



## Fundamentos Físicos de la Ingeniería I

### Tema 8.- PRINCIPIOS FÍSICOS DE LOS SEMICONDUCTORES

#### • Tipos de sólidos

Existen distintos tipos de enlaces entre los átomos, sin embargo, para sistematizar su estudio se recurre a dos tipos límites de enlace: (a) iónico (se forma entre un metal y un no metal) y (b) covalente (se forma entre no metales). No hay sustancias radicalmente iónicas o covalente, siendo estos dos tipos casos límites.

Desde un punto de vista macroscópico un sólido es una sustancia rígida o elástica, es decir, una sustancia que tiene un comportamiento elástico bajo la influencia tanto de fuerzas hidrostáticas como de esfuerzos y tensiones.

Atendiendo a su estructura, se pueden dividir los sólidos en amorfos y cristalinos. También se puede clasificar a los sólidos atendiendo al tipo predominante de enlace entre los átomos o iones que constituyen los cristales. Podemos considerar cinco tipos: covalentes, iónicos, con enlaces de hidrógeno, moleculares y metálicos.

#### • Bandas de energía. Conductores, aislantes y semiconductores

El concepto de *banda de energía* es de gran ayuda para entender varias propiedades de los sólidos, como la conductividad eléctrica.

Cuando los átomos se unen entre sí dando lugar a un sólido sus niveles externos de energía se solapan dando lugar a bandas. En el cero absoluto, los aislantes y los semiconductores tienen una banda de valencia llena separada por una banda prohibida de energía de una banda de conducción vacía.

En los conductores las bandas de energía ocupadas, de valencia y de conducción (bandas permitidas) están separadas por bandas prohibidas que no pueden ser ocupadas.

Solamente las bandas parcialmente llenas pueden dar lugar a corrientes eléctricas en un sólido cuando se aplica un campo eléctrico. En el lenguaje de la teoría de bandas la diferencia entre conductores y aislantes radica, pues, en el hecho de que existan o no bandas parcialmente ocupadas.

El silicio y el germanio tienen la misma estructura externa que el carbono, por lo que podemos esperar un diagrama de bandas de energía muy similar a la del diamante. Sin embargo, al ser la energía de separación  $E_G$  entre las bandas de valencia y conducción pequeña, es posible que al aumentarse la temperatura algunos electrones de la banda de valencia adquieran la energía suficiente para saltar a la banda de conducción, lo que permite el establecimiento de una corriente eléctrica al aplicar un campo eléctrico, como sucede en un conductor. Por ello reciben el nombre de *semiconductores*.

La distinción entre aislante y semiconductor reside únicamente en el valor de  $E_G$ . A la temperatura ambiente,  $E_G$  vale 1.12 eV para el Si y 0.72 eV para el Ge. En un semiconductor existen dos tipos de portadores de corriente, los electrones y los huecos, siendo la corriente total la suma de las debidas a cada tipo de portador.

#### • Semiconductores intrínsecos y extrínsecos

En los semiconductores puros (intrínseco) la conducción tiene lugar por medio de electrones que están presentes solo a causa del material cristalino puro (por ejemplo, Ge o Si) y no a causa de elementos extraños. La única posibilidad de que haya conducción es comunicar a los electrones una energía igual o mayor que  $E_G$  -que los hace pasar a la banda de conducción-, lo que puede conseguirse mediante excitación térmica o luminosa.

Mediante la operación de añadir a un semiconductor puro cantidades minúsculas, del orden de una parte por millón, de sustancias extrañas adecuadas o impurezas (átomos diferentes), es posible que los semiconductores presenten conductividad eléctrica para un rango de temperaturas mayor (semiconductores extrínsecos). Esta operación recibe el nombre de dopado. Así pues, las propiedades eléctricas de un semiconductor pueden cambiar de forma drástica por la adición de pequeñas concentraciones de impurezas donadoras, obteniéndose así un semiconductor tipo *n*; o con impurezas receptoras, obteniéndose un semiconductor tipo *p*.

#### • Ecuación del semiconductor y neutralidad eléctrica

##### *Ecuación del semiconductor*

Si *n* y *p* son las concentraciones de electrones libre y huecos en un semiconductor, respectivamente. Cuando en un semiconductor intrínseco, por excitación térmica, un electrón abandona la banda de valencia y deja tras de sí un hueco, el número de electrones libres es igual al de huecos

$$n = p = n_i = p_i$$

donde  $n_i$  y  $p_i$  son las concentraciones intrínsecas de portadores. En general, para cualquier semiconductor, los procesos de generación de pares electrón-hueco y de recombinación son continuos, y para cada temperatura se llega a un equilibrio en el que el producto  $np$  es constante. Se cumple

$$n \cdot p = n_i^2 = p_i^2 = cte. \text{ (para } T \text{ y } E_G \text{ fijas)}$$

Esta ecuación recibe el nombre de ecuación del semiconductor o ley de acción de masas, es esencial en el estudio de semiconductores y dispositivos semiconductores y es válida para semiconductores intrínsecos y extrínsecos en equilibrio térmico.

Fuera del equilibrio, esto es, cuando  $n$  y  $p$  están gobernadas en el dispositivo por condiciones externas, no se verifica la ecuación anterior.

#### Condición de neutralidad eléctrica

Si el semiconductor se encuentra dopado la ley de acción de masas no es suficiente para determinar la concentración de portadores. Además es preciso añadir una relación que ligue dichas concentraciones con la densidad de impurezas donadoras o aceptaras. Esta expresión viene dada por la *condición de neutralidad eléctrica*:

$$[\text{cargas positivas}] = [\text{cargas negativas}]$$

Si llamamos  $N_a$  a la concentración de impurezas aceptaras y  $N_d$  a la concentración de impurezas dadoras (en número de átomos por unidad de volumen), la condición de neutralidad eléctrica se escribe:

$$p + N_d = n + N_a$$

la cual queda suficientemente explicada si se consideran los siguientes puntos: (a) El semiconductor es eléctricamente neutro, si sobre él no actúa ningún campo externo. (b) Al añadir las densidades de impurezas dadoras y aceptaras se tienen electrones y huecos adicionales. (c) Todas las impurezas dadoras y aceptaras están ionizadas.

#### • Fenómenos de transporte en semiconductores

En un semiconductor pueden aparecer fenómenos de transporte de cargas debidos tanto a la aplicación de campos eléctricos como a la existencia de gradientes de concentración de portadores, es decir, cuando dicha concentración depende del punto del material semiconductor.

Los fenómenos de transporte son muy variados por lo que únicamente se considerarán los siguientes

- La conducción eléctrica debida al transporte de carga originado por la aplicación de un campo eléctrico uniforme.
- La conducción eléctrica debida a la difusión de carga originada por la existencia de un gradiente de portadores.
- El efecto Hall, en el que la aplicación de un campo magnético da lugar a un campo eléctrico (léase una diferencia de potencial).

Como en un semiconductor existen dos tipos de portadores de carga (electrones y huecos), en la expresión correspondiente a la corriente de desplazamiento (o arrastre) aparecen dos términos, uno debido a los electrones y el otro a los huecos:

$$\vec{J} = e(n\mu_n + p\mu_p)\vec{E}$$

por lo que la conductividad de un semiconductores es:

$$\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p)$$

#### • Dispositivos semiconductores

La unión de un semiconductor de tipo  $p$  con un semiconductor de tipo  $n$  forma un diodo de unión (unión  $p-n$ ) que es la base para la fabricación de dispositivos semiconductores como el diodo y el transistor. Estos dispositivos juegan un papel fundamental en la electrónica contemporánea.

Un diodo contiene una unión  $p-n$ , mientras que un transistor de unión bipolar contiene dos uniones  $p-n$  que pueden ser  $p-n-p$  o bien  $n-p-n$ .