

SEMICONDUCTORES



Erick Barrios Barocio.
Electrónica v.2025

Los semiconductores son dispositivos con propiedades eléctricas muy particulares, los cuales son la base de toda la tecnología moderna, y entre ellos podemos contar desde simples diodos y transistores hasta foto-detectores y celdas solares. Los teléfonos celulares, LEDs, pantallas de TV, computadoras, etc., deben su funcionamiento a estos dispositivos, por lo que tener idea de su funcionamiento es importante.

Contenido

1	LOS SEMICONDUCTORES.....	1
2	IMPURESAS.....	3
3	LA UNION P-N.....	4
4	EL FOTODIODO.....	5
5	REFERENCIAS.....	6

1 LOS SEMICONDUCTORES.

Son materiales con propiedades eléctricas que los ubican entre conductores y aislantes. Los más utilizados son el *germanio* y el *silicio*, los cuales forman estructuras cristalinas, es decir, sus átomos se encuentran dispuestos de forma uniforme en un patrón periódico. La Figura 1 muestra los modelos atómicos de estos dos elementos; sus núcleos presentan 32 y 14 protones, respectivamente, y en sus orbitas hay un número igual de electrones. Por tanto, la carga efectiva de estos átomos es cero, es decir, son neutros.

Las orbitas de los electrones están dispuestas en las capas *K*, *L*, *M*, y *N* y cada orbita posee un valor específico de energía, es decir, la energía de los electrones es discreta y única. Por otro lado, los electrones en las órbitas más cercanas al núcleo necesitan de una mayor energía para ser sacados (liberados) del átomo mientras que los electrones en órbitas más externas requieren de menor energía. Los electrones situados en la órbita más externa (denominada *nivel de valencia*) son llamados *electrones de valencia* y son los que pueden liberarse más fácilmente del átomo; tales electrones son los que determinan las propiedades químicas de los elementos. Los electrones de orbitas internas (*K*, *L*, *M*, *N* para el Germanio y *K*, *L*, *M* para el Silicio) se pueden agrupar con los protones del núcleo dando lugar a un núcleo modificado llamado *kernel*.

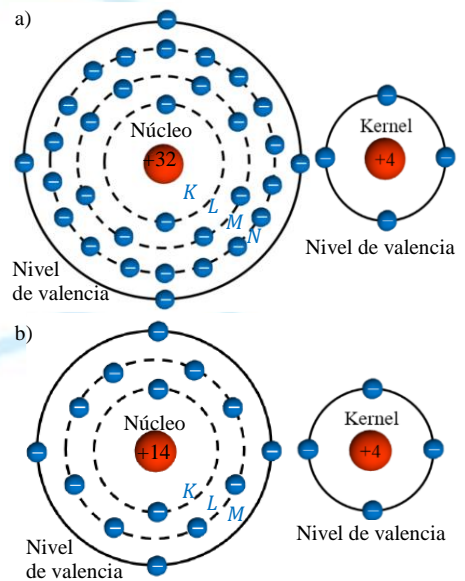


Figura 1. Modelos de los átomos de: a) Germanio y b) Silicio, con sus representaciones simplificadas.

Si a los electrones de valencia se les suministra energía suficiente de una fuente externa al átomo (ΔE), como por ejemplo a través de calor, pueden liberarse de éste (Figura 2a). En este caso se dice que los electrones pasan a ser *electrones libres* (fuera del átomo), y se pueden mover a través del semiconductor con relativa facilidad si es que hay un campo eléctrico externo.

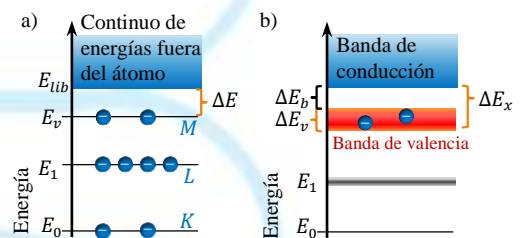


Figura 2. Comparación de los niveles de energía: a) de un átomo aislado y b) de un átomo en un cristal. Detalles en el texto.

En un cristal semiconductor, los átomos están arreglados de forma periódica. La proximidad entre ellos produce modificaciones en la energía del nivel de valencia; en particular, pasa de tener una energía específica (E_v) a tener un rango de energías continuas (ΔE_v), es decir, se torna en una *banda de valencia* (Figura 2b). En consecuencia, habrá un rango continuo de energías externas (ΔE_x) que pueden liberar a los electrones de valencia (no

solo una), y hacer que entren en la *banda de conducción*. Sin embargo, si la energía externa es menor que la diferencia entre la mayor energía en la banda de valencia y la menor energía de la banda de conducción, el electrón no podrá ser liberado, es decir existe una *brecha de energías* (ΔE_b) entre ambas bandas.

En un conductor la brecha de energías es nula (ambas bandas se traslapan, Figura 3a) por tanto no se requiere energía externa para mover a los electrones de la banda de valencia a la banda de conducción; por consiguiente, al aplicar un pequeño voltaje, en automático, se produce un gran flujo de electrones. En un semiconductor, la brecha es pequeña, por lo que se requiere relativamente poca energía para sacar a los electrones de valencia hacia la banda de conducción. En el caso del silicio, la temperatura ambiente es suficiente para hacer que algunos (muy pocos) electrones puedan cruzar la brecha (Figura 3b); en un aislante, la brecha es tan grande que se requiere de una grandísima cantidad de energía para que los electrones puedan cruzarla. A temperatura ambiente esto es prácticamente imposible (Figura 3c). En cualquier caso, cuando un electrón pasa de la banda de valencia a la banda de conducción deja un lugar vacante en la banda de valencia el cual se denomina *hueco* (Figura 4a) ^[1].

Las bandas de valencia de los átomos de germanio y de silicio tienen capacidad de aceptar hasta 8 electrones, sin embargo, solo cuentan con cuatro, por lo que en cristales forman *uniones covalentes*; es decir, comparten electrones de valencia entre vecinos. De esta forma, por ejemplo, un átomo de silicio puede completar su banda de valencia mediante la unión covalente con otros cuatro átomos de silicio que le compartirán uno de sus cuatro electrones.

A temperatura de cero absoluto, las uniones covalentes en el cristal serán estables, completas y no habrá electrones libres para la conducción. Conforme la temperatura aumenta los electrones comienzan a romper las uniones y se liberan

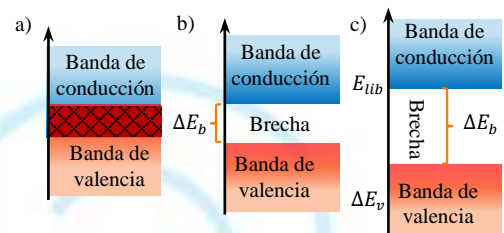


Figura 3. Brechas de energías entre las bandas de valencia y conducción en: c) un conductor, d) un semiconductor y e) un aislante. E_{lib} es la energía a la cual los electrones quedan libres; ΔE_b es la energía requerida para sacar al electrón del átomo. ΔE_v es el rango de energías que pueden tener los electrones en la banda de valencia.

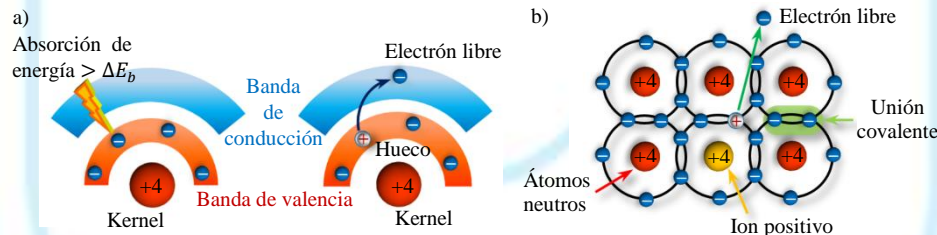


Figura 4. a) Proceso de generación de un hueco el cual puede ser interpretado como un portador de carga positiva en el átomo, ΔE es la energía requerida para sacar al electrón del átomo. b) Átomos de silicio en un cristal a temperatura ambiente; cada átomo tiene 4 electrones que comparte con sus vecinos para terminar con 8 electrones en la capa de valencia. Cuando un electrón se libera, el átomo que perdió el electrón queda con un hueco y se torna un ion positivo.

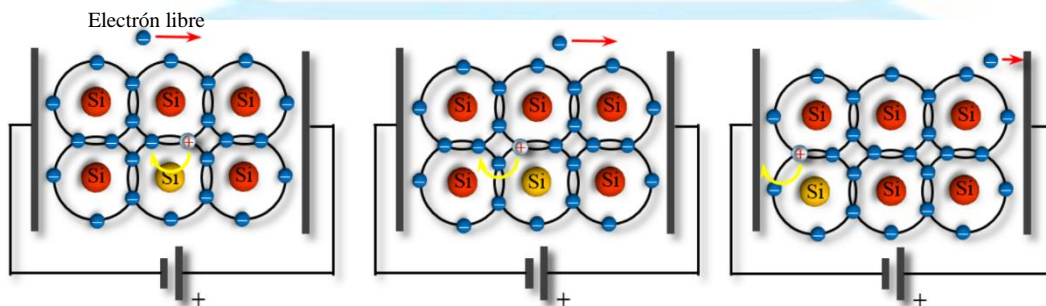


Figura 5. Movimiento de los electrones libres y huecos cuando el cristal de silicio es sometido a una diferencia de potencial. Se muestran tres tiempos distintos.

(Figura 4b). Estos electrones pasan a la banda de conducción dejando huecos en la banda de valencia, lo cual hace posible que ambas bandas conduzcan electrones. Para un cristal de silicio puro a temperatura ambiente la cantidad de electrones libres es tan pequeña que prácticamente se comporta como un aislante ^[2].

En el caso en que el cristal esté conectado a una diferencia de potencial (batería), los electrones libres se moverán por el cristal debido al campo eléctrico aplicado. De forma similar, este mismo campo produce que los electrones en las bandas de valencia se muevan intentando llenar los huecos creados por los electrones libres, dando la impresión de que el hueco también se mueve por el cristal pero en sentido opuesto al de los electrones; de ahí que se le llame portador de carga positiva (Figura 5) aunque en realidad no es una carga como tal. Cuando los huecos llegan al electrodo de la batería se neutralizan con los electrones de la misma; sin embargo, los procesos térmicos seguirán produciendo huecos. La superposición de la corriente generada por los electrones libres con la de la corriente generada por los huecos al ser igual y en sentidos opuestos (por cada hueco hay un electrón libre) se cancelan de forma que la corriente resultante es nula ^[2].

2 IMPUREzas.

Cuando un electrón que se mueve por el cristal semiconductor se encuentra con un hueco, se produce una *recombinación*. En un cristal semiconductor puro, a cualquier temperatura, existe un equilibrio entre la generación de pares electrón-hueco y su recombinación; es decir, el número de electrones es igual al número de huecos, por lo que es eléctricamente neutro.

Para lograr un semiconductor útil, al cristal de silicio se le agrega una pequeña cantidad de otro elemento, denominado *impureza*, proceso que es denominado *dopado*. Dichas impurezas son átomos de volumen similar a los del cristal anfitrión, para minimizar las dislocaciones de la estructura cristalina. Las impurezas forman uniones covalentes con los átomos anfitriones, y dependiendo del tipo de impureza puede que sobre un electrón de valencia o que sobre un hueco en la vecindad del átomo huésped. Las impurezas que contribuyen con electrones se llaman donadoras o de *tipo n* (por negativo), produciendo un semiconductor de tipo n; análogamente, las impurezas que contribuyen con huecos se llaman aceptoras o de *tipo p* (por positivo), produciendo un semiconductor de tipo p (Figura 6a y 6b).

Es común que para un semiconductor a base de silicio, las impurezas tipo n sean átomos de fósforo, el cual tiene 5 electrones de valencia, mientras que las impurezas tipo p son átomos de boro, el cual tiene 3 electrones de valencia. En el caso de los electrones sobrantes, estos pueden moverse libremente por el material tipo n creando corrientes eléctricas. De igual forma, los huecos en un material tipo p pueden ser llenados con electrones de átomos vecinos, dando un efecto de movimiento en el cristal, pero en dirección opuesta a los electrones. Por tanto, la conductividad de los semiconductores tipo n o tipo p es mayor a la de un cristal de silicio puro ^[2].

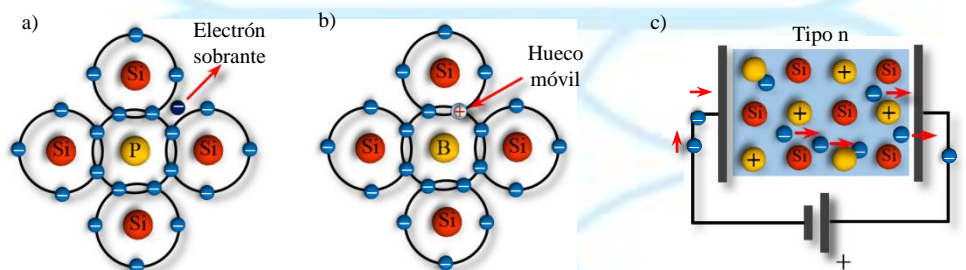


Figura 6. Efecto de las impurezas en semiconductores de silicio. a) Las impurezas donadoras dan lugar a electrones libres en un semiconductor tipo n. b) Las impurezas aceptoras dan lugar a huecos móviles en un semiconductor tipo p. c) Cuando un semiconductor sufre una diferencia de potencial, los electrones sobrantes (o huecos) de la impureza se alejan de ella, produciendo que la impureza se convierta en un ion positivos o negativo.

A temperatura ambiente, los materiales tipo n tienen mayoría de electrones libres (*portadores mayoritarios*), aunque puede que existan algunos pocos huecos (*portadores minoritarios*). Por otro lado, en un material tipo p los huecos son mayoría y los electrones libres minoría. Cuando se aplica una diferencia de potencial a estos semiconductores, ambos tipos de portadores fluyen en direcciones opuestas; sin embargo, dado que el flujo de portadores mayoritarios es superior, el flujo neto dentro del semiconductor estará dado en la dirección de flujo de los portadores mayoritarios. De igual manera, cuando existe una diferencia de potencial y los electrones (o huecos) se mueven y abandonan sus átomos de fósforo o boro originales, éstos átomos se tornan iones ya que les faltará o les sobrá un electrón; sin embargo, dado que los iones están anclados a la estructura cristalina del semiconductor, no se podrán mover y solamente generarán un campo eléctrico dentro del semiconductor (Figura 6c).

3 LA UNION P-N.

Si un material tipo p y otro tipo n se juntan mecánicamente para formar un único cristal se forma una unión p-n de semiconductores. Como el material tipo p tiene distinto nivel de carga al de uno tipo n, al juntarse intercambiarán energía sin necesidad de una batería, y tanto electrones como huecos fluirán a través de la unión en un proceso llamado *difusión*. Debido a ésta difusión, los huecos migrarán desde el material tipo p hacia el tipo n mientras que los electrones lo harán en sentido opuesto ^[1, 2].

Conforme la difusión avanza, las áreas ionizadas comenzarán a quedar vacías de portadores debido a la “aniquilación” por recombinación de electrones y huecos (Figura 7a). Estas áreas se denominan *zonas de transición* o *áreas vacías de portadores*. En estas zonas permanecen los iones positivos o negativos dejados por los electrones o huecos que, a su vez, generarán un campo eléctrico que se opondrá al flujo de portadores, creando una *barrera de potencial* (Figura 7b). Cuando la barrera de potencial alcanza una magnitud tal que impide el flujo de portadores mayoritarios (los minoritarios seguirán moviéndose), se llegará a una condición de equilibrio y el flujo de portadores terminará.

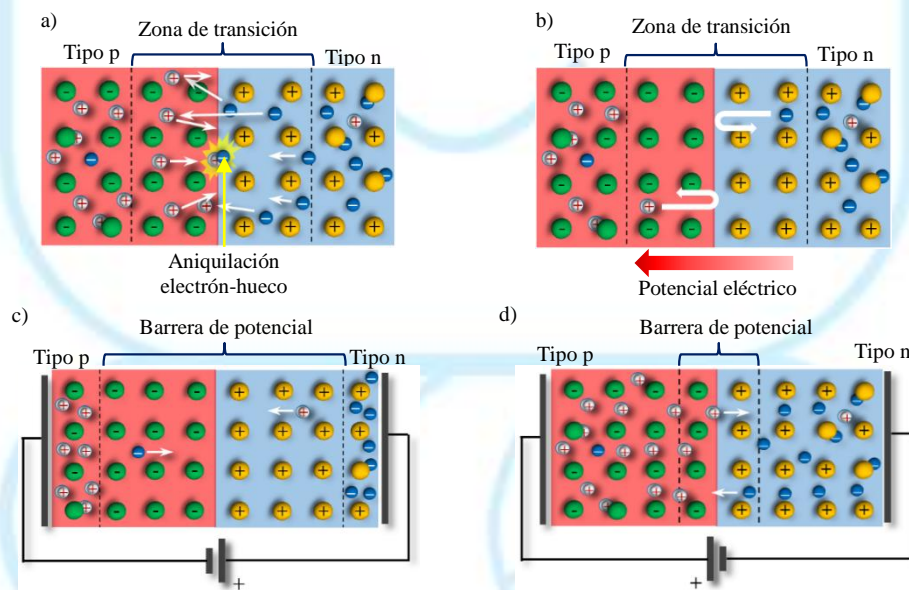


Figura 7. a) Proceso de difusión, los portadores más cerca de la unión p-n se aniquilan primero, comenzando a generar las áreas vacías de portadores, las cuales van creciendo. b) Los iones que permanecen en la zona de transición generan un potencial eléctrico que impide el flujo de los portadores mayoritarios. c) Aplicación de un potencial inverso, la barrera de potencial se hace mayor por lo que la probabilidad de un flujo de portadores mayoritarios decrece a valores cercanos a cero. d) La aplicación de un potencial a favor del flujo hace que la barrera de potencial disminuya, aumentando la probabilidad de flujo de los portadores mayoritarios.

Ahora, consideremos el caso en que la unión p-n es sometida al potencial externo de una batería como el mostrado en la Figura 7c, donde el semiconductor tipo n se conecta a la terminal positiva de la batería y el semiconductor tipo p a la terminal negativa (denominado *polarización inversa*), lo cual producirá que los portadores de carga negativos en el tipo n se alejen de la unión, en tanto que los portadores de carga positivos en el tipo p serán atraídos por la terminal negativa de la batería; siendo el efecto final un incremento en el tamaño de la barrera de potencial. Tal situación hará todavía más difícil, si no es que imposible, el flujo de portadores mayoritarios (los portadores minoritarios seguirán fluyendo ya que la polaridad de la batería los ayuda); sin embargo, se podrá considerar que en esta configuración la unión p-n actúa como un aislante.

Ahora consideremos el caso de la Figura 7d, donde el semiconductor tipo n se conecta a la terminal negativa de la batería y el tipo p a la positiva (*polarización directa*), lo cual producirá que los portadores de carga se acerquen a la unión, es decir, que la barrera de potencial disminuya su tamaño. Consecuentemente, la probabilidad de que los portadores de carga fluyan por la unión p-n se incrementa; si el potencial de la batería aumenta, eventualmente la barrera de potencial desaparecerá y los portadores fluirán libremente por la unión, en este caso la unión p-n actúa como un conductor.

4 EL FOTODIODO.

Como ejemplo, un fotodiodo es un dispositivo semiconductor que convierte luz en corriente eléctrica, gracias al efecto fotoeléctrico, y está conformado por una unión p-n. Dado que, de acuerdo con la teoría cuántica, la luz esta cuantizada en paquetes de energía denominados fotones, estos paquetes puede ser absorbidos por los electrones en los átomos, lo cual produce que se liberen de ellos. La energía de un fotón está relacionada con su frecuencia como $E_{fot} = \hbar\omega$, por lo que ciertos valores de frecuencias serán capaces de hacer que los electrones pasen de la banda de valencia a la banda de conducción [2].

Cuando un fotón, con una energía mayor que la energía requerida por un electrón para cruzar la barrera de potencial, incide en el área vacía de portadores de una unión p-n bajo polarización inversa (Figura 8a), el fotón podrá ser absorbido por algún par electrón-hueco combinado que se encuentre en dicha zona, produciendo su separación. Dado que la energía del fotón absorbido era mayor que la energía requerida para cruzar la barrera, tanto el electrón como el hueco terminarán con energía suficiente para salir de la zona vacía de portadores y ser atraídos por la polaridad de la batería, generando un flujo de carga en el circuito. Por cada fotón con suficiente energía que llegue y sea absorbido en la unión, se generará un par electrón-hueco que cruzará la barrera de potencial contribuyendo al flujo de carga (corriente). Si en el circuito se coloca un resistor en serie con el fotodiodo y la batería (Figura 8b), dicha corriente producirá un voltaje medible en la resistencia el cual podrá ser medido con instrumentos convencionales. Cabe señalar que, para mantener la condición de

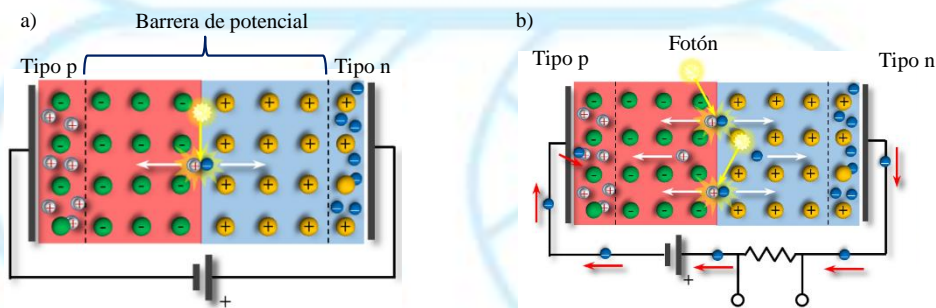


Figura 8. a) Cuando un fotón con energía suficiente incide en la unión, genera un par electrón-hueco. Cada uno se moverá hacia los polos correspondientes de la batería produciendo una corriente. b) La corriente generada por los pares electrón-hueco puede ser medida con ayuda de una resistencia.

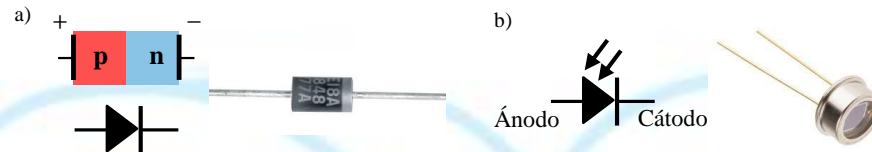


Figura 9. Imágenes y representaciones esquemáticas de: a) un diodo (unión p-n), y b) un foto-diodo.

equilibrio en la unión p-n, el electrón liberado fluirá a través del circuito hasta llegar al semiconductor tipo p y recombinarse nuevamente con algún hueco.

Como puede observarse, la corriente producida por el flujo de electrones será proporcional al número de fotones que llegan a la unión, es decir, depende del flujo de fotones que llega al fotodiodo (irradiancia)^[3].

Finalmente, la representación electrónica de un diodo o unión p-n es como la mostrada en la Figura 9a, mientras que la del foto-diodo es la mostrada en la Figura 9b.

5 REFERENCIAS.

- [1] Gronner, Alfred D. “*Análisis de circuitos transistorizados*”, Fondo Educativo Interamericano. 1974.
- [2] T. L. Floyd. *Electronics fundamentals*, 6th ed. Pearson-Prentice-Hall. 2004.
- [3] McCluney, William R. “*Introduction to Radiometry and Photometry*”, Artech House. 1994.