

CONDUCTORES SEMICONDUCTORES Y AISLANTES.

I. Q. Luis Farrera G.

Existen dos enfoques, basados en la *teoría de bandas*, que nos permiten entender los fenómenos de conductividad eléctrica y térmica en los materiales sólidos. Estos enfoques son capaces de explicar, por ejemplo, las diferencias tan enormes en las resistividades eléctricas de tales materiales.

Uno de ellos es la teoría de F. Bloch (1928), la cual establece que los electrones de valencia en un metal se encuentran sujetos a un potencial no constante (periódico) y cuya periodicidad es impuesta por la estructura cristalina. El otro, la teoría de W. Heitler y F. London, considera los efectos sobre los niveles energéticos de átomos aislados, cuando dichos átomos se encuentran agrupados en un cristal (átomos inter-actantes). Un tratamiento riguroso de la teoría de bandas, requiere de la aplicación de la mecánica cuántica, en cualquiera de los dos enfoques. El de Heitler y London, sin embargo, permite una explicación cualitativa más clara de los fenómenos involucrados en la teoría de bandas, por lo cual nos centraremos en esta teoría.

Los materiales pueden clasificarse, de acuerdo con su resistividad, en *conductores*, *semiconductores* y *aislantes*.

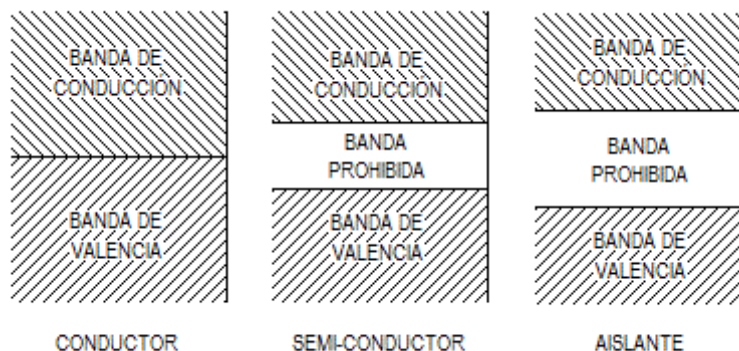


Fig. 1 Los materiales, de acuerdo a su conductividad, pueden clasificarse en tres categorías principales: conductores, semiconductores y aislantes.

Conductores.

Los *conductores* son materiales (generalmente metales), cuya estructura electrónica les permite conducir la corriente eléctrica a bajas temperaturas o temperatura ambiente; su resistividad al paso de la corriente eléctrica es muy baja. De acuerdo con la teoría de bandas, son aquellos materiales cuyas *bandas de valencia y de conducción*, se encuentran muy próximas entre sí, al grado de que, en algunos casos, estas bandas se encuentran sobrepuestas. Los *electrones de valencia* en un átomo, son los que se encuentran en el nivel energético más externo y ellos permiten los enlaces entre los átomos en los compuestos o entre átomos del mismo tipo en una molécula o un cristal. Por su parte, los *electrones de conducción* son los que se han promovido a niveles energéticos vacíos, lo que da lugar a su mayor movilidad y, eventualmente, da origen a las corrientes eléctricas. Veamos lo que sucede, tanto con los electrones en estados energéticos de átomos aislados, como los que se encuentran en estados energéticos en un cristal (*átomos inter-actantes*).

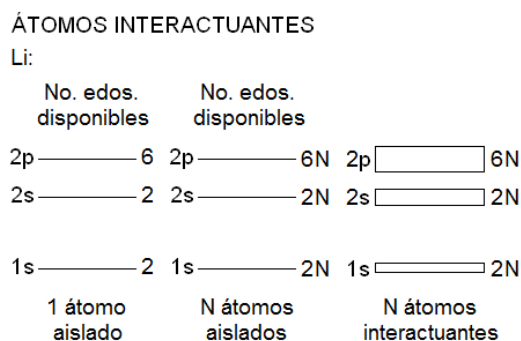


Fig. 2 Formación de bandas energéticas en N átomos inter-actuantes de Li.

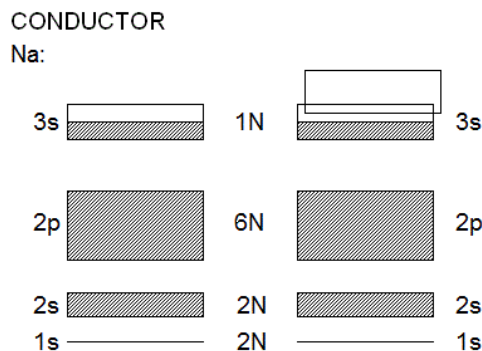


Fig. 3 Sobre-posición de bandas en un buen conductor (sodio).

En la Fig. 2, se observa el caso del metal litio (Li), un buen conductor metálico. Primero se ven los estados disponibles en un átomo aislado; luego, cuando tenemos N átomos aislados, los estados disponibles (o capacidad de los orbitales), por tanto, se ven multiplicadas por N (parte central del esquema), pero los niveles energéticos permanecen básicamente idénticos. Cuando los N átomos se encuentran muy cercanos entre sí, como en el caso de una red cristalina en un sólido, la capacidad electrónica no solo se ve multiplicada por N, sino que los estados disponibles no son más coincidentes con los estados energéticos de los N átomos aislados, pues se expanden para formar *bandas* de energía (parte final del esquema). Las regiones entre las bandas energéticas disponibles son zonas que no pueden ser ocupadas por los electrones (*bandas prohibidas* o *barreras energéticas*). Desde luego, en el átomo de litio, el orbital **1s** se encuentra ocupado por 2 electrones, el **2s** está parcialmente ocupado (1 electrón) y los **2p** se hallan vacíos. Por tanto, en el Li, la banda **2s** constituye la *banda de valencia*; la banda **2p** es la *banda de conducción*. En general, en los metales conductores, la banda de valencia y la banda de conducción se encuentra prácticamente juntas. La conductividad en algunos metales, como el sodio, constituye un caso muy especial, pues la banda de valencia (parcialmente llena), se encuentra sobrepuesta con la banda adyacente vacía, lo que hace al sodio un metal altamente conductor (Fig. 3).

Aislantes.

Los *aislantes* son materiales con una resistencia tan alta, que no es posible la conducción eléctrica a través de ellos. Un caso extremo, de este tipo de materiales, es el diamante (Fig. 4).

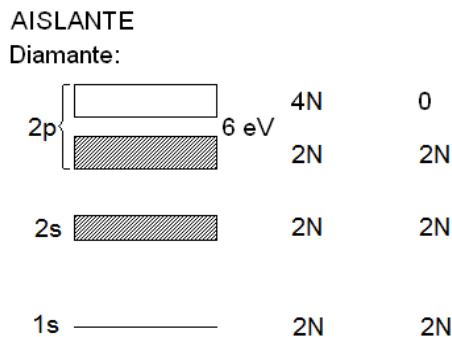


Fig. 4 En el diamante, material aislante, existe una barrera de energía muy alta entre un orbital 2p lleno y los restantes vacíos.

En el diamante, debido a su particular estructura cristalina, existe una barrera de energía de 6 eV entre la banda de energía más baja 2p (llena con 2N electrones) y los restantes estados disponibles 2p (4N estados posibles), por lo cual no se puede promover electrones de la banda de valencia hacia la banda de conducción. Para este aislante no es posible ganar energía por absorción de fotones (con energías menores a 6 eV). Por el contrario, en los materiales conductores, los electrones de valencia pueden ser promovidos fácilmente hacia la banda de conducción por incidencia fotónica (también por temperatura), ya que hay un continuo de estados disponibles inmediatamente arriba de la banda de valencia. Por esta razón, los materiales conductores son opacos a la luz visible; el diamante es, en especial, totalmente transparente a la luz visible.

Semiconductores.

Los *semiconductores* se encuentran situados, por lo que hace a su resistencia, entre los conductores y los aislantes, ya que a temperaturas muy bajas difícilmente conducen la corriente eléctrica y más bien se comportan como aislantes pero, al elevar su temperatura o al ser sometidos a un campo eléctrico externo, su comportamiento cambia al de los conductores. Estos semiconductores son conocidos como *intrínsecos* y, en ellos, las bandas de conducción y valencia se encuentran separadas por una barrera de energía (banda prohibida) más pequeña (comparada con la del diamante), de aproximadamente 1 eV (1.1 eV para el Si y 0.7 eV para el Ge).

Semiconductores intrínsecos.

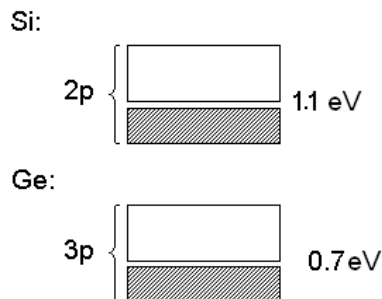


Fig. 5 Bandas prohibidas para materiales semiconductores (Si y Ge).

En este tipo de materiales, cuando se transfiere un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción, se crea un “hueco” que actúa como un “transportador” de carga positiva, fenómeno que eventualmente puede crear una “corriente positiva”.

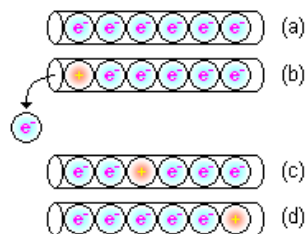


Fig. 6 Movimiento de huecos en un Semiconductor.

Para entender el movimiento relativo de los huecos, podemos imaginar a los electrones como esferas que se mueven por un tubo [Fig. 6, (a)]. Cuando una esfera (electrón) se disloca, deja un espacio vacío (hueco positivo), el cual es ocupado inmediatamente por la esfera (electrón) adyacente, (b) y (c). El desplazamiento se repite hasta que la última esfera (electrón) se mueve, dejando un último espacio vacío (hueco), (d). El movimiento de las esferas hacia la izquierda, genera un movimiento aparente de los espacios vacíos hacia la derecha. De la misma manera, puede entenderse el movimiento, en sentidos opuestos, de los electrones (negativos) y “huecos” positivos, en un semiconductor. En los semiconductores intrínsecos, el número de electrones disponibles para la conducción y los correspondientes huecos formados, se encuentran en igual número y los materiales de este tipo son de poca utilidad para la electrónica. Sin embargo, cuando se agregan ciertos átomos (impurezas) a estos materiales, sus propiedades eléctricas cambian notablemente. Así, cuando se agrega una impureza “donadora de electrones”, la proporción de electrones será mayor que la de huecos, y el material se comportará como un “portador de carga negativa”¹ (electrónica), aunque los huecos estarán presentes en menor proporción. De la misma forma, cuando se agrega una impureza “aceptora de electrones”, el material semiconductor se convertirá en un semiconductor “portador de carga positiva” (huecos), con electrones presentes en menor proporción. Al proceso de controlar la calidad y la cantidad de las impurezas, de una clase o de otra, se denomina “dopaje”. A los materiales semiconductores con impurezas de un tipo u otro, se conocen como *semiconductores extrínsecos*.

Semiconductores extrínsecos.

Germanio tipos N y P.

Cuando se agregan átomos pentavalentes (*donador*), como el As, al germanio, se forman enlaces covalentes con los átomos de Ge. En la Fig. 7 se ve el esquema de una red cristalina de Ge, en el que un átomo de Ge ha sido reemplazado por uno de As. Como se sabe, la estructura electrónica del As ($[\text{Ar}]3d^{10}4s^23p^3$) es similar a la del Ge ($[\text{Ar}]3d^{10}4s^24p^2$), solo que el As posee un electrón adicional en su capa externa. No obstante, el As puede aún formar enlaces covalentes con el Ge, como se observa en la figura.

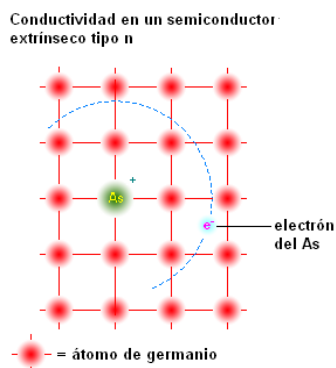


Fig. 7 Cristal de germanio en el que un átomo de Ge ha sido reemplazado por uno de As.

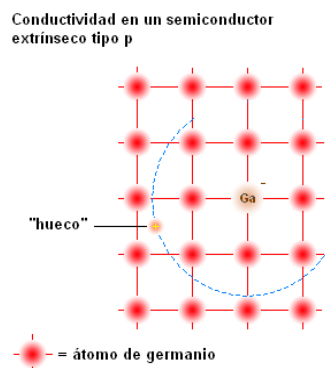


Fig. 8 Cristal de germanio en el que un átomo de Ge ha sido substituido por uno de Ga.

Consecuentemente, en este caso, el átomo de As adquiere una carga positiva, dejando un electrón disponible para la posible conducción en la red. Este proceso da por resultado un semiconductor de Ge

¹ Se puede imaginar al electrón no apareado, débilmente ligado al As, como moviéndose en una órbita de Bohr de gran radio, debido a la alta constante dieléctrica en el interior del cristal.

cuyas propiedades han sido modificadas, pues en el semiconductor formado (*semiconductor extrínseco*), hay más electrones disponibles y el material se denomina ahora *semiconductor tipo n*.

En forma similar, si la impureza agregada son átomos trivalentes (aceptor), como el Ga ($[\text{Ar}]3d^{10}4s^24p^1$) o el In ($[\text{Kr}]4d^{10}5s^25p^1$), se forman nuevamente enlaces covalentes² con el Ge, pero ahora se tendrán cargas positivas disponibles (huecos), ya que el aceptor (Ga, por ejemplo), solo tiene un electrón en su capa más externa. De la misma forma, cuando se agrega como impureza átomos de Ga a la matriz de Ge, se forma otro semiconductor extrínseco, al cual ahora se le denomina *semiconductor tipo p*. Al agregar, en forma controlada, alguno de los dos tipos de impurezas a una matriz de germanio (muy puro), se dice que el germanio ha sido *dopado*.

Para poder entender estos dos fenómenos, hay que hacer referencia a la Fig. 8, en la cual se ven dos esquemas (correspondientes a cada caso). Cuando se dopa un semiconductor (intrínseco), las bandas de valencia y de conducción se hallan más cerca que en el material original. Esto significa que la barrera de energía (*banda prohibida*), se ha reducido, siendo ahora menor a 0.7 eV, en el caso del germanio

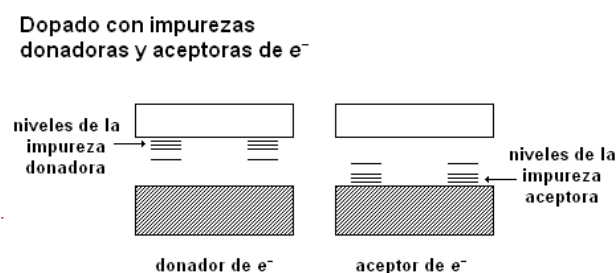


Fig. 9 Niveles de energía de las impurezas donadoras y aceptoras de electrones.

En un caso, cuando la impureza es un donador, los niveles de energía de la impureza se encuentran inmediatamente debajo de la banda de conducción del Ge, de manera que los electrones débilmente ligados a la impureza, ahora pueden ser promovidos más fácilmente a dicha banda. Por otro lado, en el caso de la impureza aceptora, los niveles de energía de la impureza se encuentran inmediatamente por encima de la banda de valencia, por lo que los electrones de esta banda pueden eventualmente moverse hacia arriba, promoviendo la formación de huecos en el material semiconductor.

Flujo de corriente en materiales tipo *n* y *p*.

En un espécimen puro de material semiconductor, hay (como ya se indicó) el mismo número de portadores de carga de ambos tipos (huecos y electrones), por lo que el material es en esencia neutro. Sin embargo, cuando un semiconductor intrínseco es dopado, aunque siempre exista la presencia de ambos tipos de conducción, el tipo de impureza determinará la predominancia de una clase de conducción u otra. Si el material es dopado con la impureza donadora de electrones, la conducción será predominantemente electrónica (material tipo *n*), pero si el material ha sido dopado con una impureza aceptora de electrones, la conducción será predominantemente por huecos (material tipo *p*).

Similarmente al caso de un metal, la aplicación de voltaje en un material tipo *n*, causará que un electrón débilmente ligado al átomo de impureza, se mueva hacia un punto de potencial positivo —flujo de corriente electrónica (Fig. 10). Pero, en forma inversa a lo que sucede en el metal, un incremento en la temperatura permite que más electrones se encuentren disponibles para la conducción (disminución de la resistencia del material). En un material tipo *p*, por otro lado, la conducción se da

² Hay que recordar que un orbital *s* y 3 orbitales *p*, forman 4 orbitales híbridos *sp* de los cuales 3 se encuentran llenos y uno contiene solamente 1 electrón desapareado, por lo tanto hay una unión covalente incompleta.

por transportadores de carga positiva (*huecos*), que se "mueven" hacia la terminal negativa del circuito (flujo de corriente por huecos).

En la terminal negativa los huecos que "llegan" son neutralizados por los electrones emitidos por la terminal, mientras que en la terminal positiva los electrones, provenientes de los enlaces covalentes debilitados, son removidos para dar lugar a la formación de nuevos huecos. Los nuevos huecos se "mueven" otra vez hacia la terminal negativa (mientras los electrones se dirigen hacia la terminal positiva), y son anulados por los electrones emitidos en esa terminal (Fig. 11).

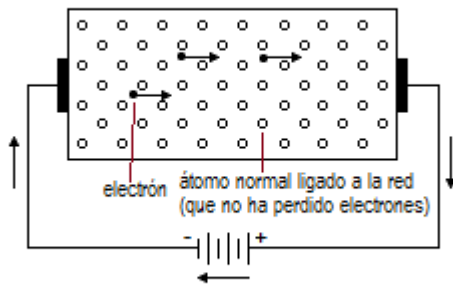


Fig. 10 Flujo de corriente en un material tipo *n*.

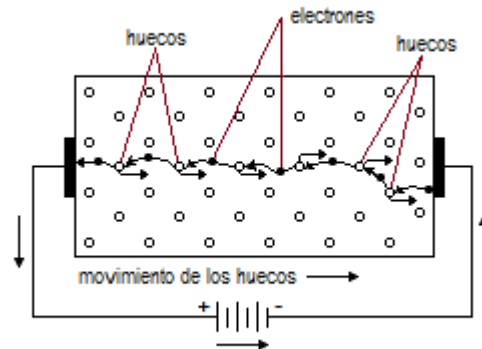


Fig. 11 Flujo de corriente en un material tipo *p*.

Uniones básicas *pn*.

Los semiconductores dopados *n* y *p*, son eléctricamente neutros, por ello no son útiles como tales para su uso en elementos electrónicos. Sin embargo, cuando un cristal homogéneo de material semiconductor de Ge o Si, por ejemplo, es tratado con impurezas pentavalente y trivalente, de tal forma que la mitad del cristal homogéneo es dopada con impureza trivalente mientras que la otra mitad es dopada con impureza pentavalente, aparece una fuerza a través de la unión (de naturaleza electroquímica), que se manifiesta como una atracción de los electrones del material *n*, por el material *p*.

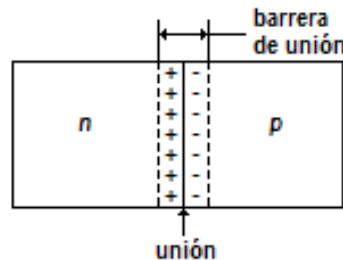


Fig. 12 Unión *pn*.

Esto último es provocado por el exceso de electrones en el material *n* y la deficiencia de ellos en el material *p*, que causa que los electrones del material *n* abandonen la estructura de dicho material y entren a la estructura del material *p*. Como consecuencia, la zona (muy fina) adyacente a la unión, del lado de la estructura *p* del cristal es cargada negativamente, mientras que la zona similar, pero ahora del lado de la estructura del material *n*, es cargada positivamente (ver Fig 12). La estructura de carga formada en la unión, constituye una *barrera de potencial* o de *unión* que impide el flujo de corriente eléctrica a través de ella. Cabe aclarar que este fenómeno solo se da si se parte de un cristal homogéneo

de material semiconductor y, la unión de dos piezas separadas de materiales n y p no producen el efecto esperado.

Una unión de este tipo constituye lo que se denomina un *diodo semiconductor* (Fig. 13), y es un elemento muy útil en sistemas de rectificación de corriente alterna.

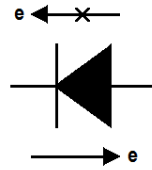


Fig. 13 Símbolo de un diodo semiconductor; en la imagen se indica también los sentidos de paso y bloqueo de corriente.

Polarización de uniones *pn*.

Las uniones *pn* se pueden polarizar en forma directa o inversa, dependiendo de la forma en que sea aplicado el voltaje y alimentada la corriente electrónica. Si los electrones se alimentan en el extremo de la zona semiconductor tipo n, el voltaje aplicado vence la barrera de oposición en la unión (zona de transición) y produce una *polarización directa* que permite el paso de una corriente apreciable (Fig. 14).

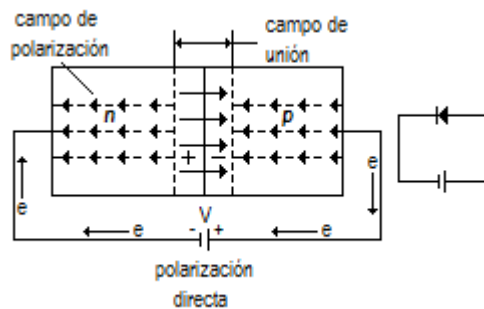


Fig. 14 Esquema del funcionamiento de un diodo semiconductor cuando se aplica un voltaje para producir una polarización directa.

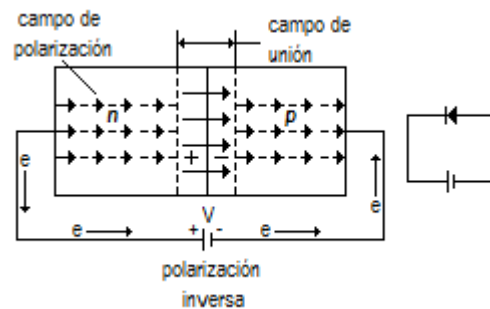


Fig. 15 Esquema del funcionamiento de un diodo semiconductor cuando se aplica un voltaje que ocasiona una polarización inversa.

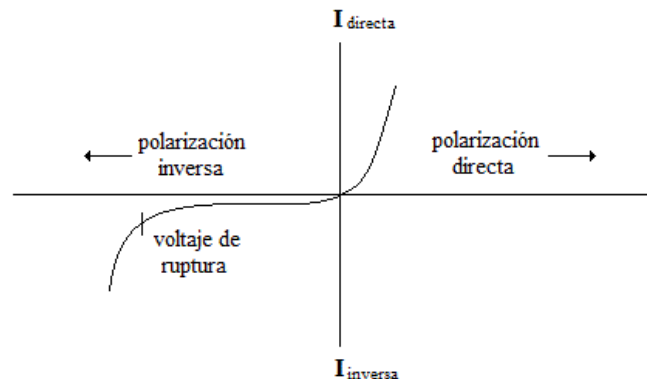


Fig. 16 Curva característica de un diodo semiconductor.

Por el contrario, si los electrones se alimentan en la zona semiconductor tipo p , el paso de corriente es bloqueado debido a que, el voltaje aplicado (con *polarización inversa*), no es capaz de vencer la barrera de oposición en la unión (Fig. 15). En consecuencia, los diodos semiconductores son muy útiles para la construcción de puentes de rectificación (de media onda u onda completa), para transformar la corriente alterna en directa y para la estabilización de voltaje en los circuitos eléctricos y electrónicos (diodos de zener).

Referencias.

- 1.- BASIC ELECTRONICS. Prepared by the Bureau of Naval Personel of U. S. NAVY. Dover Publications, Inc., New York, 1973.
- 2.- Richard T. Weidner & Robert L. Sells. MODERN PHYSICS. College Physics Series/Allyn and Bacon. Boston, 1963.
- 3.- Arthur Beiser. CONCEPTS OF MODERN PHYSICS. McGraw-Hill Book Company. Kōgakusha company, LTD, Tokyo, 1963, 1967.
- 4.- Arthur Beiser. FÍSICA APLICADA. Segunda edición. Mc. Graw-Hill, México, 1990.
- 5.- H. E. White. FÍSICA MODERNA (VOL. II). UTEHA, México, 1982.
- 6.- Ronald Gautreau y William Savin. FÍSICA MODERNA. Teoría y Problemas. Editorial McGraw-Hill Latinoamericana S. A., México, 1980.