

1-1 ESTRUCTURA ATÓMICA

Toda la materia está compuesta por átomos, y todos los átomos se componen de electrones, protones y neutrones. En esta sección aprenderá sobre la estructura del átomo, las órbitas y capas de los electrones, los electrones de valencia, los iones y dos materiales semiconductores: el silicio y el germanio. La configuración de ciertos electrones en un átomo es el factor clave para determinar cómo un material dado conduce corriente eléctrica.

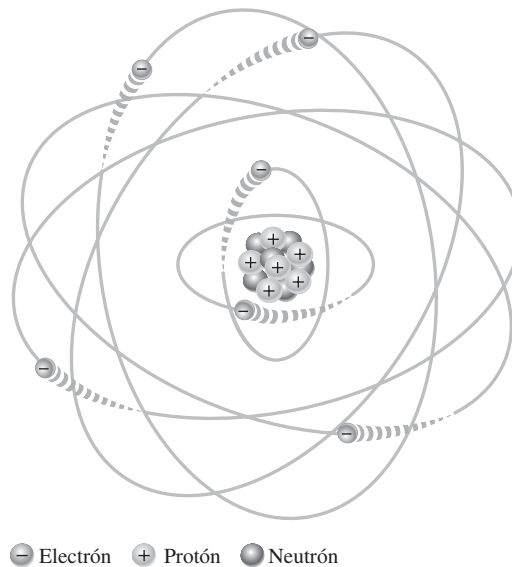
Después de completar esta sección, usted deberá ser capaz de

- ♦ **Describir la estructura básica de los átomos**
 - ♦ Definir *núcleo*, *protón*, *neutrón* y *electrón*
 - ♦ Describir el número atómico de un elemento
 - ♦ Explicar las capas de electrones
 - ♦ Describir un electrón de valencia
 - ♦ Describir la ionización
 - ♦ Describir un electrón libre

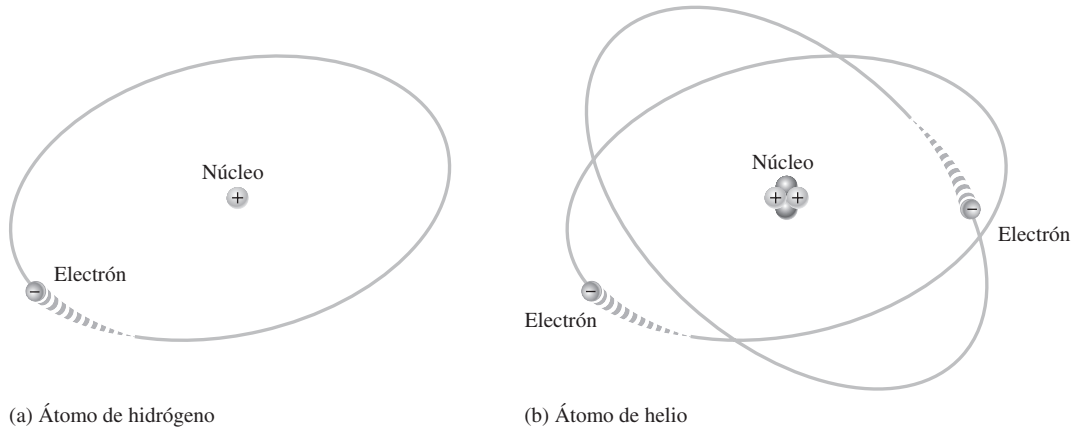
Un **átomo*** es la partícula más pequeña de un elemento que retiene las características de éste. Cada uno de los 109 elementos conocidos tiene átomos que son diferentes de los de todos los demás elementos; es decir, cada elemento presenta una estructura atómica única. De acuerdo con el modelo de Bohr, los átomos tienen una estructura de tipo planetario que consta de un núcleo central rodeado por electrones que describen órbitas, como ilustra la figura 1-1. El **núcleo** se compone de partículas cargadas positivamente llamadas **protones** y partículas sin carga llamadas **neutrones**. Las partículas básicas de carga negativa se llaman **electrones**.

► FIGURA 1-1

Modelo de Bohr que muestra electrones en órbitas alrededor del núcleo, el cual se compone de protones y neutrones. Las "colas" en los electrones indican movimiento.



Cada tipo de átomo tiene un cierto número de electrones y protones que los distinguen de los átomos de todos los demás elementos. Por ejemplo, el átomo más simple es el de hidrógeno y tiene un protón y un electrón, como muestra la figura 1-2(a). El átomo de helio, que ilustra la figura 1-2(b), tiene dos protones y dos neutrones en el núcleo y dos electrones en órbita alrededor del núcleo.



▲ FIGURA 1-2

Dos átomos simples: hidrógeno y helio.

Número atómico

Todos los elementos están dispuestos en la tabla periódica de acuerdo con su número atómico. El **número atómico** es igual al número de protones en el núcleo, el cual es igual al número de electrones en un átomo eléctricamente balanceado (neutro). Por ejemplo, el número atómico del hidrógeno es 1 y el del helio es 2. En su estado normal (o neutro), todos los átomos de un elemento dado tienen el mismo número de electrones que protones: las cargas positivas cancelan las negativas y la carga neta del átomo es cero.

Capas y órbitas de los electrones

Los electrones giran alrededor del núcleo de un átomo a ciertas distancias de él. Los electrones cercanos al núcleo tienen menos energía que aquellos que describen órbitas más distantes. Sólo existen valores discretos (separados y distintos) de energías del electrón dentro de las estructuras atómicas. Por consiguiente, los electrones deben describir órbitas a distancias discretas del núcleo.

Niveles de energía Cada distancia discreta (**órbita**) al núcleo corresponde a cierto nivel de energía. En un átomo, las órbitas se agrupan en bandas de energía conocidas como **capas**. Un átomo dado tiene un número fijo de capas. Cada capa tiene un número fijo máximo de electrones a niveles de energía permisibles. Las diferencias de los niveles de energía en una capa son mucho más pequeñas que las diferencias de energía entre capas. Las capas se designan 1, 2, 3 y así sucesivamente, y la 1 es la más cercana al núcleo. La figura 1-3 muestra este concepto de banda de energía: la primera capa tiene un nivel de energía y la segunda tiene dos niveles de energía. Pueden existir más capas en otros tipos de átomos, según el elemento.

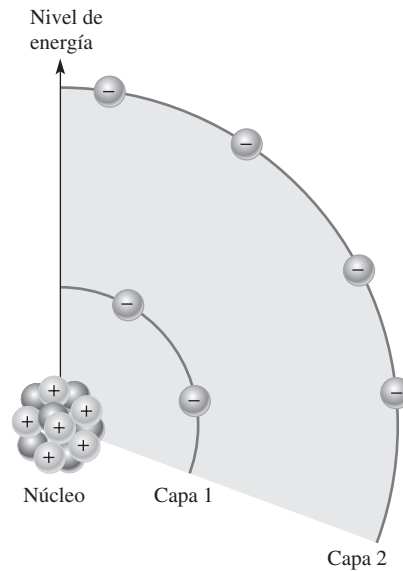
Número de electrones en cada capa El número máximo de electrones (N_e) que puede existir en cada capa de un átomo es un hecho de la naturaleza y se calcula con la fórmula

$$N_e = 2n^2$$

Ecuación 1-1

► FIGURA 1-3

La energía se incrementa a medida que se incrementa la distancia al núcleo.



donde n es el número de la capa. La capa más interna es la número 1, la siguiente es la número 2 y así sucesivamente. El número máximo de electrones que puede existir en la capa más interna (capa 1) es

$$N_e = 2n^2 = 2(1)^2 = 2$$

El número máximo de electrones que puede existir en la segunda capa es

$$N_e = 2n^2 = 2(2)^2 = 2(4) = 8$$

El número máximo de electrones que puede existir en la tercera capa es

$$N_e = 2n^2 = 2(3)^2 = 2(9) = 18$$

El número máximo de electrones que puede existir en la cuarta capa es

$$N_e = 2n^2 = 2(4)^2 = 2(16) = 32$$

Electrones de valencia

Los electrones que describen órbitas alejadas del núcleo tienen más energía y están flojamente enlazados al átomo que aquellos más cercanos al núcleo. Esto se debe a que la fuerza de atracción entre el núcleo cargado positivamente y el electrón cargado negativamente disminuye con la distancia al núcleo. En la capa más externa de un átomo existen electrones con un alto nivel de energía y están relativamente enlazados al núcleo. Esta capa más externa se conoce como la capa de **valencia** y los electrones presentes en esta capa se llaman *electrones de valencia*. Estos electrones de valencia contribuyen a las reacciones químicas y al enlace dentro de la estructura de un material y determinan sus propiedades eléctricas.

Ionización

Cuando un átomo absorbe energía de una fuente calorífica o luminosa, por ejemplo, las energías de los electrones se elevan. Los electrones de valencia poseen más energía y están ligeramente enlazados al átomo que los electrones internos, así que pueden saltar con facilidad a órbitas más altas dentro de la capa de valencia cuando el átomo absorbe energía externa.

Si un átomo de valencia adquiere una cantidad suficiente de energía puede escapar con facilidad de la capa externa y la influencia del átomo. La partida de un electrón de valencia deja a un átomo previamente neutro con un exceso de carga positiva (más protones que electrones). El proceso de perder un electrón de valencia se conoce como **ionización** y el átomo cargado positivamente resultante se conoce como *ion positivo*.

Por ejemplo, el símbolo químico del hidrógeno es H. Cuando un átomo de hidrógeno neutro pierde su electrón de valencia y se transforma en un ion positivo, se designa H^+ . El electrón de valencia escapado se llama **electrón libre**.

Para algunos materiales no metálicos tales como el cloro, un electrón libre puede ser capturado por el átomo neutro y se forma un ion negativo. En el caso del cloro, el ion es más estable que el átomo neutro porque su capa externa está completa. El ion de cloro se designa Cl^- .

REPASO DE LA SECCIÓN 1-1

1-2 AISLANTES, CONDUCTORES Y SEMICONDUCTORES

En función de sus propiedades eléctricas, los materiales se clasifican en tres grupos: conductores, semiconductores y aislantes. Cuando los átomos se combinan para formar un material sólido cristalino, se acomodan en una configuración simétrica. Los átomos dentro de la estructura cristalina se mantienen juntos gracias a los enlaces covalentes, que son creados por la interacción de los electrones de valencia de los átomos. El silicio es un material cristalino.

Al terminar esta sección, usted será capaz de:

- ♦ **Describir los aislantes, conductores y semiconductores, y definir en qué difieren esencialmente**
 - ♦ Definir la parte central de un átomo
 - ♦ Describir la estructura atómica del cobre, silicio, germanio y carbón
 - ♦ Nombrar los cuatro mejores conductores
 - ♦ Nombrar cuatro semiconductores
 - ♦ Describir las diferencias entre conductores y semiconductores
 - ♦ Describir la diferencia entre semiconductores de silicio y de germanio
 - ♦ Describir el enlace covalente en el silicio

Todos los materiales están compuestos por átomos; éstos contribuyen a las propiedades eléctricas de un material, incluida su capacidad de conducir corriente eléctrica.

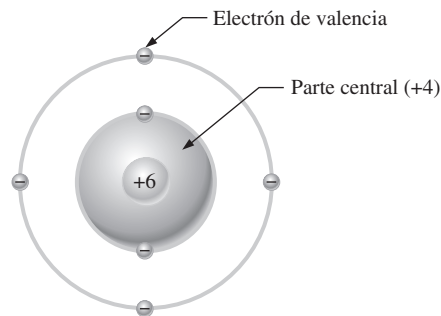
Para propósitos de análisis de las propiedades eléctricas, un átomo se puede representar por la capa de valencia y una **parte central** compuesta de todas las capas internas y el núcleo. La figura 1-4 ilustra este concepto usando un átomo de carbón (el carbón se utiliza en algunos tipos de resistores eléctricos). Observe que el átomo de carbón tiene cuatro electrones en la capa de valencia y dos en la capa interna. El núcleo está compuesto por seis protones y seis neutrones, por lo que +6 indica la carga positiva de los seis protones. La parte central tiene una carga neta de +4 (+6 para el núcleo y -2 para los dos electrones de capa interna).

Aislantes

Un **aislante** es un material que no conduce corriente eléctrica en condiciones normales. La mayoría de los buenos aislantes son materiales compuestos, es decir, no formados por sólo un ele-

► FIGURA 1-4

Diagrama de un átomo de carbón.



mento. Los electrones de valencia están estrechamente enlazados a los átomos; por consiguiente, en un aislante hay muy pocos electrones libres. Algunos ejemplos de aislantes son el hule, el plástico, el vidrio, la mica y el cuarzo.

Conductores

Un **conductor** es un material que conduce corriente eléctrica fácilmente. La mayoría de los metales son buenos conductores. Los mejores conductores son materiales de sólo un elemento, tales como cobre, plata, oro y aluminio, que están caracterizados por átomos con sólo un electrón de valencia muy flojamente enlazado al átomo. Estos electrones de valencia flojamente enlazados se convierten en electrones libres. Por consiguiente, en un material conductor, los electrones libres son electrones de valencia.

Semiconductores

Un **semiconductor** es un material a medio camino entre los conductores y los aislantes, en lo que a su capacidad de conducir corriente eléctrica respecta. Un semiconductor en estado puro (intrínseco) no es ni buen conductor ni buen aislante. Los semiconductores más comunes de sólo un elemento son el **silicio**, el **germanio** y el **carbón**. Los semiconductores compuestos, tales como el arseniuro de galio y el fosforo de indio, también son de uso común. Los semiconductores de un solo elemento están caracterizados por átomos con cuatro electrones de valencia.

NOTA TÉCNICA

Después del silicio, el segundo material semiconductor más común es el arseniuro de galio. Éste es un compuesto cristalino, no un elemento; sus propiedades pueden ser controladas variando la cantidad relativa de galio y arsénico. El GaAs tiene la ventaja de producir dispositivos semiconductores que responden muy rápido a las señales eléctricas. Esto lo hace ser mejor que el silicio para aplicaciones como amplificación de señales de alta frecuencia (1 GHz a 10 GHz) transmitidas por satélites de TV, por ejemplo. La desventaja principal del GaAs es que es más difícil de fabricar y los productos químicos implicados con frecuencia son bastante venenosos.

Bandas de energía

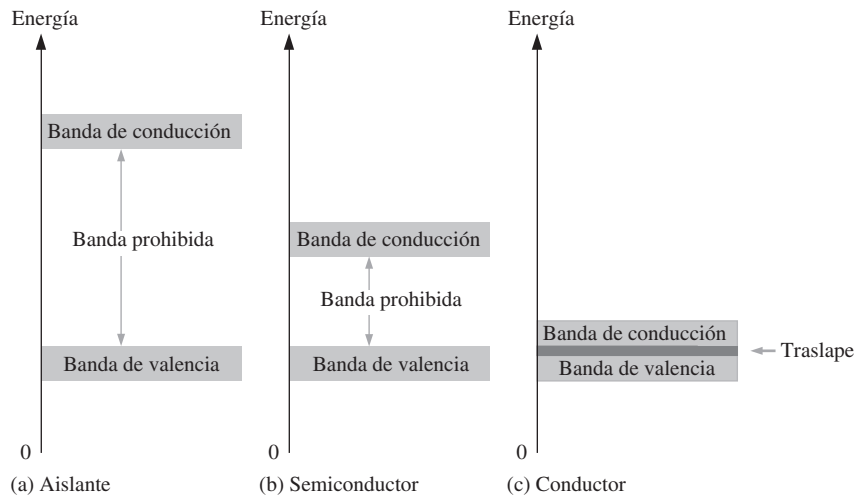
Recuerde que la capa de valencia de un átomo representa una banda de niveles de energía y que los electrones de valencia están confinados a dicha banda. Cuando un electrón adquiere suficiente energía adicional puede abandonar la capa de valencia, convertirse en un *electrón libre* y existir en lo que se conoce como *banda de conducción*.

La diferencia de energía entre la banda de valencia y la banda de conducción se llama *banda prohibida*. Ésta es la cantidad de energía que un electrón de valencia debe tener para saltar de la banda de valencia a la de conducción. Una vez en la banda de conducción, el electrón es libre de moverse por todo el material y no queda enlazado a ningún átomo dado.

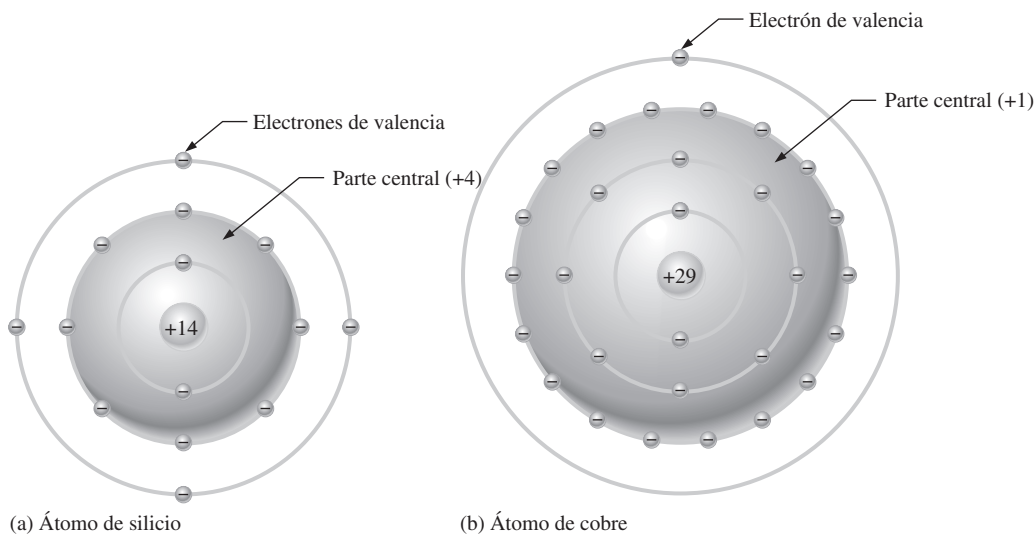
La figura 1-5 muestra diagramas de energía de aislantes, semiconductores y conductores: la parte (a) muestra que los aislantes tienen una banda prohibida muy ancha. Los electrones de valencia no saltan a la banda de conducción excepto en condiciones de ruptura en las que se aplican voltajes extremadamente altos a través del material. La parte (b) ilustra cómo los semiconductores tienen una banda prohibida mucho más angosta, la cual permite que algunos átomos de valencia salten a la banda de conducción y se conviertan en electrones libres. En contraste, como la parte (c) lo muestra, las bandas de energía en conductores se traslapan. En un material conductor metálico siempre existe un mayor número de electrones de valencia que electrones libres.

Comparación de un átomo semiconductor con un átomo conductor

El silicio es un semiconductor y el cobre es un conductor. La figura 1-6 muestra diagramas del átomo de silicio y del átomo de cobre. Observe que la parte central del átomo de silicio tiene una carga neta de +4 (14 protones – 10 electrones) y la parte central del átomo de cobre tiene una carga neta de +1 (29 protones – 28 electrones). La parte central incluye todo, excepto los electrones de valencia.



◀ FIGURA 1-5
Diagramas de energía para los tres tipos de materiales.



◀ FIGURA 1-6
Diagramas de los átomos de silicio y cobre.

El electrón de valencia del átomo de cobre “siente” una fuerza de atracción de +1, en comparación con un electrón de valencia del átomo de silicio, que “siente” una fuerza de atracción de +4. Por consiguiente, existe más fuerza que trata de retener un electrón de valencia en el átomo de silicio que en el de cobre. El electrón de valencia del cobre se encuentra en la cuarta capa, que está a mayor distancia de su núcleo que el electrón de valencia del silicio, residente en la tercera capa. Recuerde que los electrones más alejados del núcleo tienen más energía: el electrón de valencia del cobre tiene más energía que el electrón de valencia del silicio. Esto significa que es más fácil que los electrones de valencia del cobre adquieran suficiente energía adicional para escapar de sus átomos y convertirse en electrones libres que los del silicio. En realidad, un gran número de electrones de valencia en cobre ya tienen suficiente energía como para convertirse en electrones libres a temperatura ambiente normal.

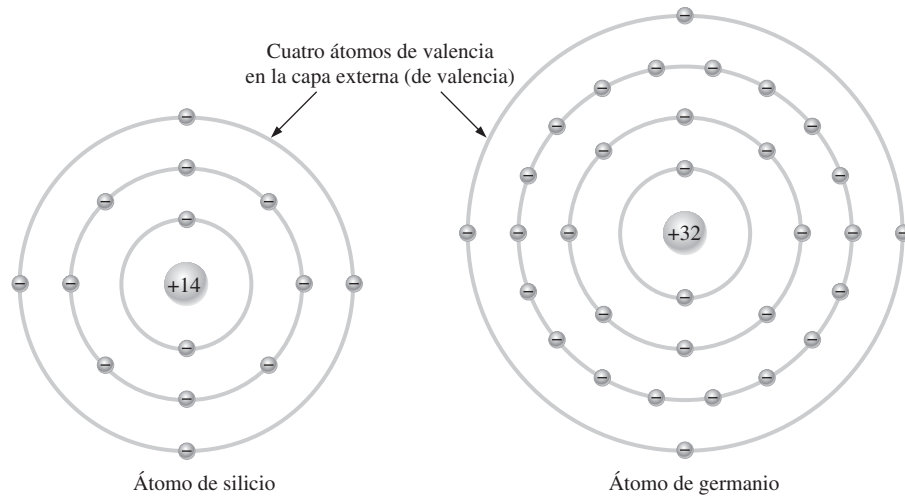
Silicio y germanio

La figura 1-7 permite comparar las estructuras atómicas del silicio y el germanio. El **silicio** es, por mucho, el material más utilizado en diodos, transistores, circuitos integrados y otros dispositivos semiconductores. Observe que tanto el silicio como el germanio tienen los cuatro electrones de valencia característicos.

Los electrones de valencia del germanio residen en la cuarta capa, mientras que los del silicio están en la tercera, más cerca al núcleo. Esto significa que los electrones de valencia del germanio

► FIGURA 1-7

Diagramas de átomos de silicio y germanio.



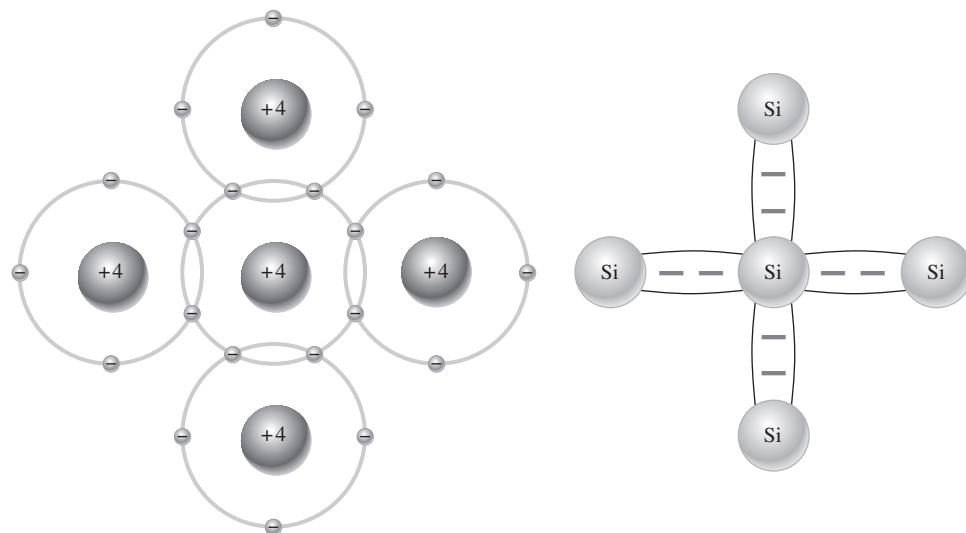
se encuentran a niveles de energía más altos que aquellos en el silicio y, por consiguiente, requieren una cantidad de energía adicional más pequeña para escaparse del átomo. Esta propiedad hace que el germanio sea más inestable a altas temperaturas, lo que produce una excesiva corriente en inversa. Por eso el silicio es un material semiconductor más utilizado.

Enlaces covalentes

La figura 1-8 muestra cómo cada átomo de silicio se sitúa con cuatro átomos de silicio adyacentes para formar un **crystal** de silicio. Un átomo de silicio (Si), con sus cuatro electrones de valencia, comparte un electrón con cada uno de sus cuatro vecinos. Esto crea efectivamente ocho electrones de valencia compartidos por cada átomo y produce un estado de estabilidad química. Además, compartir electrones de valencia produce enlaces **covalentes** que mantienen a los átomos juntos; cada electrón de valencia es atraído igualmente por los dos átomos adyacentes que lo comparten. La figura 1-9 muestra el enlace covalente de un cristal de silicio intrínseco. Un cristal **intrínseco** es uno que no tiene impurezas. El enlace covalente en el germanio es similar porque también tiene cuatro electrones de valencia.

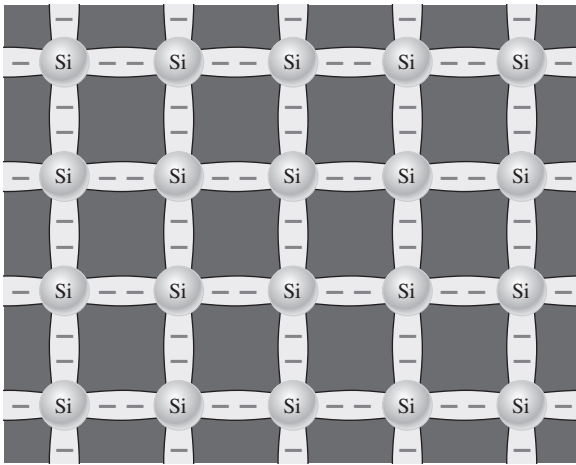
► FIGURA 1-8

Ilustración de enlaces covalentes de silicio.



(a) El átomo de silicio central comparte un electrón con cada uno de los cuatro átomos de silicio circundantes, con lo que se crea un enlace covalente con cada uno. Los átomos circundantes están a su vez enlazados con los otros átomos, y así sucesivamente.

(b) Diagrama de enlaces. Los signos negativos (en gris) representan los electrones de valencia compartidos.



◀ FIGURA 1-9

Enlaces covalentes en un cristal de silicio.

REPASO DE LA SECCION 1-2

1-3 CORRIENTE EN SEMICONDUCTORES

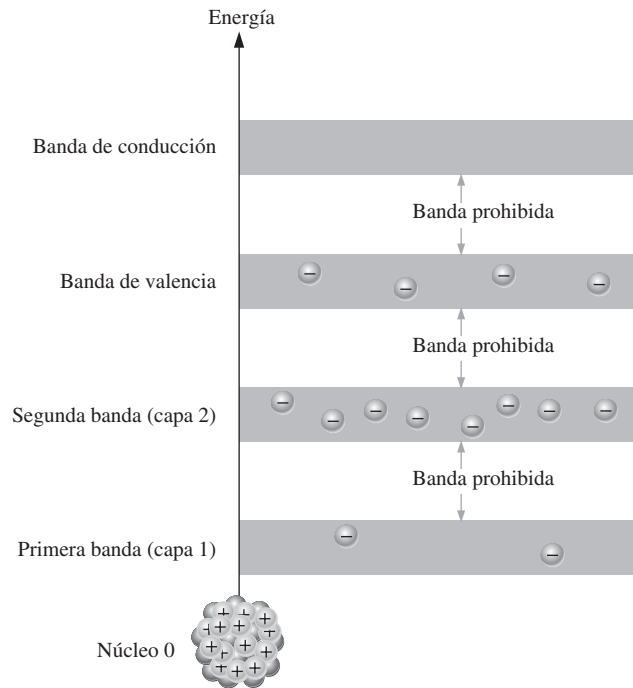
La forma en que un material conduce corriente eléctrica es importante para entender cómo funcionan los dispositivos electrónicos. En realidad no se puede entender la operación de un dispositivo tal como un diodo o transistor sin saber algo sobre corriente.

Al terminar esta sección, usted será capaz de:

- ♦ **Describir cómo se produce corriente en un semiconductor**
 - ♦ Describir un electrón de conducción
 - ♦ Definir *hueco*
 - ♦ Explicar qué es un par electrón-hueco
 - ♦ Describir la recombinación
 - ♦ Explicar la diferencia entre corriente de electrón y corriente de hueco

Como aprendió anteriormente, los electrones de un átomo pueden existir sólo dentro de bandas de energía prescritas. Cada capa alrededor del núcleo corresponde a cierta banda de energía y está separada de bandas adyacentes por bandas prohibidas, en las cuales no pueden existir electrones. La figura 1-10 muestra el diagrama de bandas de energía de un átomo no excitado (sin energía externa tal como calor) en un cristal de silicio puro. Esta condición ocurre *sólo* a una temperatura del 0 absoluto en Kelvin.

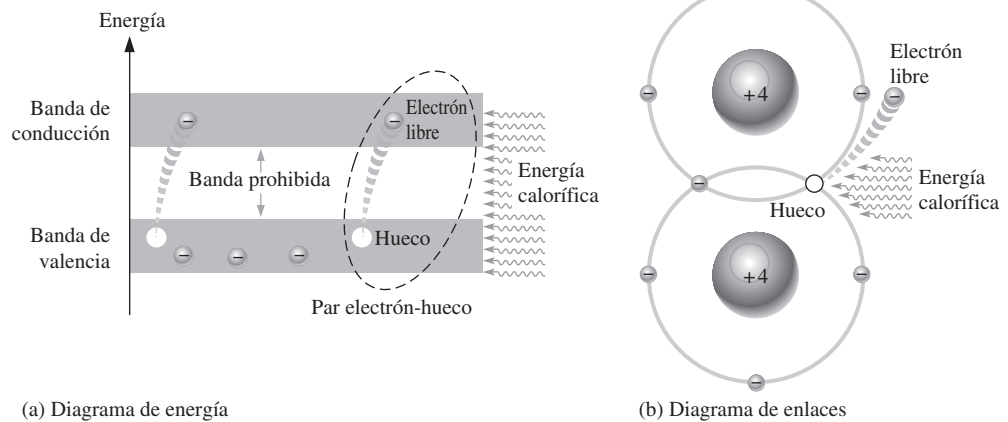
► FIGURA 1-10
 Diagrama de bandas de energía de un átomo excitado en un cristal de silicio puro (intrínseco). En la banda de conducción no hay electrones.



Electrones de conducción y huecos

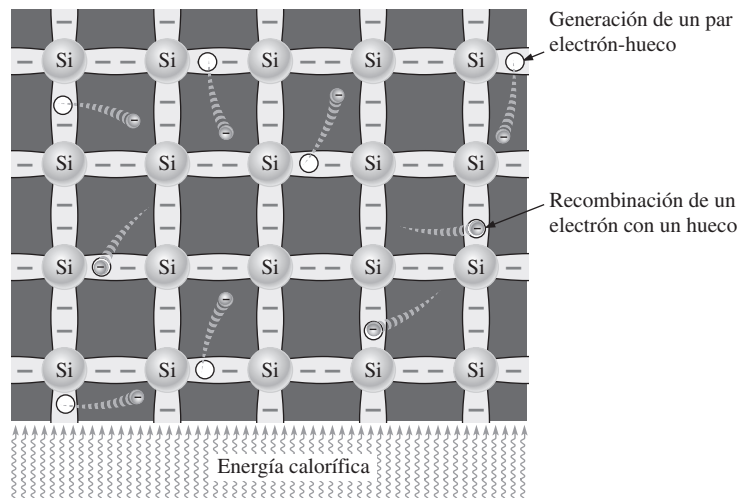
Un cristal de silicio intrínseco (puro) a temperatura ambiente tiene energía calorífica (térmica) suficiente para que algunos electrones de valencia salten la banda prohibida desde la banda de valencia hasta la banda de conducción, convirtiéndose así en electrones libres, que también se conocen como **electrones de conducción**. Esto se ilustra en el diagrama de energía de la figura 1-11(a) y el diagrama de enlaces de la figura 1-11(b).

► FIGURA 1-11
 Creación de pares electrón-hueco en un cristal de silicio. Los electrones en la banda de conducción son electrones libres.



Cuando un electrón salta a la banda de conducción, deja un espacio vacío en la banda de valencia dentro del cristal. Este espacio vacío se llama **hueco**. Por cada electrón elevado a la banda de conducción por medio de energía externa queda un hueco en la banda de valencia y se crea lo que se conoce como **par electrón-hueco**; ocurre una **recombinación** cuando un electrón de banda de conducción pierde energía y regresa a un hueco en la banda de valencia.

Resumiendo, un trozo de silicio intrínseco a temperatura ambiente tiene, en cualquier instante, varios electrones de banda de conducción (libres) que no están enlazados a ningún átomo y en esencia andan a la deriva por todo el material. También existe un número igual de huecos en la banda de valencia que se crean cuando estos electrones saltan a la banda de conducción (vea la figura 1-12).

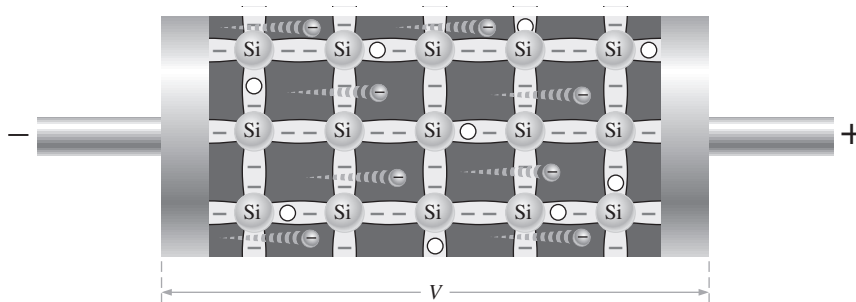


◀ FIGURA 1-12

Pares electrón-hueco en un cristal de silicio. Continuamente se generan electrones libres mientras que algunos se recombinan con huecos.

Corriente de electrón y hueco

Cuando se aplica voltaje a través de un trozo de silicio intrínseco, como muestra la figura 1-13, los electrones libres generados térmicamente presentes en la banda de conducción (que se mueven libremente y al azar en la estructura cristalina) son entonces fácilmente atraídos hacia el extremo positivo. Este movimiento de electrones es un tipo de **corriente** en un material semiconductor y se llama *corriente de electrón*.



◀ FIGURA 1-13

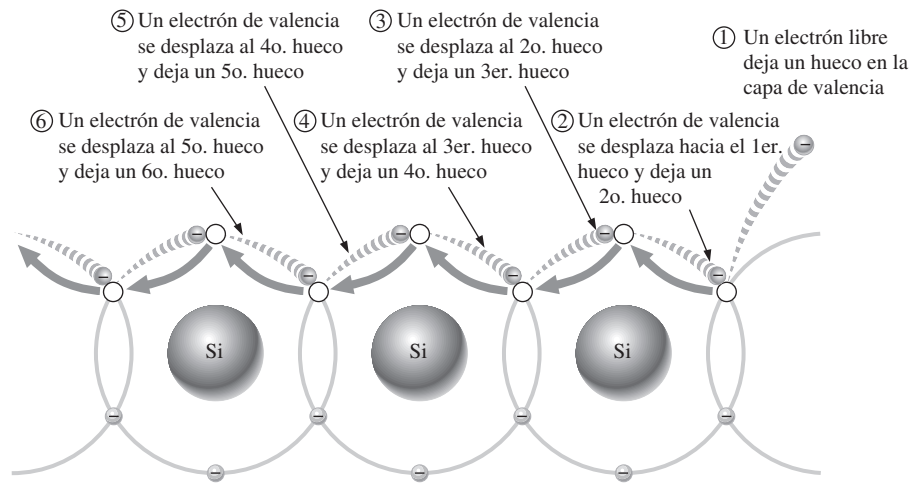
La corriente de electrones en silicio intrínseco se produce por el movimiento de electrones libres generados térmicamente.

Otro tipo de corriente ocurre en la banda de valencia, donde existen los huecos creados por los electrones libres. Los electrones que permanecen en la banda de valencia siguen estando unidos a sus átomos y no pueden moverse al azar en la estructura cristalina como lo hacen los electrones libres. No obstante, un electrón de valencia puede moverse a un hueco cercano con poco cambio en su nivel de energía y por lo tanto deja otro hueco en el lugar de donde vino: el hueco se habrá movido entonces de un lugar a otro en la estructura cristalina, como se puede ver en la figura 1-14. Aun cuando la corriente en la banda de valencia es producida por electrones de valencia, se llama *corriente de hueco* para distinguirla de la corriente de electrón en la banda de conducción.

Como ya se ha visto, se considera que la conducción en semiconductores es el movimiento de electrones libres en la banda de conducción o el movimiento de huecos en la banda de valencia, que en realidad es el movimiento de electrones de valencia a átomos cercanos con lo que se crea corriente de hueco en la dirección opuesta.

Es interesante contrastar los dos tipos de movimiento de carga en un semiconductor con el movimiento de carga en un conductor metálico, tal como el cobre. Los átomos de cobre forman un tipo de cristal diferente en el que los átomos no están enlazados covalentemente entre sí, sino que se componen de un “mar” de núcleos de iones positivos, los cuales son átomos sin sus electrones de valencia. Los electrones de valencia están enlazados a los iones positivos, lo que mantiene a los iones positivos juntos y les permite formar el enlace metálico. Los electrones de valencia no pertenecen a un átomo dado, sino al cristal en conjunto. Debido a que los electrones de valencia en el cobre se mueven libremente, la aplicación de un voltaje produce corriente. Existe sólo un tipo de corriente —el movimiento de electrones libres— porque no existen “huecos” en la estructura cristalina metálica.

► FIGURA 1-14
Corriente de huecos en silicio intrínseco.



Cuando un electrón de valencia se desplaza de izquierda a derecha mientras deja detrás un hueco, éste se ha movido efectivamente de derecha a izquierda. Las flechas gruesas indican el movimiento efectivo de un hueco.

REPASO DE LA
SECCIÓN 1-3