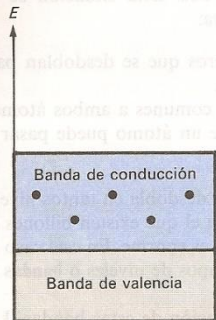
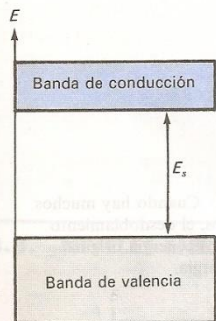


13.4. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DE LOS SÓLIDOS

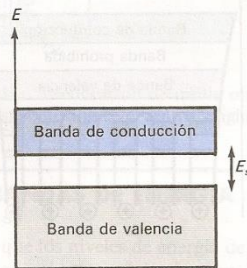
Según la facilidad con la que conducen la corriente eléctrica, los cuerpos se suelen clasificar en *conductores*, *aislantes* y *semiconductores*. La mayor o menor conductividad de un sólido se explica por la distribución de sus bandas de energía (Figura 13.15).



(a) conductores



(b) aislantes



(c) semiconductores

Figura 13.15. La conductividad depende de la anchura de la banda prohibida.

- **Conductores.** En los metales, la banda de conducción y la banda de valencia están superpuestas (Fig. 13.15a). En condiciones normales existen algunos electrones libres en la banda de conducción. Además, el salto de energía para pasar de la banda de valencia a la banda de conducción es mínimo. Es suficiente la existencia de un campo eléctrico para que los electrones se desplacen a lo largo de la banda de conducción originando la corriente eléctrica.
- **Aislantes o dieléctricos.** La banda vacía, de conducción, y la banda llena, de valencia, están separadas por una banda prohibida ancha (Figura 13.15b). El salto de energía E_s que necesita el electrón para pasar de la banda de valencia a la de conducción es grande. En consecuencia, la probabilidad de que un electrón salte de una banda a otra es mínima. Por esto, estas sustancias son malas conductoras.
- **Semiconductores.** En estos cuerpos la banda prohibida es muy estrecha (Fig. 13.15c). Por consiguiente, el salto de energía es muy pequeño. Para el germanio es de 0,75 eV, y de 1,12 eV para el silicio. En estas sustancias un aumento de temperatura favorece la conductividad, ya que los electrones, en su movimiento de agitación térmica, pasan fácilmente de una banda a otra.

13.5. CONDUCTIVIDAD INTRÍNSECA DE UN SEMICONDUCTOR

La conductividad que presenta un semiconductor en estado puro recibe el nombre de **conductividad intrínseca**. Dado que el silicio y el germanio constituyen la base de la mayoría de los dispositivos semiconductores utilizados en la Electrónica moderna, vamos a estudiar la conducción eléctrica de estos elementos.

13.5.1. La conductividad depende de la temperatura

Tanto el germanio como el silicio tienen cuatro electrones de valencia y, para completar su última capa, se unen mediante enlaces covalentes con los átomos vecinos, como indica la Figura 13.16.

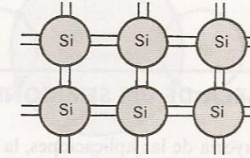


Figura 13.16. El enlace covalente fija cada átomo en la estructura cristalina. Los electrones no tienen libertad de movimiento.

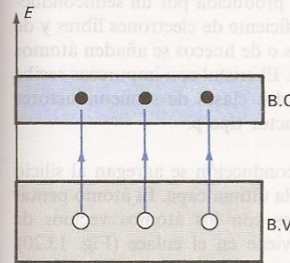


Figura 13.17. Formación de huecos en la banda de valencia.

13.5.2. Corriente de electrones y corriente de huecos

A la temperatura de cero absoluto ambos elementos no son conductores. Todos los electrones de valencia están rigidamente unidos por los enlaces, llenando la banda de valencia, no existiendo ningún electrón en la banda de conducción. Al aumentar la temperatura, la energía térmica rompe algunos enlaces covalentes provocando el paso de electrones a la banda de conducción. Estos electrones libres se moverán bajo la influencia de un campo eléctrico exterior.

Cuando un electrón pasa a la banda de conducción origina una falta de electrón llamada **hueco** en la banda de valencia (Fig. 13.17). Por consiguiente, la banda de valencia ya no estará llena y cada hueco representa un punto disponible para ser ocupado por otro electrón de la banda de valencia.

Los huecos en los semiconductores también originan una corriente. Esta es una diferencia que distingue a los semiconductores de los conductores metálicos. Un semiconductor ofrece dos caminos para la corriente, uno a través de la banda de conducción, como en los metales, y otro a través de la banda de valencia. Supongamos que un electrón al pasar a la banda de conducción deja un hueco en la banda de valencia (Fig. 13.18). El hueco atrae un electrón de valencia situado en A originando a su vez otro hueco en ese punto que será ocupado por otro electrón situado en B, y así sucesivamente. Aunque el movimiento real es de los electrones de valencia, sin embargo, en electrónica, se habla de movimiento de huecos como cargas ficticias positivas que se desplazan en sentido contrario a los electrones. Los huecos no circulan por el circuito exterior, sino sólo por el interior del semiconductor.

Resumiendo: Los semiconductores puros, debido a la temperatura, presentan una conductividad espontánea, que recibe el nombre de **conductividad intrínseca**, y se realiza a base de electrones (–) en la banda de conducción y de huecos (+) en la banda de valencia (Fig. 13.19).

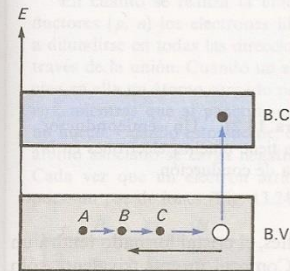


Figura 13.18. El salto de un electrón origina un desplazamiento de huecos.

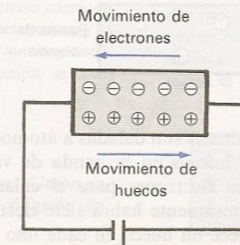


Figura 13.19. En un semiconductor la corriente se realiza a base de electrones y de huecos.

Puede ocurrir que la órbita de la banda de conducción de un átomo intercepte la órbita de huecos de otro. Debido a esto un electrón de la banda de conducción puede caer en un hueco. Esta fusión de un electrón y un hueco recibe el nombre de **recombinación**.

13.6. CONDUCTIVIDAD EXTRÍNSECA DE UN SEMICONDUCTOR

En la mayoría de las aplicaciones, la corriente producida por un semiconductor intrínseco es muy débil por el número insuficiente de electrones libres y de huecos. Para aumentar el número de electrones o de huecos se añaden átomos de impurezas al cristal de silicio o de germanio. El cristal con impurezas recibe el nombre de **semiconductor extrínseco**. Hay dos clases de semiconductores extrínsecos: semiconductor **tipo n** y semiconductor **tipo p**.

13.6.1. Semiconductor tipo n

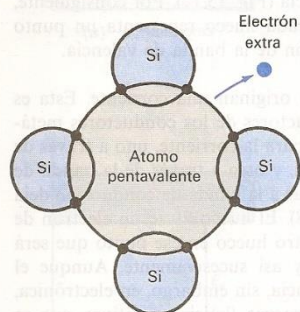


Figura 13.20. Átomos pentavalentes originan electrones en la banda de conducción.

Para obtener más electrones en la banda de conducción se agregan al silicio átomos pentavalentes, con cinco electrones en la última capa. El átomo pentavalente, después de formar enlaces covalentes con los átomos vecinos de silicio, posee un electrón extra que no interviene en el enlace (Fig. 13.20). Como la última capa solamente puede tener ocho electrones, el electrón sobrante debe desplazarse a la banda de conducción.

En la Figura 13.21 se indican las bandas de energía de un cristal con impurezas pentavalentes. Existiendo gran número de electrones en la banda de conducción producidos principalmente por las impurezas, existiendo pocos huecos creados por la energía térmica. En este caso, los *electrones son portadores mayoritarios*. El silicio así contaminado recibe el nombre de **semiconductor tipo n**, siendo *n* la abreviatura de negativo.

Los átomos pentavalentes reciben el nombre de **donantes** porque producen electrones en la banda de conducción. Ejemplos de impurezas donantes son el arsénico, el antimonio y el fósforo.

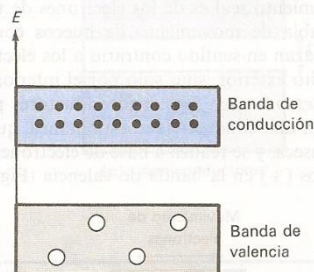


Figura 13.21. Un semiconductor tipo n tiene muchos electrones en la banda de conducción.

13.6.2. Semiconductor tipo p

Si las impurezas son debidas a átomos trivalentes, el cristal formado tendrá un exceso de huecos en la banda de valencia. Como el átomo trivalente sólo aporta tres electrones para el enlace covalente con los átomos de silicio vecinos, únicamente habrá siete electrones en su última capa. En otras palabras, aparece un hueco en cada uno de estos átomos (Fig. 13.22).

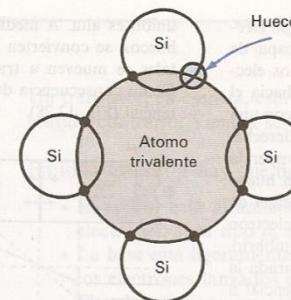


Figura 13.22. Átomos trivalentes originan huecos en la banda de valencia.

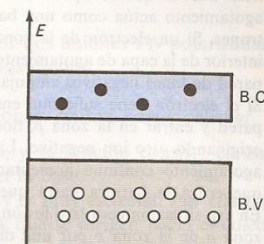


Figura 13.23. Un semiconductor tipo p tiene muchos huecos en la banda de valencia.

Un semiconductor con impurezas trivalentes recibe el nombre de **semiconductor de tipo p**, siendo *p* la inicial de positivo.

En un semiconductor de tipo *p* los huecos son portadores mayoritarios en la banda de valencia (Fig. 13.23).

Los átomos trivalentes son conocidos como átomos **receptores** porque cada hueco que ellos originan puede aceptar un electrón durante la recombinación. Ejemplos de estas impurezas son el aluminio, el boro y el galio.

13.7. EL DIODO DE CRISTAL. UNION PN

La unión de un semiconductor **tipo p** (con exceso de huecos) con un semiconductor **tipo n** (con exceso de electrones) recibe el nombre de **diodo**.

■ Diodo sin polarización

Se dice que un diodo no está polarizado cuando no se le aplica una diferencia de potencial entre sus extremos.

En cuanto se realiza la unión de los dos semiconductores (*p, n*) los electrones libres del lado *n* tienden a difundirse en todas las direcciones; algunos lo hacen a través de la unión. Cuando un electrón deja la región *n*, crea en ella un átomo cargado positivamente (*ion positivo*), mientras que al penetrar en *p* el electrón caerá en un hueco. Cuando esto sucede, el hueco desaparece y el átomo asociado se carga negativamente (*ion negativo*). Cada vez que un electrón atraviesa la unión se crea, pues, un par de iones (Fig. 13.24a y b).

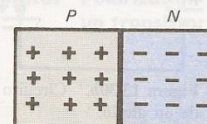


Figura 13.24a. Unión pn antes de la difusión de electrones.

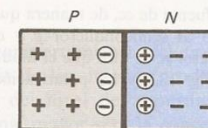


Figura 13.24b. Unión pn después de la difusión.

Estos iones están fijos en el cristal, pues forman la estructura de los enlaces covalentes, por lo que no pueden moverse como los electrones y los huecos. A medida que el número de iones aumenta, la región próxima a la unión se agota de electrones libres y huecos. Esta región recibe el nombre de **capa de agotamiento** (Figura 13.25).

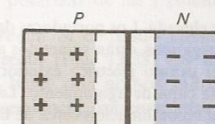


Figura 13.25. Capa de agotamiento.

Los iones positivos y negativos crean un *campo eléctrico interno* que se opone a la difusión. La capa de agotamiento actúa como una barrera frente a los electrones. Si un electrón de la zona *n* se difunde hacia el interior de la capa de agotamiento se encontrará con una pared de iones negativos empujándole hacia la derecha. Si el electrón tiene suficiente energía, puede romper la pared y entrar en la zona *p*, donde caerá en un hueco originando otro ion negativo. La energía de la capa de agotamiento continúa aumentando con cada electrón que cruza la barrera hasta que se llega al equilibrio. En esa situación cesa la difusión, quedando separada la zona *n* de la zona *p* por una diferencia de potencial a través de la capa de agotamiento llamada **potencial de barrera** (Fig. 13.26).

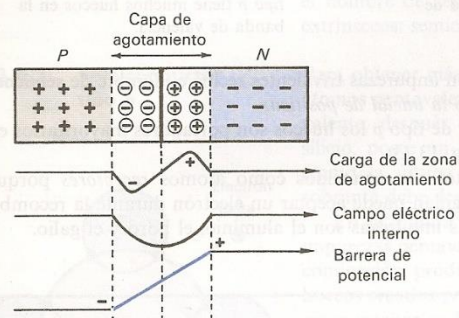


Figura 13.26. Comportamiento de un diodo no polarizado.

■ Polarización directa de un diodo

Si el diodo se conecta a una fuente de cc, de manera que el borne positivo esté unido al semiconductor *p* y el borne negativo al semiconductor *n*, se dice que el diodo tiene polarización directa (Fig. 13.27). La polarización

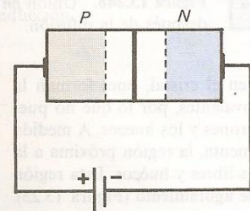


Figura 13.27. Polarización directa de un diodo.

directa produce una corriente elevada. Los portadores de carga, tanto positivos como negativos, están sometidos a una fuerza, producida por el campo eléctrico exterior, que los impulsa a través de la capa de agotamiento. La probabilidad de que ocurra la recombinación cerca de la

unión es alta. A medida que los electrones caen en los huecos, se convierten en electrones de valencia y como tales se mueven a través de los huecos de la zona *p*. Como consecuencia de ello disminuye la barrera de potencial (Fig. 13.28).

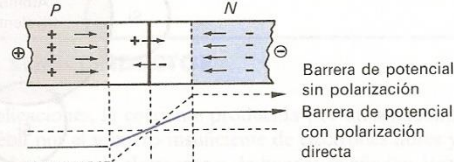


Figura 13.28. Una polarización directa disminuye la barrera de potencial.

■ Polarización inversa de un diodo

Si se invierte la polaridad de la fuente de cc [el borne (+) se conecta a la zona *n* y el borne (-) a la zona *p*] se obtiene la polaridad inversa del diodo.

Cuando se aplica la polarización inversa, los electrones y huecos se alejan de la unión. La capa de agotamiento se hace más ancha, aumentando la barrera de potencial hasta igualar la tensión exterior de la fuente; en ese momento cesa la corriente (Fig. 13.29).

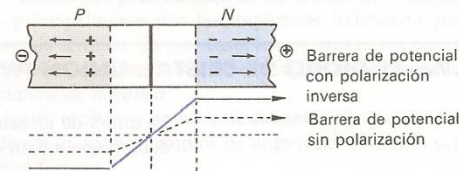


Figura 13.29. La polarización inversa aumenta la barrera de potencial impidiendo la corriente.

De lo dicho se deduce que la unión *PN* se comporta como un diodo de vacío, ofreciendo poca resistencia al paso de la corriente en un sentido (*polarización directa*) e impidiendo prácticamente la corriente en sentido opuesto (*polarización inversa*). Este diodo de cristal se puede utilizar, como el diodo de vacío, para rectificar la corriente. En las Figuras 13.30a y b se muestra el símbolo esquemático de un diodo rectificador y su conexión en un circuito.

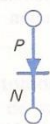


Figura 13.30a. Símbolo de un diodo.

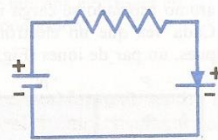


Figura 13.30b. Circuito de un diodo.

13.8. EL TRANSISTOR

Un transistor, en esencia, está constituido por dos uniones *PN* polarizadas en sentido contrario. Viene a ser la unión de dos diodos.

13.8.1. Zonas de un transistor

En todo transistor hay que distinguir tres zonas: *emisor*, *base* y *colector*.

- El **emisor** está altamente impurificado, y su función consiste en emitir electrones, si es tipo *n*, e inyectarlos en la base.
- La **base** está ligeramente impurificada y es muy estrecha. Por ella pasan los electrones lanzados por el emisor y que se dirigen hacia el colector.
- El **colector** tiene un nivel de impurificación intermedio; su misión es captar los electrones provenientes de la base.

El emisor y el colector están situados en los extremos y están formados por el mismo tipo de semiconductor, distinto del que forma la base. En consecuencia, se distinguen dos tipos de transistores: transistor *NPN* y transistor *PNP*, como se indica en la Figura 13.31a, b y c.

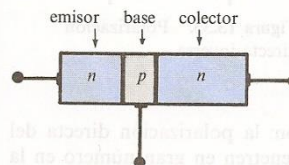


Figura 13.31a. Zonas de un transistor *NPN*.

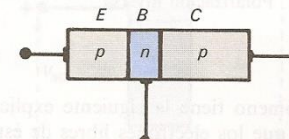
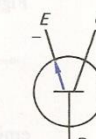
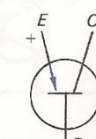


Figura 13.31b. Zonas de un transistor *PNP*.



Transistor *NPN*



Transistor *PNP*

Figura 13.31c. Esquemas de un transistor.

En el transistor *PNP* los portadores mayoritarios del emisor son huecos, en lugar de electrones libres. Lo que indica que su funcionamiento es opuesto al transistor *NPN*.

13.8.2. Transistor sin polarización

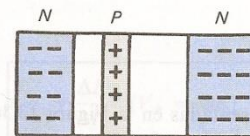


Figura 13.32. Capas de agotamiento de un transistor *NPN*.

13.8.3. Polarización de un transistor

Un transistor se puede polarizar de las siguientes formas:

- Polarización directa.** Si el diodo emisor y el diodo colector tienen polarización directa (Fig. 13.33) los electrones libres penetran con facilidad en la base, por ambos lados, fluyendo por el conductor común. En consecuencia, las corrientes del emisor y del colector son grandes.

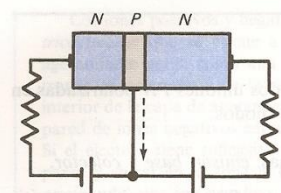


Figura 13.33. Polarización directa de un transistor NPN.

- b) *Polarización inversa*. Si los diodos tienen polarización inversa, como indica la Figura 13.34, el flujo de electrones es despreciable, por lo que esta polarización tiene escaso interés práctico.
- c) *Polarización directa e inversa*. Si el diodo emisor se polariza directamente y el colector tiene polarización inversa (Fig. 13.35), el transistor tiene un comportamiento sorprendente. Es lógico que la corriente en el emisor sea grande, puesto que tiene polarización directa, y la corriente en el colector debería ser muy débil, por su polarización. Sin embargo, la corriente del colector es tan grande como la corriente del emisor.

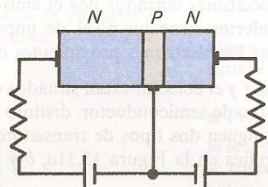


Figura 13.34. Polarización inversa.

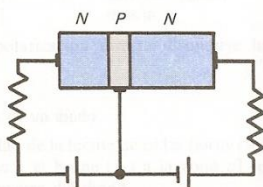


Figura 13.35. Polarización directa-inversa.

Este fenómeno tiene la siguiente explicación: la polarización directa del emisor hace que los electrones libres de éste penetren en gran número en la base. Como ésta es muy delgada y está muy poco contaminada con huecos, los electrones tienen gran facilidad de penetrar en la capa de agotamiento del colector, cuyo campo los empuja a través de la zona del colector hacia el borne positivo de la fuente de alimentación.

El hecho de que la corriente de la base sea muy débil y, en cambio, la del emisor grande, hace que el transistor tenga la aplicación de amplificador.

13.8.4. Conexiones de un transistor

Existen tres formas fundamentales de conectar un transistor en un circuito, según sea la parte del transistor que es común a la entrada y a la salida:

- Conexión en base común.
- Conexión en emisor común.
- Conexión en colector común.

Estas conexiones y sus esquemas están representadas en la Figura 13.36a, b y c.

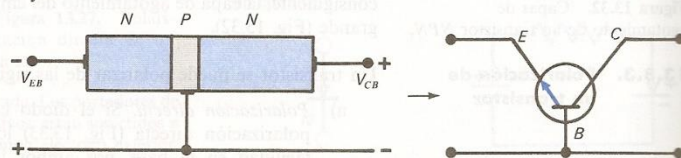


Figura 13.36a. Conexión en base común: impedancia de entrada baja e impedancia de salida muy alta.

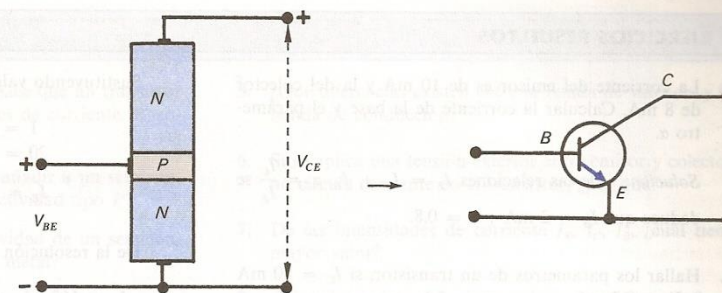


Figura 13.36b. Conexión en emisor común: impedancia muy baja en la entrada y muy alta en la salida. Es la conexión más usada.

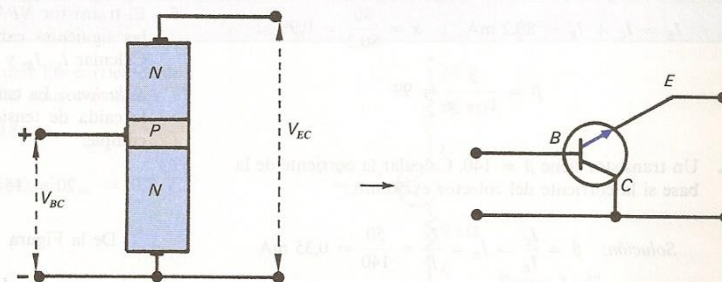


Figura 13.36c. Conexión en colector común. Tiene escaso valor práctico.

13.8.5. Parámetros de un transistor

Definen las características de funcionamiento del transistor. Son de dos tipos:

- Parámetro α .** Determina la ganancia de corriente en base común. Se define como el cociente entre la variación de la corriente del colector y la variación de la corriente del emisor cuando permanece constante la diferencia de potencial entre colector y base (véase al margen).
- Parámetro β .** Determina la ganancia de corriente en emisor común. Se define como el cociente entre la variación de la corriente del colector y la variación de la corriente en la base cuando permanece constante la diferencia de potencial entre el colector y emisor (véase al margen).

Si tenemos en cuenta que $I_e = I_c + I_b$, se puede escribir

$$\frac{I_e}{I_c} = 1 + \frac{I_b}{I_c} \Rightarrow \frac{1}{\alpha} = 1 + \frac{1}{\beta}$$

de donde se obtiene la relación entre los parámetros:

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

$$\alpha = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_e} \quad (V_{cb} = \text{cte.})$$

Representa el factor de amplificación en base común

$$\beta = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b} \quad (V_{ec} = \text{cte.})$$

Representa el factor de amplificación en emisor común

Transistores

Curvas características.

