

# MEDICIÓN DEL GAP DE ENERGÍA EN MATERIALES SEMICONDUCTORES DE SILICIO Y GERMANIO

C. SCANNAPIECO - M. A. KURODA

Laboratorio IV – Profesor S. Gil.

Departamento de Ciencias Físicas - Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FCEN)

Universidad de Buenos Aires – Argentina

e-mail : [CECILIA@LABS.DF.UBA.AR](mailto:CECILIA@LABS.DF.UBA.AR)

e-mail : [KURODA@PHILIPS.EDU.AR](mailto:KURODA@PHILIPS.EDU.AR)

El objetivo de esta experiencia es determinar el gap de energía de los semiconductores de silicio y germanio y el valor de la constante  $e/k$  (cociente entre la carga del electrón y la constante de Boltzmann), a partir de la curva característica de transistores, usados como diodos, a diferentes temperaturas entre 170K y 290K, utilizando un dispositivo sencillo. Además se realizó el mismo procedimiento con un diodo de silicio, observando que el dopaje con impurezas introduce un cambio del comportamiento ideal. Los resultados obtenidos concuerdan con los valores aceptados.

## I. INTRODUCCIÓN

Un diodo es esencialmente una juntura de material semiconductor, el cual posee impurezas, las cuales generan una concentración de cargas no uniforme. En un diodo, el comportamiento ideal de la curva característica (corriente en función de la diferencia de potencial sobre el mismo), desarrollado por Shockley, puede describirse como:

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

donde  $I$  es la corriente del diodo,  $I_0$  la corriente inversa del diodo,  $e$  la carga del electrón,  $V$  la tensión aplicada sobre la juntura,  $k$  la constante de Boltzmann y  $T$  la temperatura absoluta (Ver apéndice N°1).

La corriente inversa  $I_0$  a su vez depende de la temperatura según la expresión:

$$I_0 = C \cdot T^{3+\frac{g}{2}} \exp\left[-\frac{E_g(T)}{kT}\right] \quad (2)$$

donde  $E_g(T)$  es el gap de energía de la juntura dependiente de la temperatura y  $g$  una constante que depende del material. En la aproximación lineal de la dependencia del gap de energía con la

temperatura (la cual resulta buena para temperaturas superiores a los 200K), se obtiene que:

$$I_0 = C \cdot T^{3+\frac{g}{2}} \exp\left[-\frac{E_g^0 + aT}{kT}\right] \quad (3)$$

Tomando logaritmo a ambos lados de la expresión:

$$\ln I_0 = \ln\left(D + \frac{a}{k}\right) - \frac{E_g^0}{kT} + \left(3 + \frac{g}{2}\right) \ln(T) \quad (4)$$

Se debe hacer una distinción entre dos magnitudes que suelen confundirse. El valor  $E_g^0$  es el valor que resulta de la extrapolación lineal del gap de energía como función de la temperatura, el cual no es el mismo que el gap de energía a temperatura 0 para un semiconductor denominado normalmente  $E_g$ .

Una forma más precisa que la expresión (1) para describir el comportamiento de un diodo está dada por:

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{eV}{h k T}\right) - 1 \right] \quad (5)$$

donde  $h$  es un factor constante que generalmente oscila entre 1 y 2. En esta expresión se tiene en

cuenta la recombinación de cargas en la superficie de la juntura.

Análogamente se llega a una expresión para la corriente inversa en función de la temperatura de la forma:

$$I_0 = C \cdot T^{3+\frac{g}{2}} \exp\left[-\frac{E_g(T)}{hkT}\right] \quad (6)$$

Mientras que los diodos verifican la expresión (5), el comportamiento descrito por Shockley para los diodos (1) es mejor reproducido por los transistores conectados como diodos., donde el colector y la base se encuentran al mismo potencial. A esta conexión también se la conoce como transdiodo.

Esta experiencia se basa en la determinación de la curva característica de los transdiodos a diferentes temperaturas entre 170K y 290K. A partir de las mismas se pueden obtener dos magnitudes: la corriente inversa  $I_0$  y el valor de  $e/kT$  como función de la temperatura. Luego, conociendo la temperatura a la cual fue realizada cada medición, se puede obtener el valor de la constante  $e/k$ . Además, partiendo de la expresión (2) se puede obtener el valor del gap de energía del semiconductor  $E_g^0$  ajustando los valores obtenidos de la corriente inversa  $I_0(T)$ .

Además, se estudió el comportamiento de un diodo de silicio predicho por la ecuación (5). Se determinó el valor de  $h$  y el del gap de energía del silicio.

## II. LA EXPERIENCIA

Se armó un dispositivo teniendo en cuenta que debía mantener constante la temperatura del diodo o el transistor - empleado como diodo- para determinar su curva característica a diferentes temperaturas. Estos intervalos requerían tiempos de alrededor del minuto. Para ello se diseñó un dispositivo formado por un tubo de cobre cuyo diámetro externo era de aproximadamente 1" y su diámetro interno de aproximadamente  $\frac{3}{4}$ ". En el extremo inferior se colocó otro cilindro de acero, el cual se ponía en contacto con un baño térmico que permitía variar la temperatura del cilindro. En el interior del tubo de cobre se encontraba una base

de bronce a la cual se fijó el transistor y una resistencia de platino (Pt100) que fue empleada para medir la temperatura de la juntura. El dispositivo fue armado en su mayor parte de cobre o bronce debido a la buena conductividad térmica de los mismos, que facilitan la homogeneidad de la temperatura. Para asegurar un buen contacto térmico entre el dispositivo, el diodo y la resistencia se agregó grasa siliconada, la cual es buena conductora térmica y buena aislante eléctrica. Para evitar pérdidas de calor se envolvió el tubo de cobre con un revestimiento aislante, como muestra la figura 1.

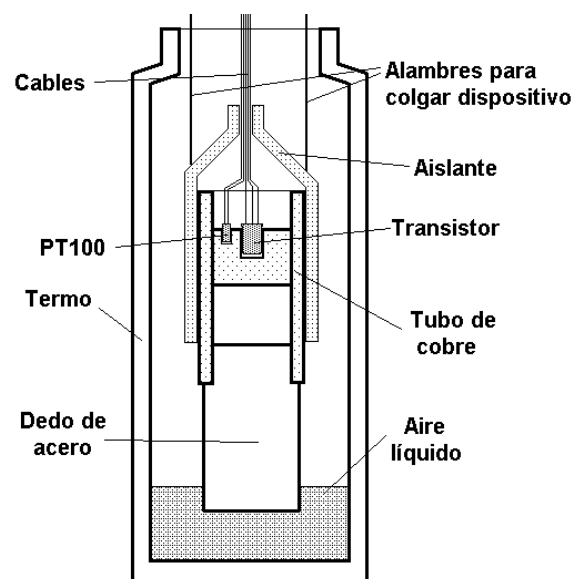


Figura 1. Esquema del dispositivo.

Todo el dispositivo se encontraba dentro de un recipiente térmico que contenía el baño térmico, sujetado por un soporte que permitía variar su altura y de esta forma controlar el contacto con la fuente térmica.

El sistema de medición consistía en un transistor cuyo emisor estaba conectado a una fuente de tensión variable, la base a tierra y el colector a un microamperímetro Keithley 485, también conectado a tierra (Ver figura 2). Se emplearon dos transistores, uno de silicio (TIP31C) y otro de germanio (2SB475C). La tensión sobre la juntura se determinó con un voltímetro digital. La resistencia Pt100 fue medida mediante un multímetro HP34401.

En primer lugar se sumergía el dedo de acero en aire líquido durante pequeños intervalos

de tiempo, para enfriar todo el dispositivo. Entonces, al bajar la temperatura del dedo, se lo separaba del líquido, se lo dejaba dentro del recipiente térmico y se esperaba a que la temperatura del dispositivo se mantuviera prácticamente constante, para lo cual se observaban las variaciones de la resistencia en función del tiempo. Una vez alcanzada una temperatura uniforme, se variaba la tensión de la fuente y se determinaba la corriente que circulaba en función de la tensión sobre el transistor. Luego volvía a repetirse el método bajando cada vez más la temperatura.

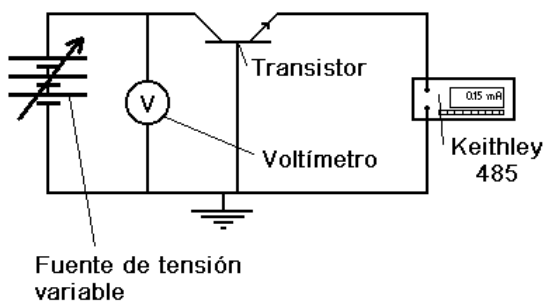


Figura 2. Esquema del circuito con transistores empleados como diodos.

Finalmente se realizó un procedimiento parecido con un diodo de silicio (.....). El circuito utilizado se muestra en la figura 3. A diferencia de las mediciones anteriores, en este caso se empleó una placa de adquisición conectada a una PC, la cual medía diferencias de potencial. Este procedimiento permitía tomar mediciones en tiempos más cortos. Para ello se empleó la salida analógica del microamperímetro, la cual transforma la señal de corriente en una señal de tensión proporcional a la corriente medida, mientras que la tensión sobre el diodo fue medida directamente por la placa de adquisición. El objetivo de esta parte de la práctica era medir el gap de energía del silicio de acuerdo al modelo de la ecuación (5).

El tiempo requerido para la determinación de la curva característica a una cierta temperatura era de aproximadamente 20 min.

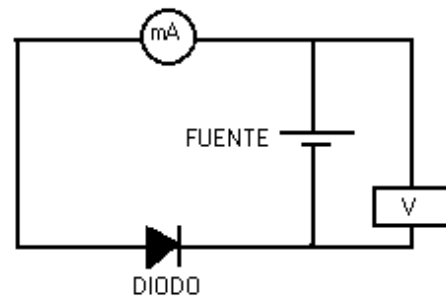


Figura 3. Esquema del circuito con el diodo.

### III. LOS RESULTADOS

#### a. Transistores empleados como diodos

En primer lugar se determinó el valor del logaritmo de la corriente inversa en función de la temperatura absoluta. Partiendo de la ecuación (1), para tensiones superiores a 0.08V, dicha expresión puede aproximarse por:

$$I \approx I_0 \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) \quad (7)$$

Tomando logaritmo en ambos miembros de la ecuación se llega a la expresión:

$$\ln I = \ln I_0 + \frac{e}{kT}V \quad (8)$$

Para determinar la temperatura correspondiente a cada medición se recurrió a la tabla de calibración del Pt100 (Ver Apéndice N°2), tomándose como error 1K. Se ajustó con una recta el logaritmo de la corriente en función de la tensión sobre la juntura para cada temperatura. Las figuras 4 y 5 muestran los resultados obtenidos en las mediciones para los transistores de silicio y germanio, respectivamente.

A partir del ajuste de los valores obtenidos anteriormente se determinó el valor de la corriente inversa en función de la temperatura (Ver figuras 7 y 8). Teniendo en cuenta la expresión (4) se ajustó la curva obtenida. Además, se graficó la pendiente de cada una de las rectas en función de la inversa de la temperatura (Ver figura 6), obteniéndose el valor del cociente entre las constantes  $e$  y  $k$ . Los resultados obtenidos se muestran en la tabla N° 1.

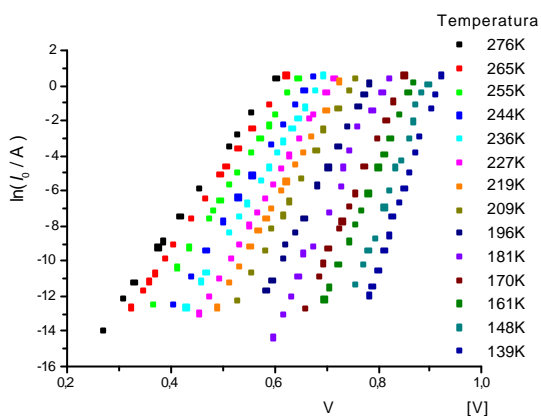


Figura 4: Logaritmo de la corriente en función de la tensión para el transistor de silicio a distintas temperaturas.

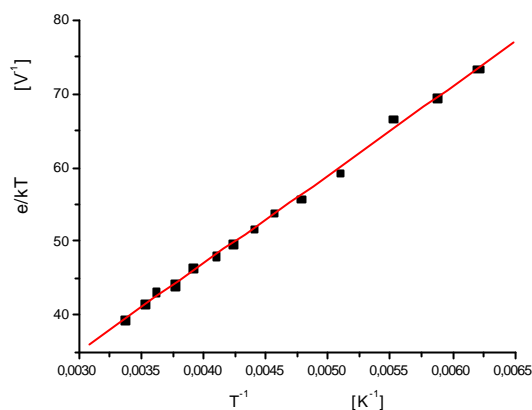


Figura 6: Gráfico de  $e/kT$  en función de la inversa de la temperatura para el transistor de silicio.

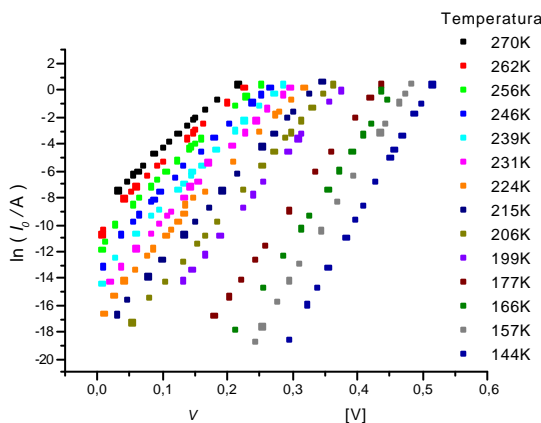


Figura 5: Logaritmo de la corriente en función de la tensión para el transistor de germanio a distintas temperaturas.

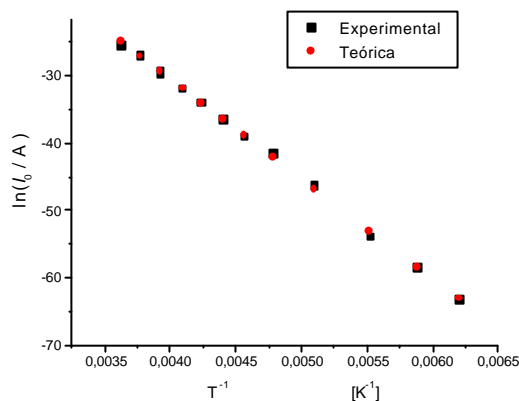


Figura 7: Logaritmo de la corriente inversa en función de la inversa de la temperatura para el transistor de silicio.

Tabla N°1: Valores obtenidos en los ajustes para el caso de los transdiodos de silicio y germanio.

Parámetro	Transistor Si TIP31C	Transistor Ge 2SB475C
$E_g^0$	$(1.23 \pm 0.01)$ eV	$(0.78 \pm 0.01)$ eV
$e/k$	$(11700 \pm 200)$ K/V	$(11200 \pm 600)$ K/V
$g$	$0.84 \pm 0.08$	$8.1 \pm 0.2$
$R$	0.956	0.928

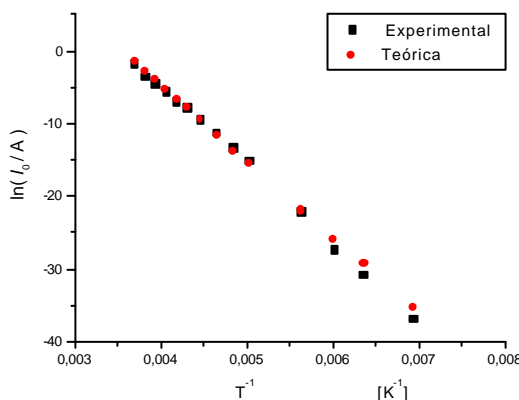


Figura 8: Logaritmo de la corriente inversa en función de la inversa de la temperatura para el transistor de germanio.

**b. Diodo de Silicio**

En este caso se empleó la placa de adquisición de datos conectada a la PC. Se utilizó la salida analógica del microamperímetro, que entrega una tensión proporcional a la corriente que circula por él. Debido a que se apreciaban diferencias significativas entre los valores indicados por el microamperímetro y los registrados por la placa de adquisición, se realizó una serie de mediciones para calibrarlo (Ver apéndice N°3). Esta diferencia podía provenir tanto de la calibración de la placa como de la salida analógica del microamperímetro.

Se procedió luego al ajuste de las curvas obtenidas de la misma forma que para el caso de los transdiodos, es decir, trabajando con tensiones tales que la exponencial de la expresión (5) era mucho mayor que la unidad. El ajuste de las curvas se realizó graficando el logaritmo de la corriente en función de la tensión como muestra la figura 9. A partir de este ajuste se puede obtener el valor del cociente  $e/hkT$  y el valor de la corriente inversa en función de la temperatura.

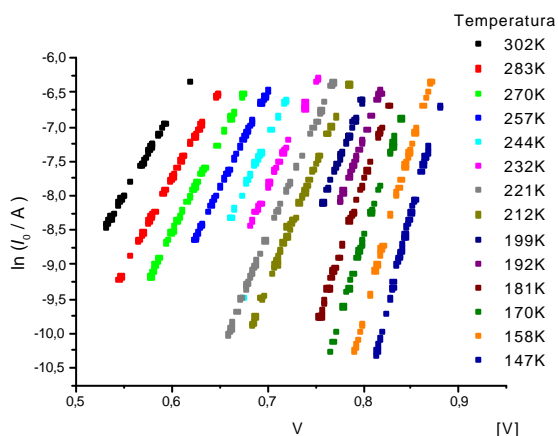


Figura 9: Logaritmo de la corriente en función de la tensión para el diodo de silicio a distintas temperaturas.

Luego, graficando  $e/hkT$  en función de la inversa de la temperatura se puede determinar el valor de  $e/hk$ , y a partir del valor teórico de  $e/k$  se puede determinar  $h$ . Los resultados obtenidos se muestran en la tabla N° 2.

Tabla N°2: Valores obtenidos en los ajustes para el caso del diodo de silicio.

Magnitud	Valor obtenido
$\frac{e}{hk}$	(6900±200) K/V
$h$	1.68 ± 0.04
$\frac{E_g^0}{hk}$	(8200±200) K
$E_g^0$	(1.18 ± 0.04) eV

Finalmente se ajustó el valor de la corriente inversa en función de la inversa de la temperatura. Tomando logaritmo en ambos miembros de la ecuación (6) se obtiene:

$$\ln(I_0) = \ln C + \left[ 3 + \frac{g}{2} \right] \ln(T) - \frac{E_g(T)}{hkT}$$

Aproximando linealmente el gap de energía y despreciando la ligera curvatura que introduce el término con dependencia logarítmica con la temperatura, se obtuvo la extrapolación del gap de energía  $E_g^0$  mostrada en la Tabla N°2.

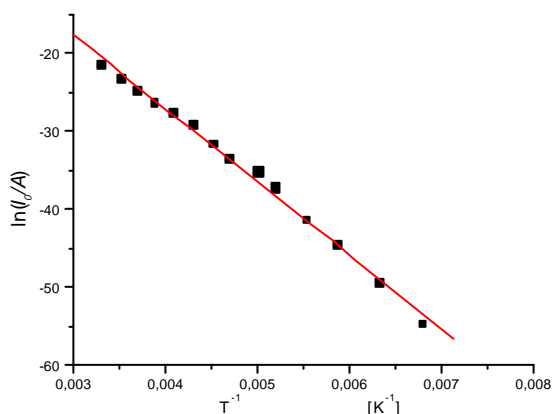


Figura 10: Logaritmo de la corriente inversa en función de la inversa de la temperatura para el diodo de silicio.

#### IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como se puede ver en la tabla N° 3, los valores obtenidos del gap de energía para los casos del transdiodo de germanio y del diodo de silicio no muestran diferencias significativas con respecto al valor aceptado, mientras que en el caso del transdiodo de silicio se aprecia una pequeña desigualdad respecto del valor aceptado. Esto puede deberse a que el comportamiento lineal vale para temperaturas cercanas a la temperatura ambiente, pudiendo ser esta aproximación no válida para el rango de temperaturas trabajado.

Tabla N° 3: Comparación entre el valor experimental y valor aceptado del gap de energía  $E_g^0$ .

Material	Gap de Energía $E_g^0$	
	Valor aceptado	Valor obtenido
Germanio	0.782 eV	(0.78±0.01)eV
Silicio	1.205 eV	(1.23±0.01)eV
Silicio (diodo)		(1.18 ± 0.04)eV

El valor obtenido de  $e/k$  no muestra diferencias significativas respecto del valor aceptado para ambos casos, como se muestra en la tabla N° 4.

Tabla N° 4: Comparación entre el valor experimental y valor aceptado de la constante  $e/k$ .

Magnitud	$e/k$
Valor teórico	11604.8 K/V
Valor obtenido en silicio	(11700 ± 200)K/V
Valor obtenido en germanio	(11200 ± 500)K/V

El valor obtenido de  $\eta$  está contenido dentro del rango esperado. Generalmente,  $1 \leq h \leq 2$ .

#### V. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos concuerdan con los valores aceptados, determinando dichos valores con una precisión del orden de 2%. Se puede considerar este método como una forma sencilla de determinar el gap de energía para los semiconductores. El inconveniente que presenta esta práctica es que por la cantidad de parámetros a determinar según estos modelos pierde sentido el ajuste cuando el número de datos es escaso. Para poder hacerlo en forma más exacta, es decir teniendo en cuenta el término logarítmico en el ajuste del gap de energía, serían necesarias más mediciones, las cuales demandan tiempo por la dificultad para alcanzar el equilibrio de la temperatura.

Otro problema importante que se presenta en la realización de esta práctica es la dificultad para mantener constante la temperatura del diodo y además el poder asegurar que efectivamente la temperatura del diodo es la misma que registra la resistencia. Sería conveniente implementar un sistema que permita mantener constante la temperatura por tiempos más largos.

El método empleado para la determinación de la curva característica del diodo mediante el empleo de la placa de adquisición presenta la gran ventaja de que al durar menos tiempo la toma de datos se estará cometiendo un menor error debido a la variación de la temperatura. Además, a igualdad de tiempo, la cantidad de datos adquiridos con la placa de adquisición es mucho mayor que al realizarlo manualmente.

En el gráfico correspondiente al logaritmo de la corriente en función de la diferencia de potencial para el transdiodo de germanio (figura 5), se observa que las curvas obtenidas se apartan del comportamiento lineal para las tensiones más bajas. Esto se debe a que la aproximación realizada en la ecuación (7) deja de ser válida porque el término exponencial se hace comparable a la unidad.

Durante la experiencia fueron realizadas algunas mediciones a temperaturas aun menores a 170K pero fueron descartadas debido a que su comportamiento se apartaba del esperado. Bludau

sugirió un desarrollo del gap de energía para bajas temperaturas de la forma:

$$E_g(T) = E_g^0 + aT + bT^2 \quad (9)$$

A causa del escaso número de mediciones, intentar ajustar la curva con este desarrollo carecía de sentido puesto que eran demasiados los parámetros libres.

Cabe distinguir que resulta interesante la precisión con que se pueden determinar el cociente entre las constantes  $e/k$  y el hecho de estudiar distribuciones de Boltzmann las cuales son poco frecuentes en los laboratorios básicos de Física.

### APÉNDICE N°1: Introducción teórica

En primer lugar podemos hacer una distinción entre aislantes y conductores. En los primeros todos los niveles de energía se encuentran absolutamente completos o vacíos (impidiendo la conducción) mientras que en los últimos al menos uno de los niveles se encuentra parcialmente completo. Es posible caracterizar un aislante de acuerdo al gap de energía  $E_g$  entre el nivel más alto completo y el más bajo vacío. Cuando la temperatura no es 0K existe una probabilidad no nula de que algunos electrones abandonen las bandas ocupadas más altas, llamadas *bandas de valencia*, y pasen a ocupar las bandas no ocupadas más bajas, denominadas *bandas de conducción*. Los sólidos que a  $T=0K$  se comportan como aislantes pero cuyos gaps permiten que la excitación térmica produzca una corriente observable a temperaturas menores que el punto de fusión se denominan *semiconductores*. Los electrones excitados producen una corriente y también se induce una corriente de huecos generada en las bandas que algunos electrones han abandonado.

El número de electrones excitados térmicamente varía exponencialmente con la inversa de la temperatura, por lo que la conductividad cambia rápidamente según la temperatura.

La nomenclatura para semiconductores se realiza de acuerdo a la valencia de los elementos que componen el cristal. Por ejemplo un trivalente con un pentavalente se denomina III-V (antimoniuro de indio y arseniuro de galio); un bivalente con un hexavalente se denomina II-VI

(sulfuro de zinc y sulfuro de cadmio) y dos tetravalentes se denominan IV-IV (Carburo de silicio). Silicio y germanio son llamados semiconductores tipo diamante debido a que poseen la misma estructura cristalina que el diamante.

La propiedad más importante de los semiconductores es el número de electrones por unidad de volumen en la banda de conducción  $n_c$  y el número de huecos por unidad de volumen en la banda de valencia  $p_v$ . Esta nomenclatura se debe a que  $n$  indica negativo y  $p$ , positivo. Estos valores dependen críticamente de la presencia de impurezas.

Cuando el semiconductor es puro los electrones en la banda de conducción provienen de la banda de valencia. En el caso del semiconductor no degenerado:

$$p_v(T) = n_c(T) \equiv n_i(T) \quad (10)$$

donde  $n_i$  se puede escribir como:

$$n_i(T) = B \cdot T^{3/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right) \quad (11)$$

En muchos casos se agregan impurezas, las cuales contribuyen con una densidad de electrones en la banda de conducción o de huecos en la banda de valencia. En este caso hablamos de semiconductor extrínseco, donde:

$$p_v(T) \neq n_c(T) \quad (12)$$

Las impurezas que aportan a la densidad de portadores del semiconductor se denominan dadores si proveen electrones a la banda de conducción y aceptores si proveen huecos a la banda de valencia. Los dadores son átomos que poseen una valencia química mayor que los átomos que conforman el semiconductor puro; mientras que los aceptores son aquellos que poseen una valencia menor. Supongamos que a un cristal puro de germanio (correspondiente al grupo IV) le reemplazamos uno de sus átomos por otro de arsénico (vecino en la tabla periódica de elementos). El primer átomo contribuía con 4 electrones de valencia mientras que el segundo lo hacía con 5. A primera aproximación, olvidando la diferencia entre la estructura del germanio y el arsénico, podemos suponer que no ha cambiado el átomo de germanio pero se ha agregado una carga fija  $e$  en dicho lugar junto con otro electrón. Un argumento similar puede ser empleado cuando la impureza es aceptora, sólo que la valencia es una menor que la del semiconductor puro (galio en el caso del germanio). Dicha impureza puede ser reemplazada por la superposición en la red de una

carga fija  $-e$  junto con la eliminación de uno de los electrones. Este proceso produce un hecho importante debido a que los nuevos niveles permitidos de energía se encuentran muy próximos a los límites de la región de energía prohibida del semiconductor, pero reducen el valor del gap (Ver figura 11). Por lo tanto será más fácil excitar térmicamente un electrón en la banda de conducción desde un nivel de dador, o un hueco a la banda de valencia desde un nivel de aceptor que excitar un electrón a lo largo del gap entero de energía desde la banda de valencia a la banda de conducción.

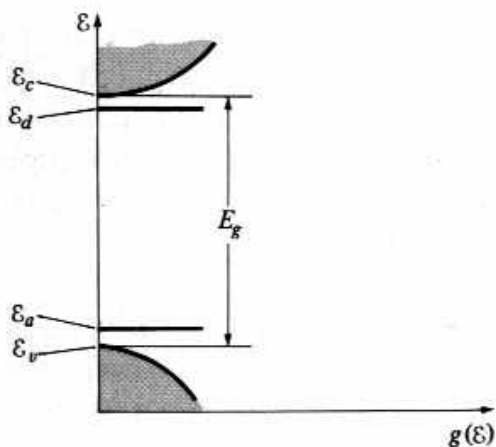


Figura 11. Nivel de densidad según la energía para un semiconductor conteniendo impurezas aceptoras y dadoras. El nivel de energía de dadores  $\epsilon_d$  están generalmente muy cerca del mínimo de la banda de conducción  $\epsilon_c$  respecto al valor del gap de energía  $E_g$ , y los niveles de aceptores  $\epsilon_a$  están muy próximos a extremo de la banda de valencia  $\epsilon_v$ .

Una juntura pn es un cristal semiconductor cuyo nivel de impurezas varía en una de las direcciones y sólo en una pequeña región, conteniendo de un lado sólo dadores y del otro sólo aceptores. A la región con impurezas aceptoras se la denomina tipo  $p$  mientras que a la de impurezas dadoras se la denomina  $n$ . A esto se lo designa dopaje. La zona donde la densidad de portadores es no uniforme tiene un espesor cuyo valor oscila entre  $10^2$  y  $10^4$  Å.

Para simplificar consideraremos una juntura "abrupta" donde la concentración de impurezas puede ser representada como:

$$N_d(x) = \begin{cases} N_d & x < 0 \\ 0 & x > 0 \end{cases}$$

$$N_a(x) = \begin{cases} 0 & x > 0 \\ N_a & x < 0 \end{cases}$$

siendo  $N_d$  y  $N_a$  la concentración de dadores y aceptores respectivamente.

A través de un modelo semiclásico, se determina el potencial electrostático:

$$-\nabla^2 \phi = \frac{4\pi \mathbf{r}(x)}{e} \tag{13}$$

donde la densidad de cargas  $\mathbf{r}(x)$  es:

$$\mathbf{r}(x) = e[N_d(x) - N_a(x) - n_c(x) + p_v(x)] \tag{14}$$

suponiendo que la variación de potencial se produce en una zona  $-d_p \leq x \leq d_n$ .

Cuando entre los extremos de la juntura se aplica una diferencia de potencial, aparece como resultado una corriente, la cual tiene dos contribuciones: la de los electrones y la de los huecos.

A su vez cada una de las mismas podemos suponerla conformada por dos corrientes, una generada por la excitación térmica a la que llamaremos  $I^{gen}$  y otra opuesta, denominada corriente de recombinación  $I^{rec}$ , debida al fuerte campo eléctrico formado en la región donde cambia el tipo de impurezas, que permite que los electrones atraviesen la barrera de potencial. Ésta corriente varía según la diferencia de potencial aplicada de acuerdo a:

$$I^{rec} = I_0^{rec} \cdot \exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) \tag{15}$$

Cuando la diferencia de potencial es nula tendremos que no debe haber una corriente neta puesto que de lo contrario se estarían almacenando cargas en los extremos del semiconductor. Entonces:

$$I_0^{gen} = I_0^{rec} \tag{16}$$

Entonces la corriente total será la producida por los huecos y los electrones.

$$I = I_{h0}^{rec} \cdot \exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - I_h^{gen} + I_{e0}^{rec} \cdot \exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - I_e^{gen}$$

$$I = I_0 \cdot \left[ \exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - 1 \right] \tag{17}$$

donde  $I_0 = (I_{h0}^{gen} + I_{e0}^{gen})$

Veamos ahora la dependencia de  $I_0$  según la temperatura. Si  $V$  no es muy grande,  $I_0$  depende



sólo de la concentración de equilibrio de portadores minoritarios ( $n_{p0}$  para los electrones en la región  $p$  y  $p_{n0}$  para los huecos en la región  $n$ ) y de su difusividad. Un modelo simple de la difusividad es la siguiente expresión:

$$I_0 = A \cdot e \left( \frac{n_{p0} \cdot D_n}{d_n} + \frac{p_{n0} \cdot D_p}{d_p} \right) \quad (18)$$

donde  $A$  es el área de la juntura,  $D_n$  y  $d_n$  son el coeficiente de difusión y la longitud de difusión para los electrones y  $D_p$  y  $d_p$  son el coeficiente de difusión y la longitud de difusión para los huecos.

Reemplazando en la ecuación que:

$n_{p0} p_0 = p_{n0} n_0 \approx n_i^2$  para la concentración cerca del equilibrio, bajo las condiciones que  $n_0 \approx N_d$  en la región  $n$  y  $p_0 \approx N_a$  en la región  $p$ , se obtiene:

$$I_0 = A \cdot e \left( \frac{D_n}{d_n N_a} + \frac{D_p}{d_p N_c} \right) \cdot n_i^2 \quad (19)$$

La dependencia de la temperatura de los términos de difusión puede expresarse como:

$$\left( \frac{D_n}{d_n N_a} + \frac{D_p}{d_p N_c} \right) = c \cdot T^{\gamma/2} \quad (20)$$

donde  $\gamma$  es una constante depende de los coeficientes de movilidad y difusión del material empleado.

Sustituyendo las ecuaciones (11) y (20) en (19) se obtiene que la dependencia de  $I_0$  con la temperatura resulta:

$$I_0 = C \cdot T^{\frac{3+\gamma}{2}} \exp \left[ -\frac{E_g(T)}{kT} \right] \quad (21)$$

#### APÉNDICE N°2: Calibración de Pt100

La ecuación de calibración de la resistencia de platino Pt100 es:

- ◆ Temperaturas entre 0°C y 850°C:

$$R(t) = R_0 (1 + a \cdot t + b \cdot t^2)$$

- ◆ Temperaturas entre -200°C y 0°C:

$$R(t) = R_0 [1 + a \cdot t + b \cdot t^2 + g(t - 100^\circ\text{C})^3]$$

donde:

$$R_0 = 100\Omega$$

$$a = 3.90802\text{E-}3^\circ\text{C}^{-1}$$

$$b = -0.580195\text{E-}6^\circ\text{C}^{-2}$$

$$g = -4.2735\text{E-}12^\circ\text{C}^{-4}$$

$t$ : temperatura en °C

En el caso en que se empleó el diodo de silicio se midió la resistencia del Pt100 a 0°C,  $R_0$ .

$$R_0 = 100.12 \Omega$$

#### APÉNDICE N°3: Calibración del microamperímetro y del voltímetro.

Para corregir las diferencias que se apreciaban entre los valores indicados por el microamperímetro y el voltímetro con respecto a los indicados por la PC, se realizó una serie de mediciones y se calibraron los instrumentos.

En el caso del microamperímetro la curva de calibración obtenida fue:

$$V_A = -0.9601 \cdot V_p + 0.004V$$

donde  $V_A$  indica la tensión indicada por el microamperímetro y  $V_p$  la tensión indicada por la placa de adquisición de datos.

En el caso del voltímetro, los resultados fueron:

$$V_V = 0.9943 \cdot V_p - 0.0013V$$

#### Referencias

- 1 – A. Sconza, G. Torzo, G. Viola "Experiment on the PN junction" A. J. of Physics **62** (1) 66-70, 1994.
- 2 – N. W. Ashcroft, N. D. Mermin "Solid State Physics" Saunders College Publishing.
- 3 – C. Kittel "Int. To Solid State Physics" John Wiley & Sons, Inc.
- 4 – P. Collings "Simple measurement of the band gap in silicon and germanium" A. J. of Physics **48** (3) 197-199, 1980.
- 5 – C. Fischer "Elementary technique to measure the energy band gap and diffusion potencial of pn junctions" A. J. of Physics **50** (12) 1103-1105, 1982.
- 6 – L. Kirkup, F. Placido "Undergraduate experiment: Determination of the band gap in germanium and silicon" A. J. of Physics **54** (10) 918-920, 1986.