

## Determinación de la banda prohibida (Band-gap) en Si y Ge.



### CÁTEDRA DE LABORATORIO 5

**Objetivos:** *Métodos para la medición de la resistividad de materiales de distinta geometría. Eliminación de potenciales de contacto. Estructura de bandas en un semiconductor. Distintos tipos de portadores. Medición del ancho de la banda prohibida (band-gap) del Si a partir de la dependencia de su resistividad como función de la temperatura.*

#### 1. Conceptos previos

La conductividad de un material con un sólo tipo de portadores de carga (como la generalidad de los metales), puede expresarse:

$$S = q n \mu \quad (1)$$

donde,  $q$  es la carga de los portadores,  $\mu$  su movilidad y  $n$  la densidad de los mismos. En general los portadores de carga son electrones, por lo que  $q = e$  y  $n$  es la cantidad de electrones libres por unidad de volumen. La movilidad  $\mu$  se define como el cociente entre la velocidad media de los portadores de carga y el campo eléctrico que los acelera. En un semiconductor pueden existir portadores de carga positivos y negativos (“huecos” y “electrones libres”). En el Si toman parte en la conducción electrones y tres tipos de huecos. En este caso, la conductividad puede expresarse:

$$S = e (\mu_n n + \mu_p p) \quad (2)$$

donde  $\mu$  es un promedio pesado de las movilidades de los tres tipos de huecos y  $p$  su densidad.

En el caso de Si intrínseco, es decir  $n = p$  (número de electrones igual al número de huecos), puede probarse que:

$$n \gg p \mu T^{3/2} e^{-E_g/2kT} \quad (3)$$

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

Si además el grado de impurezas e imperfecciones en la red no son muy altos, la movilidad a altas temperaturas (superiores a 400 K) estará determinada principalmente por la dispersión de los portadores de carga debido a oscilaciones acústicas de la red (*scattering* por *fonones* acústicos), en este caso:

$$\mathbf{m}, \mathbf{n} \propto \mu T^{-3/2} \quad (4)$$

Combinando (2), (3) y (4) se obtiene:

$$\mathbf{s} = K e^{-E_g/2kT} \quad (5)$$

donde  $K$  es una constante<sup>1</sup>.

Si se grafica, en la zona intrínseca,  $\ln(\mathbf{s})$  en función de  $1/2kT$  se obtiene una recta de pendiente  $-E_g$ .

## 2. Medición de la resistividad

Para una muestra de geometría prismática, la medición de la resistividad es un problema (relativamente) sencillo. Para ello se inyecta una corriente  $I$  por dos electrodos ubicados en los extremos y se mide la diferencia de potencial  $V$  entre otros dos electrodos separados una distancia  $d$  (ver- fig.1). Con estos datos puede calcularse la resistividad como:

$$\mathbf{r} = (VA)/(Id) \quad (7)$$

---

<sup>1</sup> En general,  $\mathbf{s} = K(T) e^{-E_g/2kT}$ , en donde  $K(T)$  varía lentamente con la temperatura en comparación con el factor exponencial al que multiplica, siempre y cuando  $E_g \gg kT$ . Por lo tanto, para temperaturas no muy altas, sigue siendo válido considerar que  $K(T) \approx \text{cte}$ .

**Fig.1:** Medición de la resistividad con cuatro contactos en un paralelepípedo. La corriente  $I$  se inyecta entre los contactos externos y se mide la diferencia de potencial  $V$  entre los contactos internos separados una distancia  $d$ ,  $\mathbf{r} = (VA)/(I d)$ .

Como no siempre puede disponerse de la geometría adecuada, existen otros métodos que permiten medir la resistividad de cuerpos con otras formas. Si la muestra tiene una cara plana, puede utilizarse el método comúnmente denominado “de cuatro puntas”. Para ello se disponen cuatro contactos alineados sobre la cara plana, separados entre ellos una distancia  $d$ . Por los contactos exteriores se inyecta una corriente  $I$  y se mide la diferencia de potencial  $V$  entre los internos. La resistividad resulta entonces:

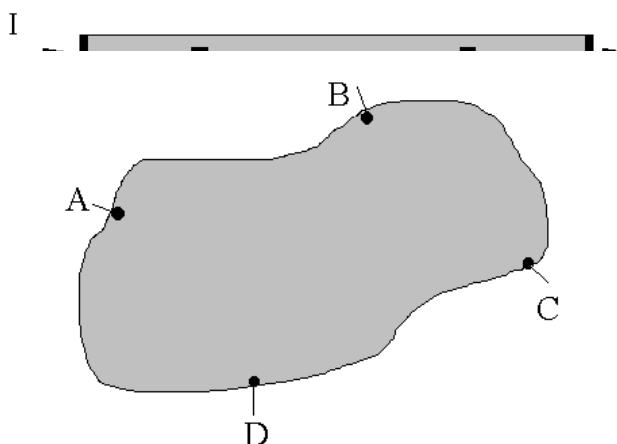
$$\mathbf{r} = 2\rho V d / I \tag{8}$$

si puede considerarse que la muestra llena un semiespacio. Esta es una buena aproximación si todas las dimensiones lineales de la muestra son mucho mayores que  $d$  y las puntas están lejos de los bordes. Esto hace a este método difícil de aplicar si la muestra es de dimensiones reducidas.

Un tercer método, aplicable a muestras de geometría plano paralela (ver Ref. 3), consiste en aplicar cuatro electrodos en los bordes de la muestra (ver fig.2), inyectando corriente por dos y midiendo la de potencial entre los otros dos. Se hace esto para dos configuraciones distintas. Definiéndose las siguientes “resistencias”:

$$R_{AB,CD} = V_{DC} / I_{AB} \quad \text{y} \quad R_{BC,DA} = V_{AD} / I_{BC} \tag{9}$$

puede probarse que se satisface:



$$\exp(-\rho R_{AB,CD} d / \mathbf{r}) +$$

$$\exp(-\rho R_{BC,DA} d / \mathbf{r}) = 1$$

donde  $d$  representa el espesor de la muestra.

**Fig. 2:** Medición de la resistividad por el método de van der Pauw. Las “resistencias” en la ecuación (9) se definen inyectando corriente en dos contactos consecutivos en el perímetro y midiendo la diferencia de potencial entre los dos restantes.

Si bien la ecuación (10) es trascendente y no puede despejarse de ella  $r$ ; su valor puede obtenerse con muy poco esfuerzo de cálculo. La pequeña dificultad en la resolución de esta ecuación es compensada ampliamente por la posibilidad de medir la resistividad de muestras de geometría arbitraria (plano paralela).

### 3. Realización experimental

#### 3.1. Materiales

Se dispone para realizar esta práctica de una muestra de Si hiperpuro con impurezas de Boro (aproximadamente 1 átomo de B cada  $10^{13}$  de Si) . A temperatura ambiente dicha muestra es ligeramente tipo  $p$  (la densidad de huecos es mayor que la de electrones), pero al subir la temperatura las densidades de portadores tienden a igualarse. Esto se traduce en una zona de temperaturas bajas (zona extrínseca) en donde la variación de la resistividad es principalmente consecuencia de la variación de la movilidad de los portadores (cuya densidad se mantiene aproximadamente constante y es proporcional a la densidad de impurezas) y una zona de más altas temperaturas (zona intrínseca) en donde predomina el incremento de la densidad de portadores por activación térmica y  $n \gg p$ . Es claro que, al evaluar los datos para estimar el *band-gap* mediante la pendiente de la recta, (que se obtiene en la zona intrínseca al graficar  $\ln(\mathbf{S})$  en función de  $1/2kT$ ) deben desecharse los puntos de la primer zona.

Para calentar la muestra se utiliza un horno eléctrico. Los contactos sobre la muestra se realizan con puntas de tungsteno ya que este material mantiene su elasticidad a altas temperaturas . Los alambres y la muestra se sostienen con un portamuestras de acero aislado con láminas de mica y la temperatura se obtiene mediante una termocupla en contacto con la muestra.

#### 3.2. Potenciales termoeléctricos y de contacto.

Para eliminar potenciales termoeléctricos y de contacto ( $V_{TyC}$ ) en el circuito, el valor “real” de tensión sobre la muestra,  $V_{muestra}$ , se obtiene promediando los valores de tensión “leídos” por el voltímetro,  $V_{leído}$ , en uno y otro sentido de la corriente aplicada, *ie.*:

$$\begin{aligned} V_{\text{leído}}(I) &= V_{\text{muestra}} + V_{\text{TyC}} \\ V_{\text{leído}}(-I) &= -V_{\text{muestra}} + V_{\text{TyC}} \end{aligned} \quad (11)$$

por lo tanto,

$$V_{\text{muestra}} = (V_{\text{leído}}(I) - V_{\text{leído}}(-I))/2 \quad (12)$$

donde claramente los potenciales  $V_{\text{TyC}}$ , son eliminados.

Al invertir el sentido de la corriente se puede verificar el carácter de los contactos. Usualmente no se aceptan diferencias mayores al 10% entre las dos lecturas.

#### 4. Preguntas

1-¿Por qué no utilizar un óhmetro para una geometría de muestra prismática?. ¿Qué ventajas tiene la utilización de una fuente de corriente y un volúmetro para medir una resistencia?.

2-Para obtener el valor del *gap* de energía  $E_g$  a partir de la ecuación (5) se supuso implícitamente que éste es independiente de la temperatura. Claramente esto no es necesariamente cierto. ¿Qué ocurriría si  $E_g$  dependiese fuertemente de  $T$  ?.

Suponga que  $E_g = E_g(0) - aT$ , donde  $E_g(0)$  es la extrapolación del *gap* a temperatura cero y  $a$  una constante independiente de temperatura, ¿qué se obtiene con el valor de la pendiente?.

3-En relación con la pregunta anterior. ¿Como haría para determinar en forma experimental el valor del *gap* de energía a una temperatura  $T$  ?. ¿Cómo se relacionaría este valor con el obtenido en esta práctica?.

4-Para la medición de la resistividad se propone la utilización de un método introducido por van der Pauw (Ref. 3). ¿ Cuáles son las hipótesis para su utilización?. ¿Se cumplen estas hipótesis?.¿Cómo afecta esto en el resultado final?.

5-La resistividad del Si a  $T$  ambiente con pocas impurezas puede ser muy alta. En ese caso puede ser que no sea posible utilizar una fuente regulada en corriente (¿por qué?). Si utiliza una fuente regulada en tensión, ¿Qué se debe hacer para eliminar los potenciales de contacto?.

6-¿Cómo se ven afectadas las mediciones si los contactos son rectificantes?.

#### 5. Bibliografía

1- N. W. Ashcroft and N. D. Mermin, "Solid State Physics" (Saunders College Publishing, 1976) 562-587.

- 2- K. V. Shalímovna "*Física de los Semiconductores*", Editorial Mir Moscú (edición en español, 1975).
- 3- L. J. van der Pauw, Phillips Research Report, **13**, 1 (1958).
- 4- D. K. de Vries "*Potential distribution in the van der Pauw technique*" Am. J. Phys., Vol. **63**, No. 12, December 1995 Pages 1074-1078.