para el Silicio (Si) que tiene un valor de $E_g = 1.09 \text{ eV}$, y para el Germanio (Ge) es $E_g = 0.72 \text{ eV}$.

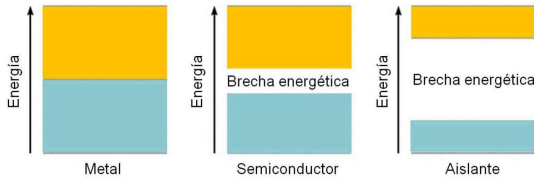


Figura 5. Estructura de bandas de energía. Recuperada de [1].

1.4. Ecuación de Shockley

Con la información antes dada, consideremos el comportamiento de una unión PN, la cual está descrita por la ecuación de Shockley:

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{\eta\kappa T} - 1\right) \quad (1)$$

donde I_0 es la corriente inversa de saturación [A], V es el voltaje aplicado [V], q es la carga del electrón ($1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$), T es la temperatura absoluta [K], κ es la constante de Boltzmann ($8.617 \times 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{K}}$); y η es el coeficiente de emisión, el cual depende del material (suele tener valores entre 1 y 2).

Para voltajes directos $V \gg \frac{q}{\eta\kappa T}$, podemos reescribir

la ecuación 1 como

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

de donde se puede demostrar que

$$I_0 = BT^3 \exp\left(-\frac{E_g}{\eta\kappa T}\right) \quad (3)$$

donde B es una constante y E_g es la brecha de energía. Como el valor de E_g depende ligeramente de la temperatura, denotamos

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

que es el coeficiente de temperatura de la brecha. Sustituyendo la ecuación 3 en la 2, obtenemos

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

y si derivamos respecto a T la ecuación anterior, podemos obtener el coeficiente de temperatura α de la brecha:

$$q \frac{dV}{dT} = \frac{qV}{T} - \frac{E_g}{T} + \alpha - 3\eta\kappa T \quad (6)$$

2. Metodología

2.1. Determinación de la corriente de saturación I_0 y el coeficiente de emisión η .

Se utilizó el circuito de la Figura 6, de donde se registró la variación de la corriente en función del voltaje suministrado. Se realizó un barrido desde 300 mV hasta 600 mV para el diodo de silicio modelo 1N4003. Para el diodo de germanio modelo ITT EM120, se realizó el barrido desde 100 mV hasta 510 mV; ambos con incrementos de 10 mV. Siguiendo el esquema del circuito, el montaje (ver Figura 7) consistió en una fuente de alimentación HP-6214A (capacidad de 1.0 V ó 500 mA), un multímetro HP-34401A configurado para medir corriente en mA hasta un orden de magnitud de 10^{-4} ; se utilizó una protoboard común para montar el diodo. Para medir voltaje, se utilizó un multímetro Steren MUL-282 configurado para medir voltaje en mV con una resolución de dos órdenes de magnitud.

2.2. Determinación de la brecha de energía E_g y el coeficiente de temperatura α asociado a la brecha.

Se utilizó el circuito de la Figura 8, de donde se registró la variación del voltaje en función del cambio de temperatura. Se realizó un barrido desde 298.15 K hasta 343.15 K para el diodo de silicio modelo 1N4003. Para el diodo de germanio modelo ITT EM120, se realizó el barrido desde 307.15 K hasta 338.15 K; ambos con incrementos de 1 K. Se suministró una corriente constante de 0.15 mA para el diodo de silicio, y de 470 mA para el diodo de germanio. Siguiendo el esquema del circuito y comparándolo con el de la Figura 7, que en esencia consistió en los mismos instrumentos, en el montaje (ver Figura 9) difirió en que se eliminó la protoboard, y se cambió el multímetro Steren por un segundo multímetro HP-34401A. El diodo se conectó con un arreglo de cables que se sumergió en aceite en un vaso de precipitados en baño "María". Se utilizó una parrilla Mayware con cinco niveles de calentamiento. Para medir la variación de la temperatura, se utilizó un multímetro Steren MUL-282 configurado para medir temperatura con un termopar, con resolución de hasta dos órdenes de magnitud.

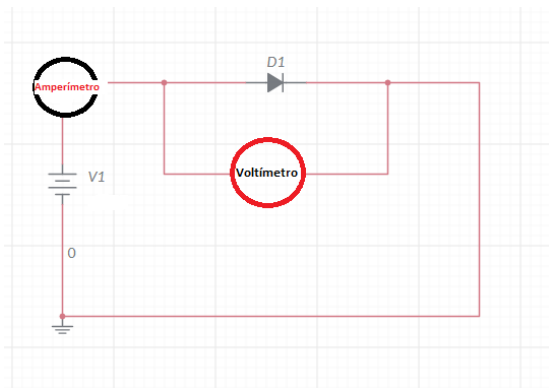


Figura 6. Circuito 1

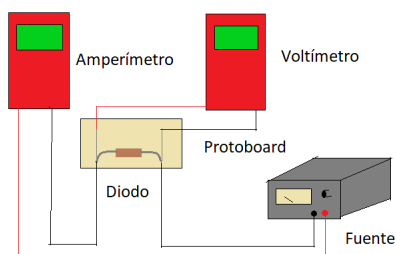


Figura 7. Diagrama del montaje experimental para la primera parte

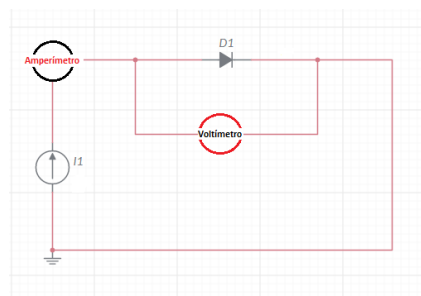


Figura 8. Circuito 2

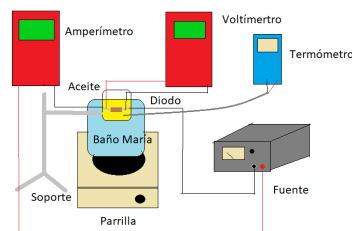


Figura 9. Diagrama del montaje experimental para la segunda parte.

3. Resultados

3.1. Silicio - Diodo 1N4003

En la Figura 10, se observa la gráfica del voltaje contra el logaritmo natural de la corriente para el diodo de silicio, de donde a partir de un ajuste lineal con el programa *OriginLab*, se obtuvo la ecuación

$$\ln(I)(V) = -20.46910 + 23.23813V \quad (7)$$

la cual, comparándola con la ecuación 2, del primer término se obtuvo la corriente de saturación

$$I_0 = (1.29 \times 10^{-9} \pm 0.13 \times 10^{-9}) A$$

y del segundo término, se despejó η de $23.23814 = \frac{1e}{\eta\kappa T}$ con $T = 294.15K$, por lo que se obtuvo un coeficiente de emisión

$$\eta = 1.698 \pm 0.005$$

que se utilizó para después calcular el coeficiente α de temperatura.

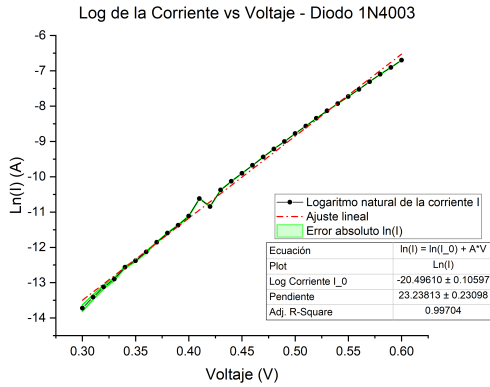


Figura 10. Gráfica linealizada de la ecuación 2 para el diodo 1N4003 de silicio.

Así mismo, en la gráfica de la figura 11, se muestra la relación lineal entre la temperatura y el voltaje, y se obtuvo con el ajuste lineal la ecuación

$$V(T) = 1.000 - 0.00187T \quad (8)$$

Ahora, de la ecuación 5, para poder hacer nuestra aproximación lineal y compararla con la ecuación 8, notemos que $\ln(T)$ se puede expresar en términos de los límites de temperatura, es decir, el promedio entre

el logaritmo natural de 298.15 K y 343.15 K, por lo cual, $\ln(T) \approx 5.77$. Ahora, para $\ln\left(\frac{I}{B}\right)$, veamos que si la corriente medida es del orden de 10^{-6} y la T^3 es de un orden de 10^7 se tiene que

$$I \ll T^3 \Leftrightarrow I \ll BT^3 \Leftrightarrow \ln\left(\frac{I}{B}\right) \ll 3 \ln(T)$$

Con lo anterior, se reescribe la ecuación 5 como

$$V = \frac{E_g}{q} - 3 \ln(T) \frac{\eta\kappa T}{q} \quad (9)$$

Comparando la ecuación 8 con 9, se obtuvo la brecha de energía para el Silicio,

$$E_g = (1.000 \pm 0.004) eV$$

De la misma ecuación 8, se tiene que

$$-0.00187 \sim 17.31 \frac{\eta\kappa T}{q} \sim \frac{dV}{dT}$$

valor que sustituimos en la ecuación 6 y despejamos α . Con ayuda de Excel, se calculó este coeficiente para cada par de datos de voltaje y temperatura, y se obtuvo un promedio. Por lo tanto, el coeficiente de temperatura de la brecha del Silicio es

$$\alpha = (0.00356 \pm 0.00002) \frac{eV}{K}$$

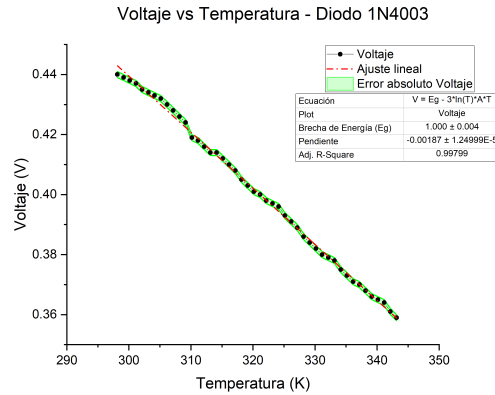


Figura 11. Gráfica de Voltaje contra temperatura a una corriente constante (0.15 mA) y su ajuste lineal para el silicio

3.2. Germanio - Diodo ITT EM120

Para el diodo de germanio, se realizó el mismo tratamiento para el cálculo de los coeficientes de emisión y temperatura, la corriente de saturación I_0 y la brecha de energía E_g .

De la Figura 12, se obtuvo la ecuación ajustada linealmente:

$$\ln(I)(V) = -12.58486 + 20.67557V \quad (10)$$

de donde se obtuvo la corriente de saturación

$$I_0 = (3.42 \times 10^{-6} \pm 0.38 \times 10^{-6}) A$$

Luego, el coeficiente de emisión,

$$\eta = 1.908 \pm 0.008$$

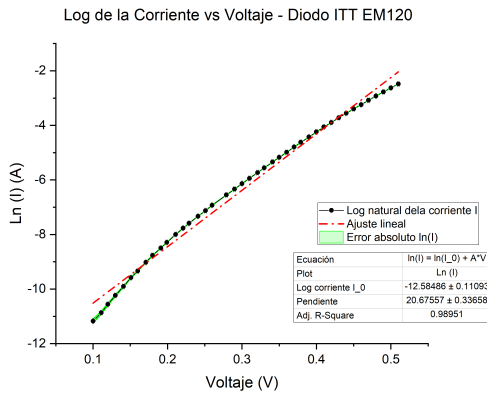


Figura 12. Gráfica linealizada de la ecuación (1) para el diodo EM120 de germanio.

De la Figura 13, se obtuvo la ecuación

$$V(T) = 0.720 + 0.000552T \quad (11)$$

de donde el valor de la brecha de energía para el Germanio es

$$E_g = 0.720 \pm 0.004$$

y el coeficiente de temperatura de la brecha es

$$\alpha = (0.00174 \pm 0.00001) \frac{eV}{K}$$

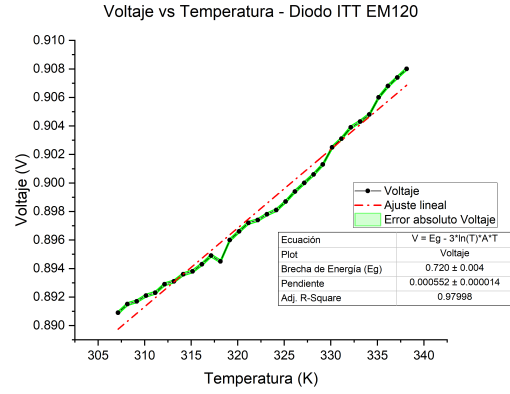


Figura 13. Gráfica de Voltaje contra temperatura a una corriente constante (470 mA) y su ajuste lineal para el diodo de germanio.

4. Discusión

Los valores obtenidos para la brecha de energía presentan un error porcentual menor al 10% respecto a los valores teóricos esperados para ambos diodos, lo que señala que la técnica utilizada para encontrar la brecha de energía es eficiente además de rápida y al sustituir los aparatos de medición utilizados por aparatos con mayor resolución se podría obtener una mayor precisión.

Por otro lado los valores del coeficiente de temperatura α son mayores para el silicio que para el germanio al igual que la brecha de energía, de lo cual se infiere que son más susceptibles a cambiar con la temperatura.

También se observó que existe una diferencia en el comportamiento de ambos diodos respecto a la variación con la temperatura ya que el voltaje obedece un comportamiento decreciente respecto al aumento de la temperatura para el silicio (Figura reffig:lineal-si-p2) y para el germanio (Figura reffig:lineal-ge-p2) uno creciente. Lo cual resalta que se cruzó la tensión umbral de conducción en un diodo germanio que se da a los 0.3V que para el silicio es de 0.7V y no se cruzó. Sin embargo, se utilizó una tensión superior debido a la incapacidad de los instrumentos de medición de registrar variaciones para tensiones menores. Se propone analizar el comportamiento de diferentes diodos hechos del mismo semiconductor y variar los rangos de temperatura para determinar con más precisión el comportamiento del voltaje respecto al aumento de temperatura.

5. Conclusiones

- Se encontró una relación inversamente proporcional entre la temperatura y el voltaje a corriente constante para el diodo 1N4003 de silicio con una brecha de energía de $E_g = (1.000 \pm 0.004) \text{ eV}$, $\alpha = (0.00356 \pm 0.00002) \text{ eV/K}$ con un error del 8.2 % con respecto al valor teórico.
- Se encontró una relación directamente proporcional entre la temperatura y el voltaje a corriente constante para el diodo EM120 de Germanio con una brecha de energía de $E_g = (0.7202 \pm 0.0045) \text{ eV}$, $\alpha = (0.00174 \pm 0.00001) \text{ eV/K}$ con un error menor al 1 % respecto al valor teórico.
- Se encontró que el germanio es un semiconductor más eficiente en un 28 % que el silicio por tener una brecha de energía menor.

Referencias

- [1] Universidad Católica del Perú. *Enlaces químicos*. 5 de mar. de 2023. URL: <http://corinto.pucp.edu.pe/quimicageneral/contenido/35-enlace-metalico.html>.
- [2] Grupo Iberdrola. *Semiconductores, ¿qué son y por qué su escasez amenaza la economía global?* 4 de mar. de 2023. URL: <https://www.iberdrola.com/innovacion/semiconductores#:~:text=QU%5C%C3%5C%89%5C%20ES%5C%20UN%5C%20SEMICONDUCTOR,e1%5C%20paso%5C%20de%5C%20la%5C%20misma..>
- [3] Charles Kittel. *Introduction to Solid State Physics*. 7.^a ed. Wiley, 1996. ISBN: 0-471-11181-3.
- [4] Universidad de Valencia. *Tema 3: Semiconductores*. 5 de mar. de 2023. URL: <https://www.uv.es/~navasqui/Tecnologia/Tema3.pdf>.

Apéndice A. Primer apéndice

Tabla 1. Datos experimentales de la medición de voltaje y corriente para el diodo de silicio 1N4003.

Voltaje [mV] (± 1)	Voltaje [V] (± 0.001)	Corriente [mA] (± 0.0001)	Corriente [A] ($\pm 1 \times 10^{-7}$)	$\ln(I)$ [A]	Error $\ln(I)$
300	0.300	0.0011	0.0000011	-13.7202	0.0912
310	0.310	0.0015	0.0000015	-13.4100	0.0668
320	0.320	0.0020	0.000002	-13.1224	0.0500
330	0.330	0.0025	0.0000025	-12.8992	0.0400
340	0.340	0.0035	0.0000035	-12.5627	0.0286
350	0.350	0.0042	0.0000042	-12.3804	0.0238
360	0.360	0.0054	0.0000054	-12.1291	0.0185
370	0.370	0.0071	0.0000071	-11.8554	0.0141
380	0.380	0.0092	0.0000092	-11.5963	0.0109
390	0.390	0.0115	0.0000115	-11.3732	0.0087
400	0.400	0.0149	0.0000149	-11.1141	0.0067
410	0.410	0.0245	0.0000245	-10.6168	0.0041
420	0.420	0.0195	0.0000195	-10.8451	0.0051
430	0.430	0.0312	0.0000312	-10.3751	0.0032
440	0.440	0.0399	0.0000399	-10.1291	0.0025
450	0.450	0.0500	0.0000500	-9.9035	0.0020
460	0.460	0.0629	0.0000629	-9.6740	0.0016
470	0.470	0.0795	0.0000795	-9.4398	0.0013
480	0.480	0.0997	0.0000997	-9.2133	0.0010
490	0.490	0.1233	0.0001233	-9.0009	0.0008
500	0.500	0.1544	0.0001544	-8.7760	0.0006
510	0.510	0.1910	0.0001910	-8.5632	0.0005
520	0.520	0.2374	0.0002374	-8.3458	0.0004
530	0.530	0.2943	0.0002943	-8.1309	0.0003
540	0.540	0.3592	0.0003592	-7.9316	0.0003
550	0.550	0.4410	0.0004410	-7.7265	0.0002
560	0.560	0.5399	0.0005399	-7.5241	0.0002
570	0.570	0.6702	0.0006702	-7.3079	0.0001
580	0.580	0.8275	0.0008275	-7.0971	0.0001
590	0.590	1.0022	0.0010022	-6.9056	0.0001
600	0.600	1.2300	0.0012300	-6.7007	0.0001

Tabla 2. Datos experimentales de la medición de voltaje y corriente para el diodo de germanio ITT EM120.

Voltaje [mV] (± 1)	Voltaje [V] (± 0.001)	corriente [mA] (± 0.0001)	Corriente [A] ($\pm 1 \times 10^{-7}$)	$\ln(I)$ [A]	Error $\ln(I)$
100	0.100	0.014	0.000014	-11.176453	0.071550
111	0.111	0.019	0.000019	-10.871072	0.052680
120	0.120	0.026	0.000026	-10.557414	0.038481
130	0.130	0.036	0.000036	-10.231992	0.027785
141	0.141	0.050	0.000050	-9.903488	0.020003
151	0.151	0.069	0.000069	-9.581404	0.014494
160	0.160	0.088	0.000088	-9.338174	0.011364
171	0.171	0.121	0.000121	-9.019720	0.008265
180	0.180	0.156	0.000156	-8.765655	0.006410
191	0.191	0.204	0.000204	-8.497391	0.004902
199	0.199	0.251	0.000251	-8.290058	0.003984
211	0.211	0.336	0.000336	-7.998399	0.002976
221	0.221	0.423	0.000423	-7.768138	0.002364
229	0.229	0.506	0.000506	-7.588974	0.001976
241	0.241	0.655	0.000655	-7.330875	0.001527
251	0.251	0.804	0.000804	-7.125911	0.001244
260	0.260	0.980	0.000980	-6.927958	0.001020
279	0.279	1.430	0.001430	-6.550081	0.000699
290	0.290	1.766	0.001766	-6.339038	0.000566
300	0.300	2.163	0.002163	-6.136259	0.000462
310	0.310	2.623	0.002623	-5.943437	0.000381
321	0.321	3.244	0.003244	-5.730948	0.000308
330	0.330	3.858	0.003858	-5.557606	0.000259
341	0.341	4.787	0.004787	-5.341851	0.000209
350	0.350	5.671	0.005671	-5.172390	0.000176
360	0.360	6.833	0.006833	-4.985991	0.000146
370	0.370	8.283	0.008283	-4.793550	0.000121
379	0.379	9.865	0.009865	-4.618762	0.000101
390	0.390	11.943	0.011943	-4.427610	0.000084
400	0.400	14.403	0.014403	-4.240319	0.000069
410	0.410	17.245	0.017245	-4.060233	0.000058
420	0.420	20.326	0.020326	-3.895854	0.000049
430	0.430	24.202	0.024202	-3.721320	0.000041
440	0.440	28.585	0.028585	-3.554873	0.000035
450	0.450	33.509	0.033509	-3.395941	0.000030
460	0.460	39.171	0.039171	-3.239819	0.000026
470	0.470	46.052	0.046052	-3.077984	0.000022
480	0.480	53.686	0.053686	-2.924603	0.000019
490	0.490	62.470	0.062470	-2.773069	0.000016
500	0.500	72.340	0.072340	-2.626378	0.000014
510	0.510	83.583	0.083583	-2.481915	0.000012

Tabla 3. Datos experimentales de la medición de voltaje y temperatura, a una corriente constante de 0.15 mA para el diodo de silicio 1N4003.

Temperatura [°C] (± 1)	Temperatura [K] (± 1)	Voltaje [mV] (± 1)	Voltaje [V] (± 0.001)	α [eV/K]
25	298.15	440	0.440	0.00379
26	299.15	439	0.439	0.00378
27	300.15	438	0.438	0.00377
28	301.15	437	0.437	0.00376
29	302.15	435	0.435	0.00374
30	303.15	434	0.434	0.00373
31	304.15	433	0.433	0.00372
32	305.15	432	0.432	0.00371
33	306.15	430	0.430	0.00370
34	307.15	428	0.428	0.00369
35	308.15	426	0.426	0.00368
36	309.15	424	0.424	0.00367
37	310.15	419	0.419	0.00366
38	311.15	418	0.418	0.00365
39	312.15	416	0.416	0.00364
40	313.15	414	0.414	0.00363
41	314.15	414	0.414	0.00362
42	315.15	412	0.412	0.00361
43	316.15	410	0.410	0.00360
44	317.15	408	0.408	0.00359
45	318.15	405	0.405	0.00358
46	319.15	403	0.403	0.00357
47	320.15	401	0.401	0.00356
48	321.15	400	0.400	0.00355
49	322.15	398	0.398	0.00354
50	323.15	397	0.397	0.00353
51	324.15	396	0.396	0.00352
52	325.15	393	0.393	0.00351
53	326.15	391	0.391	0.00350
54	327.15	389	0.389	0.00349
55	328.15	386	0.386	0.00348
56	329.15	384	0.384	0.00347
57	330.15	382	0.382	0.00346
58	331.15	380	0.380	0.00345
59	332.15	379	0.379	0.00345
60	333.15	378	0.378	0.00344
61	334.15	375	0.375	0.00343
62	335.15	373	0.373	0.00342
63	336.15	371	0.371	0.00341
64	337.15	370	0.370	0.00340
65	338.15	368	0.368	0.00339
66	339.15	366	0.366	0.00338
67	340.15	365	0.365	0.00337
68	341.15	364	0.364	0.00337
69	342.15	361	0.361	0.00336
70	343.15	359	0.359	0.00335
			PROMEDIO	0.00356
			ERROR	0.000019

Tabla 4. Datos experimentales de la medición de voltaje y temperatura, a una corriente constante de 470 mA para el diodo de germanio ITT EM120.

temperatura [°C] (± 1)	Temperatura [K] (± 1)	Voltaje [mV] (± 0.1)	Voltaje [V] (± 0.0001)	α [eV/K]
34	307.15	890.9	0.8909	0.00185
35	308.15	891.5	0.8915	0.00184
36	309.15	891.7	0.8917	0.00183
37	310.15	892.1	0.8921	0.00183
38	311.15	892.3	0.8923	0.00182
39	312.15	892.9	0.8929	0.00181
40	313.15	893.1	0.8931	0.00181
41	314.15	893.6	0.8936	0.00180
42	315.15	893.8	0.8938	0.00179
43	316.15	894.3	0.8943	0.00178
44	317.15	894.9	0.8949	0.00178
45	318.15	894.5	0.8945	0.00177
46	319.15	896.0	0.8960	0.00176
47	320.15	896.6	0.8966	0.00175
48	321.15	897.2	0.8972	0.00174
49	322.15	897.4	0.8974	0.00174
50	323.15	897.8	0.8978	0.00173
51	324.15	898.1	0.8981	0.00172
52	325.15	898.7	0.8987	0.00172
53	326.15	899.4	0.8994	0.00171
54	327.15	900.0	0.9000	0.00170
55	328.15	900.6	0.9006	0.00170
56	329.15	901.3	0.9013	0.00169
57	330.15	902.5	0.9025	0.00168
58	331.15	903.1	0.9031	0.00168
59	332.15	903.9	0.9039	0.00167
60	333.15	904.3	0.9043	0.00166
61	334.15	904.8	0.9048	0.00166
62	335.15	906.0	0.9060	0.00165
63	336.15	906.8	0.9068	0.00164
64	337.15	907.4	0.9074	0.00164
65	338.15	908.0	0.9080	0.00163
			PROMEDIO	0.00174
			ERROR	0.00001