

# Semiconductores

## OBJETIVOS

*Después de estudiar este capítulo, debería ser capaz de:*

- Reconocer, a nivel atómico, las características de los conductores y de los semiconductores.
- Describir la estructura de un cristal de silicio.
- Conocer los dos tipos de portadores y las clases de impurezas que los convierten en mayoritarios.
- Explicar las condiciones que se cumplen en la unión *pn* de un diodo sin polarizar, de un diodo polarizado en inversa y de un diodo polarizado en directa.
- Comprender los dos tipos de corrientes de ruptura provocados por la aplicación de una tensión inversa excesiva sobre un diodo.

## VOCABULARIO

- |                                       |                           |                                   |
|---------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| • banda de conducción                 | • energía térmica         | • semiconductor de tipo- <i>n</i> |
| • barrera de potencial                | • hueco                   | • semiconductor de tipo- <i>p</i> |
| • corriente de pérdidas de superficie | • polarización directa    | • silicio                         |
| • diodo                               | • polarización inversa    | • temperatura ambiente            |
| • diodo de unión                      | • portadores mayoritarios | • temperatura de unión            |
| • dopaje                              | • portadores minoritarios | • tensión de ruptura              |
| • efecto avalancha                    | • recombinación           | • unión <i>pn</i>                 |
| • electrón libre                      | • semiconductor           | • zona de deplexión               |

Para comprender cómo funcionan los diodos, los transistores y los circuitos integrados es necesario estudiar los materiales semiconductores: componentes que no se comportan ni como conductores ni como aislantes. Los semiconductores poseen algunos electrones libres, pero lo que les confiere un carácter especial es la presencia de huecos. En este capítulo se aprenderán los conceptos relacionados con los semiconductores y sus propiedades más relevantes.

## 2-1. CONDUCTORES

El cobre es un buen conductor. La razón es evidente si se tiene en cuenta su estructura atómica, como se ve en la Figura 2-1. El núcleo o centro del átomo contiene 29 protones (cargas positivas). Cuando un átomo de cobre tiene una carga neutra, 29 electrones (cargas negativas) se disponen alrededor del núcleo. Los electrones viajan en distintas *orbitales* (también llamados *capas*). Hay 2 electrones en el primer orbital, 8 electrones en el segundo, 18 en el tercero y 1 en el orbital exterior.

### ☐ Orbitales estables

El núcleo atómico atrae a los electrones orbitales (Fig. 2-1). Éstos no caen hacia el núcleo debido a la fuerza centrífuga (hacia fuera) creada por su

movimiento orbital. Cuando un electrón se halla en un orbital estable, la fuerza centrífuga equilibra exactamente la atracción eléctrica ejercida por el núcleo. La idea es similar a un satélite en órbita alrededor de la tierra, que a la velocidad y altura adecuadas, puede permanecer en una orbital estable sobre la tierra.

Cuanto más lejana es la órbita de un electrón menor es la atracción del núcleo. Los electrones de los orbitales más alejados del centro se mueven a menor velocidad, produciendo menos fuerza centrífuga. El electrón más externo en la Figura 2-1 viaja muy lentamente y prácticamente no se siente atraído hacia el núcleo.

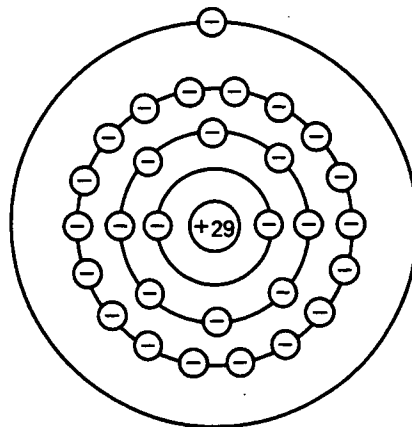
### □ La parte interna

En electrónica, lo único que importa es el orbital exterior, el cual también se denomina **orbital de valencia**. Es este orbital exterior el que determina las propiedades eléctricas del átomo. Para subrayar la importancia de dicho orbital de valencia, se define la parte interna de un átomo como el núcleo más todos los orbitales internos. Para un átomo de cobre, la parte interna es el núcleo (+29) y los tres primeros orbitales (-28).

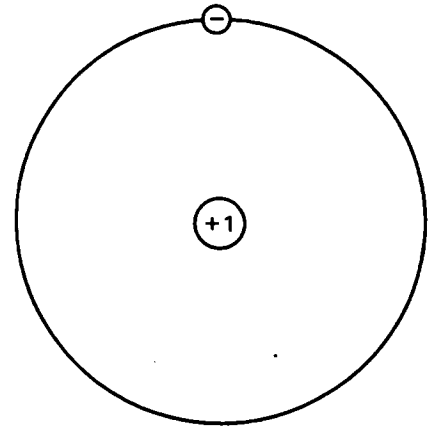
La parte interna de un átomo de cobre tiene una carga resultante de +1, porque tiene 29 protones y 28 electrones internos. La Figura 2-2 permite visualizar la parte interna y el orbital de valencia de un átomo. El electrón de valencia se encuentra en un orbital exterior alrededor de la parte interna y tiene una carga resultante de +1. A causa de ello, la atracción que sufre el electrón de valencia es muy pequeña.

### □ Electrón libre

Como el electrón de valencia es atraído muy débilmente por la parte interna del átomo, una fuerza externa puede arrancar fácilmente este electrón, al que se le conoce como *electrón libre*, y, por eso mismo, el cobre es un buen



**Figura 2-1.** Átomo de cobre.



**Figura 2-2.** Diagrama de la parte interna de un átomo de cobre.

conductor. Incluso la tensión más pequeña puede hacer que los electrones libres de un conductor se muevan de un átomo al siguiente. Los mejores conductores son la plata, el cobre y el oro. Todos tienen una parte interna como la que se representa en la Figura 2-2.

### EJEMPLO 2-1

Supongamos que una fuerza exterior arranca el electrón de valencia de la Figura 2-2 de un átomo de cobre. ¿Cuál es la carga resultante del átomo de cobre? ¿Y si un electrón exterior entra en la orbital de valencia de la Figura 2-2?

### SOLUCIÓN

Cuando el electrón de valencia se va, la carga resultante del átomo es de  $+1$ . Si un átomo neutro pierde uno o más electrones se convierte en un átomo cargado positivamente, que recibe el nombre de *ión positivo*.

Cuando un electrón exterior entra dentro del orbital de valencia de la Figura 2-2, la carga resultante del átomo es igual a  $-1$ . Si un átomo tiene un electrón extra en la orbital de valencia, llamamos al átomo cargado negativamente *ión negativo*.

## 2-2. SEMICONDUCTORES

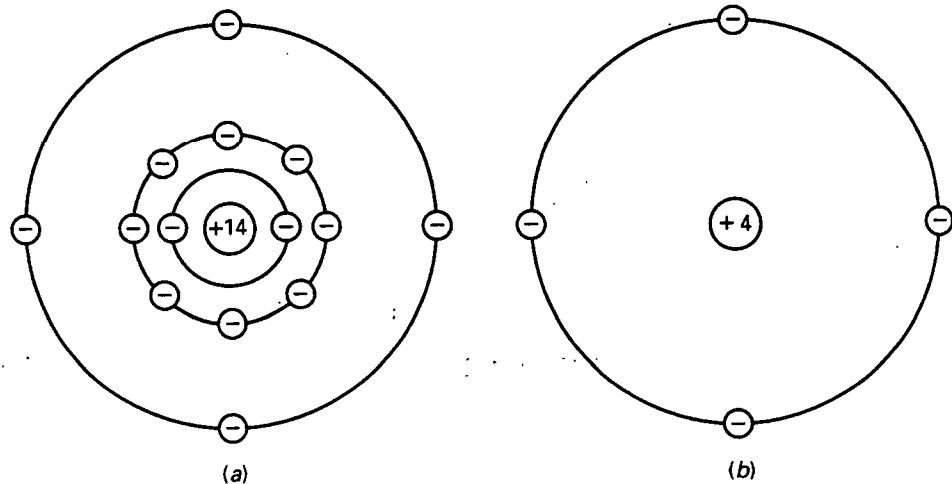
Los mejores conductores (plata, cobre y oro) tienen un electrón de valencia, mientras que los mejores aislantes poseen ocho electrones de valencia. Un *semiconductor* es un elemento con propiedades eléctricas entre las de un conductor y las de un aislante. Como cabría esperar, los mejores semiconductores tienen cuatro electrones de valencia.

### ❑ Germanio

El germanio es un ejemplo de semiconductor. Tiene cuatro electrones en su orbital de valencia. Hace unos años el germanio era el único material adecuado para la fabricación de dispositivos de semiconductores. Sin embargo, estos dispositivos de germanio tenían un grave inconveniente, que no pudo ser resuelto por los ingenieros: su excesiva corriente inversa (que se discutirá en una sección posterior). Más tarde, otro semiconductor, el *silicio*, se hizo más práctico dejando obsoleto al germanio en la mayoría de las aplicaciones electrónicas.

### ❑ Silicio

Después del oxígeno, el silicio es el elemento más abundante de la tierra. Sin embargo, existieron algunos problemas que impidieron su uso en los primeros días de los semiconductores. Una vez resueltos, las ventajas del



**Figura 2-3.** a) Átomo de silicio; b) diagrama de la parte interna.

silicio (discutidas posteriormente) lo convirtieron inmediatamente en el semiconductor a elegir. Sin él, la electrónica moderna, las comunicaciones y los ordenadores serían imposibles.

Un átomo de silicio aislado tiene 14 protones y 14 electrones. En la Figura 2-3a el primer orbital contiene 2 electrones y el segundo 8. Los 4 electrones restantes se encuentran en el orbital de valencia. En la Figura 2-3a, la parte interna tiene una carga resultante de +4 porque contiene 14 protones en el núcleo y 10 electrones en los dos primeros orbitales.

La Figura 2-3b muestra la parte interna de un átomo de silicio. Los 4 electrones de valencia nos indican que el silicio es un semiconductor.

### EJEMPLO 2-2

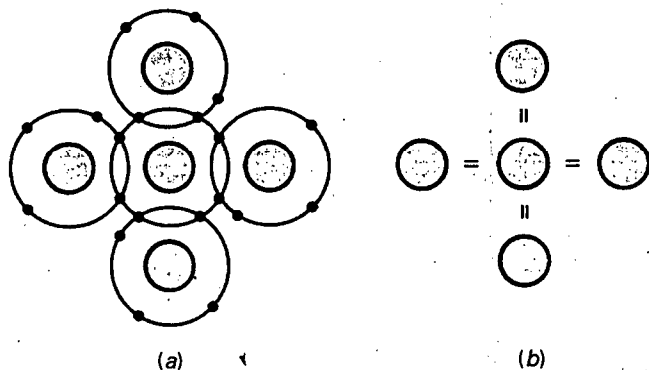
¿Cuál es la carga resultante del átomo de silicio de la Figura 2-3b si pierde uno de sus electrones de valencia? ¿Y si gana un electrón extra en el orbital de valencia?

### SOLUCIÓN

Si pierde un electrón de valencia, se convierte en un ión positivo con carga +1. Si el átomo de silicio gana un electrón de valencia extra, se transforma en un ión negativo, con una carga -1.

## 2-3. CRISTALES DE SILICIO

Cuando los átomos de silicio se combinan para formar un sólido, lo hacen en una estructura ordenada llamada *crystal*. Cada átomo de silicio comparte sus electrones de valencia con los átomos de silicio vecinos, de tal manera que tiene 8 electrones en el orbital de valencia. Por ejemplo, la Figura 2-4a



**Figura 2-4.** a) Un átomo de un cristal tiene cuatro vecinos; b) enlaces covalentes.

muestra un átomo central con 4 vecinos. Los círculos sombreados representan los cinco núcleos de silicio. Aunque el átomo central tenía originalmente 4 electrones en su orbital de valencia, ahora posee 8.

### □ Enlaces covalentes

Cada átomo vecino comparte un electrón con el átomo central. De esta forma, el átomo central parece tener 4 electrones adicionales, sumando un total de 8 electrones en su orbital de valencia. En realidad, los electrones dejan de pertenecer a un solo átomo, ya que cada átomo central y sus vecinos comparten electrones. La misma idea es válida para todos los demás átomos de silicio. En resumen, cada átomo dentro de un cristal de silicio tiene cuatro vecinos.

En la Figura 2-4a, cada núcleo presenta una carga de +4. Obsérvese la parte interna central y la que está a su derecha. Estas dos partes mantienen el par de electrones entre ellas atrayéndolos con fuerzas iguales y opuestas. Este equilibrio entre las fuerzas es el que mantiene unidos a los átomos de silicio. La idea es similar a la del juego de tirar de la cuerda. Mientras los equipos tiren con fuerzas iguales y opuestas, permanecerán unidos.

Como cada uno de los electrones compartidos en la Figura 2-4a está siendo atraído en direcciones opuestas, el electrón constituye un enlace entre los núcleos opuestos. A este tipo de enlace químico se le da el nombre de *enlace covalente*. La Figura 2-4b es una forma simple de mostrar el concepto de enlaces covalentes. En un cristal de silicio hay miles de millones de átomos de silicio, cada uno con 8 electrones de valencia. Estos electrones de valencia son los enlaces covalentes que mantienen unido el cristal, dándole solidez.

### □ Saturación de valencia

Cada átomo en un cristal de silicio tiene 8 electrones en su orbital de valencia. Estos 8 electrones producen una estabilidad química que da como resultado un cuerpo compacto de material de silicio. Nadie está seguro por qué el

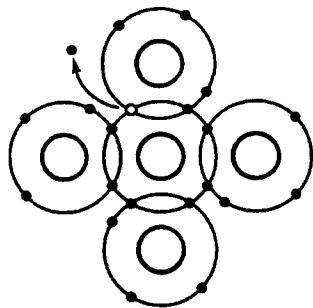
orbital exterior de todos los elementos tiene una predisposición a tener ocho electrones. Cuando no existen ocho electrones de forma natural en un elemento, éste tiende a combinarse y a compartir electrones con otros átomos para obtener ocho electrones en el orbital exterior.

Hay ecuaciones matemáticas complicadas que explican parcialmente por qué ocho electrones producen estabilidad química en diferentes materiales, pero no se sabe la razón intrínseca por la cual el número ocho es tan especial. Se trata de una ley experimental, como la ley de la gravedad, la de Coulomb y otras leyes que observamos pero que no podemos explicar completamente. Estableciéndolo como una ley tenemos:

$$\text{Saturación de valencia: } n = 8 \quad (2-1)$$

Dicho de otro modo, el orbital de valencia no puede soportar más de ocho electrones. Además, los ocho electrones de valencia se llaman **electrones ligados** por encontrarse fuertemente unidos a los átomos. Debido a estos electrones ligados, un cristal de silicio es casi un aislante perfecto a temperatura ambiente (aproximadamente 25 °C).

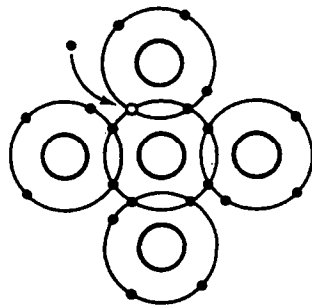
### □ El hueco



(a)

La temperatura ambiente es la temperatura del aire circundante. Cuando dicha temperatura es mayor que el cero absoluto (−273 °C), la energía térmica del aire circundante hace que los átomos en un cristal de silicio vibren dentro del cristal. Cuanto mayor sea la temperatura, más intensas serán las vibraciones mecánicas de estos átomos. Si se toca un objeto, el calor que transmite proviene de la vibración de los átomos.

Las vibraciones de los átomos de silicio pueden, ocasionalmente, hacer que se desligue un electrón del orbital de valencia. Cuando esto sucede, el electrón liberado gana la energía suficiente para situarse en un orbital de nivel energético mayor, como se muestra en la Figura 2-5a. En dicho orbital, el electrón es un electrón libre.



(b)

Pero eso no es todo. La salida del electrón deja un vacío, que se denomina hueco, en el orbital de valencia (Fig. 2-5a), y que se comporta como una carga positiva porque, como ya se ha visto, la pérdida de un electrón produce un ión positivo.

### □ Recombinación y tiempo de vida

En un cristal de silicio puro se crean igual número de electrones libres que de huecos debido a la energía térmica (calor). Los electrones libres se mueven de forma aleatoria a través del cristal. En ocasiones, un electrón libre se aproximará a un hueco, será atraído y caerá hacia él. Esta *unión de un electrón libre y de un hueco* se llama **recombinación** (Fig. 2-5b).

El tiempo que transcurre entre la creación y la desaparición de un electrón libre recibe el nombre de **tiempo de vida**, que varía desde unos cuantos nanosegundos a varios microsegundos, según la perfección del cristal y otros factores.

**Figura 2-5.** a) La energía térmica produce un electrón y un hueco;  
b) recombinación de un electrón libre y un hueco.

### ❑ Ideas principales

En todo instante, lo que está sucediendo dentro de un cristal de silicio se puede resumir en los siguientes puntos:

1. Se están creando electrones libres y huecos por la acción de la energía térmica.
2. Otros electrones libres y huecos se están recombinando.
3. Algunos electrones libres y huecos existen temporalmente esperando una recombinación.

#### EJEMPLO 2-3

Si un cristal puro de silicio tiene un millón de electrones libres, ¿cuántos huecos tiene? ¿Qué sucede con el número de electrones libres y huecos si aumenta la temperatura ambiente?

#### SOLUCIÓN

Observemos la Figura 2-5a. Cuando la energía térmica crea un electrón libre, al mismo tiempo crea automáticamente un hueco. Por tanto, un cristal puro de silicio siempre tiene el mismo número de huecos que de electrones libres. Si hay un millón de electrones libres, habrá un millón de huecos.

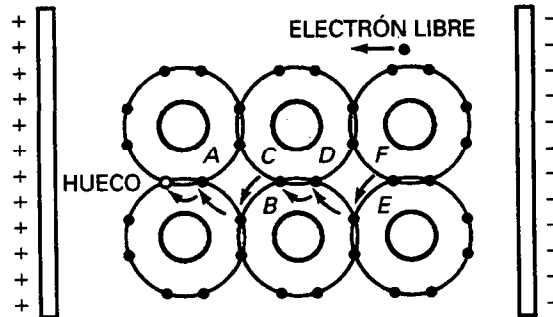
Una temperatura mayor aumenta las vibraciones a nivel atómico, lo cual supone la creación de más electrones libres y huecos. Pero independientemente de la temperatura, un cristal puro de silicio tiene la misma cantidad de electrones libres que de huecos.

## 2-4. SEMICONDUCTORES INTRÍNSECOS

Un **semiconductor intrínseco** es un *semiconductor puro*. Un cristal de silicio es un semiconductor intrínseco si cada átomo del cristal es un átomo de silicio. A temperatura ambiente, un cristal de silicio se comporta más o menos como un aislante, ya que tiene solamente unos cuantos electrones libres y sus huecos correspondientes producidos por la energía térmica que posee dicho cristal.

### ❑ Flujo de electrones libres

La Figura 2-6 muestra parte de un cristal de silicio situado entre dos placas metálicas cargadas. Supóngase que la energía térmica ha producido un electrón libre y un hueco. El electrón libre se halla en un orbital de mayor energía en el extremo derecho del cristal. Debido a que el electrón está cerca de la placa cargada negativamente, es repelido por ésta, de forma que se desplaza hacia la izquierda de un átomo a otro hasta que alcanza la placa positiva.



**Figura 2-6.** Flujo de un hueco a través de un semiconductor.

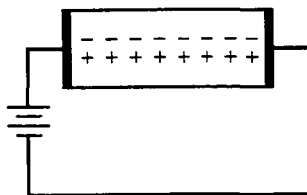
### ❑ Flujo de huecos

Obsérvese el hueco a la izquierda de la Figura 2-6. Este hueco atrae al electrón de valencia del punto A, lo que provoca que dicho electrón se desplace hacia el hueco.

Cuando el electrón de valencia en el punto A se mueve hacia la izquierda, crea un nuevo hueco en este punto. El efecto es el mismo que si el hueco original se desplazara hacia la derecha. El nuevo hueco en el punto A puede atraer y capturar otro electrón de valencia. De esta forma, los electrones de valencia pueden moverse a lo largo de la trayectoria indicada por las flechas. Esto quiere decir que el hueco lo hace en el sentido opuesto a lo largo de la trayectoria A-B-C-D-E-F, actuando de la misma forma que una carga positiva.

## 2-5. DOS TIPOS DE FLUJO

La Figura 2-7 muestra un semiconductor intrínseco. Tiene el mismo número de electrones libres que de huecos. Esto se debe a que la energía térmica produce los electrones libres y los huecos por pares. La tensión aplicada forzará a los electrones libres a circular hacia la izquierda y a los huecos hacia la derecha. Cuando los electrones libres llegan al extremo izquierdo del cristal, entran al conductor externo y circulan hacia el terminal positivo de la batería.



**Figura 2-7.** Un semiconductor intrínseco tiene el mismo número de electrones libres y huecos.

Por otra parte, los electrones libres en el terminal negativo de la batería circularán hacia el extremo derecho del cristal. En este punto, entran en el cristal y se recombinan con los huecos que llegan al extremo derecho del cristal. Así, se produce un flujo estable de electrones libres y huecos dentro del semiconductor. Nótese que no hay flujo de huecos por fuera del semiconductor.

En la Figura 2-7, los electrones libres y los huecos se mueven en direcciones opuestas. En lo sucesivo concebiremos la corriente en un semiconductor como el efecto combinado de los dos tipos de flujo: el de los electrones libres en una dirección y el de los huecos en la opuesta. Los electrones libres y los huecos reciben a menudo la denominación común de portadores debido a que transportan la carga eléctrica de un lugar a otro.



## 2-6. DOPAJE DE UN SEMICONDUCTOR

Una forma de aumentar la conductividad de un semiconductor es mediante el dopaje. El **dopaje** supone que, deliberadamente, *se añaden átomos de impurezas a un cristal intrínseco para modificar su conductividad eléctrica*. Un semiconductor dopado se llama **semiconductor extrínseco**.

### □ Aumento del número de electrones libres

¿Cuál es el proceso de dopaje de un cristal de silicio? El primer paso consiste en fundir un cristal puro de silicio para romper los enlaces covalentes y cambiar el estado del silicio de sólido a líquido. Con el fin de aumentar el número de electrones libres, se añaden átomos pentavalentes al silicio fundido. Los átomos pentavalentes tienen 5 electrones en el orbital de valencia. El arsénico, el antimonio y el fósforo son ejemplos de átomos pentavalentes. Como estos materiales donarán un electrón extra al cristal de silicio se les conoce como impurezas donadoras.

La Figura 2-8a representa cómo queda el cristal de silicio después de enfriarse y volver a formar su estructura de cristal sólido. En el centro se halla un átomo pentavalente rodeado por cuatro átomos de silicio. Como antes, los átomos vecinos comparten un electrón con el átomo central, pero en este caso queda un electrón adicional. Recuérdese que cada átomo pentavalente tiene 5 electrones de valencia. Como únicamente pueden situarse ocho electrones en la orbital de valencia, el electrón adicional queda en un orbital mayor. Por tanto, se trata de un electrón libre.

Cada átomo pentavalente, o donante en un cristal de silicio, produce un electrón libre. Un fabricante controla así la conductividad de un semiconductor dopado. Cuantas más impurezas se añadan, mayor será la conductividad. Así, un semiconductor se puede dopar ligera o fuertemente. Un semiconductor dopado ligeramente tiene una resistencia alta y uno fuertemente dopado tiene una resistencia pequeña.

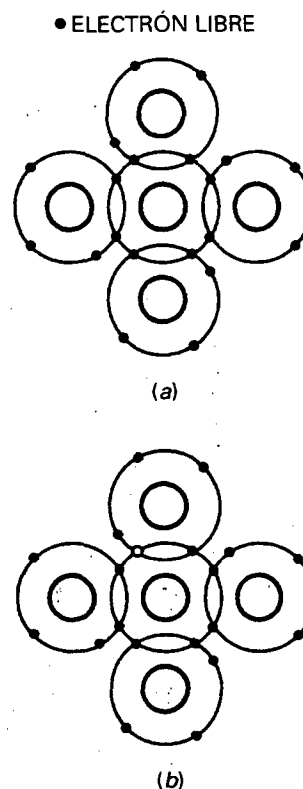
### □ Aumento del número de huecos

¿Cómo dopar un cristal de silicio para obtener un exceso de huecos? La respuesta es utilizando una impureza trivalente; es decir, una impureza cuyos átomos tengan sólo 3 electrones de valencia, como, por ejemplo, el aluminio, el boro o el galio.

La Figura 2-8b muestra un átomo trivalente en el centro. Está rodeado por cuatro átomos de silicio, cada uno compartiendo uno de sus electrones de valencia. Como el átomo trivalente tenía al principio sólo 3 electrones de valencia y comparte un electrón con cada uno de sus vecinos, hay sólo 7 electrones en el orbital de valencia. Esto significa que aparece un hueco en el orbital de valencia de cada átomo trivalente. Un átomo trivalente se denomina también *átomo aceptor*, porque cada uno de los huecos con que contribuye puede aceptar un electrón libre durante la recombinación.

### □ Puntos que hay que recordar

Para que un fabricante pueda dopar un semiconductor debe producirlo inicialmente como un cristal absolutamente puro. Controlando posteriormente la cantidad de impurezas, se pueden determinar con precisión las propieda-



**Figura 2-8.** a) Dopaje para obtener más electrones libres; b) dopaje para obtener más huecos.

des del semiconductor. Inicialmente resultaba más fácil producir cristales puros de germanio que de silicio. Por esta razón los primeros dispositivos semiconductores estaban hechos de germanio. Después mejoraron las técnicas de fabricación y se pudieron obtener cristales puros de silicio. Por las ventajas que tiene, el silicio se ha erigido como el material semiconductor más popular y útil.

### EJEMPLO 2-4

Un semiconductor dopado tiene 10.000 millones de átomos de silicio y 15 millones de átomos pentavalentes. Si la temperatura ambiente es de  $25^{\circ}\text{C}$ , ¿cuántos electrones libres y huecos hay dentro del semiconductor?

### SOLUCIÓN

Cada átomo pentavalente aporta un electrón libre. Por tanto, el semiconductor tiene 15 millones de electrones libres producidos por el dopado. Casi no habrá huecos, ya que los únicos huecos en el semiconductor son los producidos por excitación térmica.

## 2-7. DOS TIPOS DE SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS

Un semiconductor se puede dopar para que tenga un exceso de electrones libres o un exceso de huecos. Debido a ello existen dos tipos de semiconductores dopados.

### □ Semiconductor tipo $n$

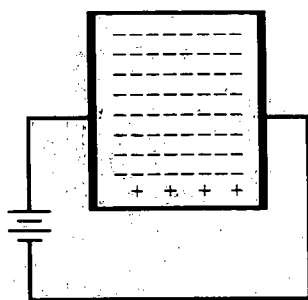
El silicio que ha sido dopado con una impureza pentavalente se llama semiconductor tipo  $n$ , donde  $n$  hace referencia a negativo. En la Figura 2-9 se muestra un semiconductor tipo  $n$ . Como los electrones superan a los huecos en un semiconductor tipo  $n$ , reciben el nombre de *portadores mayoritarios*, mientras que a los huecos se les denomina *portadores minoritarios*.

Al aplicarse una tensión, los electrones libres dentro del semiconductor se mueven hacia la izquierda y los huecos lo hacen hacia la derecha. Cuando un hueco llega al extremo derecho del cristal, uno de los electrones del circuito externo entra al semiconductor y se recombina con el hueco.

Los electrones libres mostrados en la Figura 2-9 circulan hacia el extremo izquierdo del cristal, donde entran al conductor para circular hacia el terminal positivo de la batería.

### □ Semiconductor tipo $p$

El silicio que ha sido dopado con impurezas trivalentes se llama semiconductor tipo  $p$ , donde  $p$  hace referencia a positivo. La Figura 2-10 representa un semiconductor tipo  $p$ . Como el número de huecos supera al número de

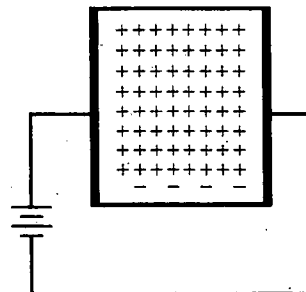


**Figura 2-9.** El semiconductor tipo  $n$  tiene muchos electrones libres.

electrones libres, los huecos son los portadores mayoritarios y los electrones libres son los minoritarios.

Al aplicarse una tensión, los electrones libres se mueven hacia la izquierda y los huecos lo hacen hacia la derecha. En la Figura 2-10, los huecos que llegan al extremo derecho del cristal se recombinan con los electrones libres del circuito externo.

En el diagrama de la Figura 2-10 hay también un flujo de portadores minoritarios. Los electrones libres dentro del semiconductor circulan de derecha a izquierda. Como hay muy pocos portadores minoritarios, su efecto es casi despreciable en este circuito.



**Figura 2-10.**  
El semiconductor tipo  $p$  tiene muchos huecos.

## 2-8. EL DIODO NO POLARIZADO

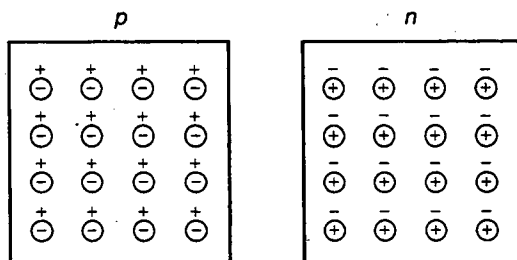
Por sí mismo, un cristal semiconductor tipo  $n$  tiene la misma utilidad que una resistencia de carbón; lo que también se puede decir de un semiconductor tipo  $p$ . Pero ocurre algo nuevo cuando un fabricante dopa un cristal de tal manera que una mitad sea tipo  $p$  y la otra mitad sea tipo  $n$ .

La separación o frontera física entre un semiconductor tipo  $n$  y uno tipo  $p$  se llama unión  $pn$ . La unión  $pn$  tiene propiedades tan útiles que ha propiciado toda clase de inventos, entre los que se encuentran los diodos, los transistores y los circuitos integrados. Comprender la unión  $pn$  permite entender toda clase de dispositivos fabricados con semiconductores.

### □ El diodo no polarizado

Como se ha expuesto en la sección anterior, cada átomo trivalente en un cristal de silicio produce un hueco. Por esta razón puede representarse un cristal de semiconductor tipo  $p$  como se aprecia en el lado izquierdo de la Figura 2-11. Cada signo menos (-) encerrado en un círculo representa un átomo trivalente y cada signo más (+) es un hueco en su orbital de valencia.

De manera similar, los átomos pentavalentes y los huecos en un semiconductor tipo  $n$  se pueden representar como se aprecia en el lado derecho de la Figura 2-11. Cada signo más encerrado en un círculo representa un átomo pentavalente y cada signo menos es el electrón libre con que contribuye al semiconductor. Obsérvese que cada cristal de material semiconductor es eléctricamente neutro porque el número de signos menos y más es igual.



**Figura 2-11.** Dos tipos de semiconductores.

Un fabricante puede producir un cristal de material tipo *p* en un lado y de tipo *n* en el otro lado, como se muestra en la Figura 2-12. La unión es la frontera donde se juntan las regiones tipo *n* y las de tipo *p*, por lo que esta estructura se llama también *diodo de unión* (la palabra diodo es una contracción de la expresión «dos electrodos»), donde *di* significa *dos*.

### □ La zona de deplexión

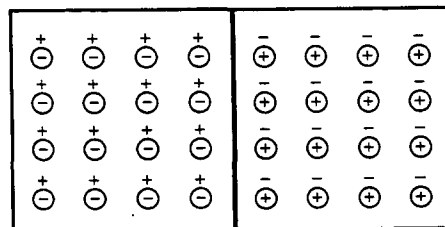
Debido a su repulsión mutua, los electrones libres en el lado *n* de la Figura 2-12 tienden a dispersarse en cualquier dirección. Algunos electrones libres se difunden atravesando la unión. Cuando un electrón libre entra en la región *p* se convierte en un portador minoritario. Con tantos huecos a su alrededor, este electrón tiene un tiempo de vida muy corto. Poco después de entrar en la región *p*, el electrón libre cae en un hueco. Cuando esto sucede, el hueco desaparece y el electrón libre se convierte en un electrón de valencia. Cada ocasión en la que un electrón se difunde a través de la unión, crea un par de iones. Cuando un electrón abandona el lado *n*, deja un átomo pentavalente al que le hace falta una carga negativa; este átomo se convierte en ión positivo. Una vez que el electrón cae en un hueco en el lado *p*, el átomo trivalente que lo ha capturado se convierte en ión negativo.

En la Figura 2-13a se muestran estos iones a cada lado de la unión. Los signos más (+) encerrados en círculos representan los iones positivos, mientras que los signos menos (−) encerrados en círculos representan los iones negativos. Los iones se encuentran fijos en la estructura del cristal debido a los enlaces covalentes y no pueden moverse de un lado a otro como los electrones libres y los huecos.

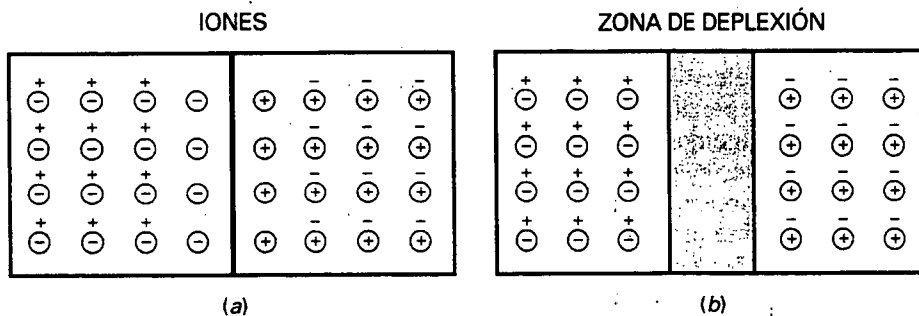
Cada pareja de iones positivo y negativo en la unión se llama dipolo. La creación de un dipolo hace que desaparezcan un electrón libre y un hueco. A medida que aumenta el número de dipolos, la región cercana a la unión se vacía de portadores. A esta *zona sin portadores* se la conoce como **zona de deplexión** (Fig. 2-13b).

### □ Barrera de potencial

Cada dipolo posee un campo eléctrico entre los iones positivo y negativo que lo forman; por tanto, si entran electrones libres adicionales en la zona de deplexión, el campo eléctrico trata de devolver estos electrones hacia la zona *n*. La intensidad del campo eléctrico aumenta con cada electrón que



**Figura 2-12.** La unión *pn*.



**Figura 2-13.** a) Creación de iones en la unión; b) zona de depleción.

cruza hasta que se alcanza el equilibrio. En una primera aproximación, esto significa que el campo acabará por detener la difusión de electrones a través de la unión.

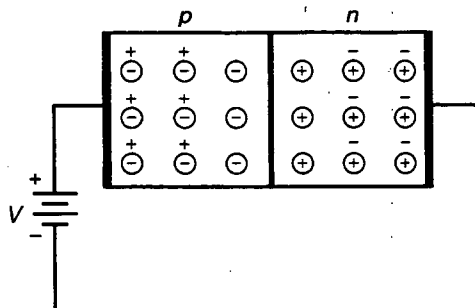
En la Figura 2-13 el campo eléctrico entre los iones es equivalente a una diferencia de potencial llamada **barrera de potencial**. A 25 °C la barrera de potencial es aproximadamente de 0,3 V para diodos de germanio y de 0,7 V para diodos de silicio.

## 2-9. POLARIZACIÓN DIRECTA

En la Figura 2-14 se ve una fuente de corriente continua conectada a un diodo. El terminal negativo de la fuente está conectado al material tipo *n*, y el terminal positivo al material tipo *p*. Esta conexión se llama **polarización directa**.

### ❑ Flujo de electrones libres

En la Figura 2-14 la batería empuja huecos y electrones libres hacia la unión. Si la tensión de la batería es menor que la barrera de potencial, los electrones libres no tienen suficiente energía para atravesar la zona de depleción. Cuando entran en esta zona, los iones se ven empujados de regreso a la zona *n*. A causa de esto no circula corriente a través del diodo.



**Figura 2-14.** Polarización directa.

Cuando la fuente de tensión continua es mayor que la barrera de potencial, la batería empuja de nuevo huecos y electrones libres hacia la unión. Esta vez los electrones libres tienen suficiente energía para pasar a través de la zona de depleción y recombinarse con los huecos. Para hacerse una idea básica, imaginemos todos los huecos en la zona  $p$  moviéndose hacia la derecha y todos los electrones libres desplazándose hacia la izquierda. En algún lugar próximo a la unión estas cargas opuestas se recombinan. Como los electrones libres entran continuamente por el extremo derecho del diodo y continuamente se crean huecos en el extremo izquierdo, existe una corriente continua a través del diodo.

### □ El flujo de un electrón

Sigamos a un único electrón a lo largo del circuito completo. Después de que el electrón libre abandona el terminal negativo de la batería entra en el extremo derecho del diodo. Viaja a través de la región  $n$  hasta que alcanza la unión. Cuando la tensión de la batería es mayor que 0,7 V, el electrón libre tiene energía suficiente para atravesar la zona de depleción. Poco después de entrar en la región  $p$  se recombina con un hueco.

En otras palabras, el electrón libre se convierte en un electrón de valencia. Como tal continúa su viaje hacia la izquierda, pasando de un hueco al siguiente hasta que alcanza el extremo izquierdo del diodo. Cuando deja este último, aparece un nuevo hueco y el proceso comienza otra vez. Como hay miles de millones de electrones haciendo el mismo viaje, tenemos una corriente continua a través del diodo.

### □ Recordatorio

La corriente circula fácilmente en un diodo de silicio polarizado en directa. Cuando la tensión aplicada sea mayor que la barrera de potencial habrá una gran corriente continua en el circuito. En otras palabras, si la fuente de tensión es mayor que 0,7 V, un diodo de silicio produce una corriente continua en la dirección directa.

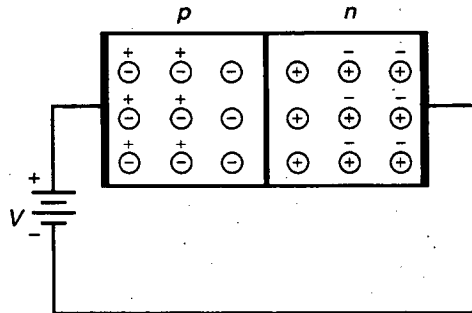
## 2-10. POLARIZACIÓN INVERSA

---

Si se invierte la polaridad de la fuente de continua, entonces el diodo quedará polarizado en inversa, como se ve en la Figura 2-15. En este caso, el terminal negativo de la batería se encuentra conectado al lado  $p$  y el terminal positivo lo está al lado  $n$ . Esta conexión se denomina **polarización inversa**.

### □ Ensanchamiento de la zona de depleción

El terminal negativo de la batería atrae los huecos y el terminal positivo los electrones libres; por ello, los huecos y electrones libres se alejan de la unión; como resultado, la zona de depleción se ensancha.



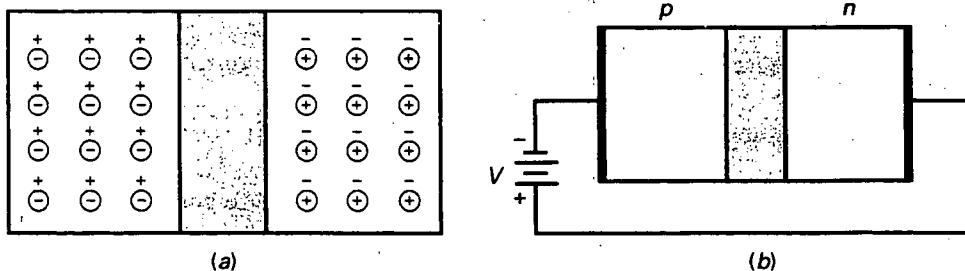
**Figura 2-15.** Polarización inversa.

¿Cuánto aumenta la anchura de la zona de deplexión en la Figura 2-16a? Cuando los huecos y los electrones se alejan de la unión, los iones recién creados hacen que aumente la diferencia de potencial a través de la zona de deplexión. A mayor anchura de dicha zona corresponde mayor diferencia de potencial. La zona de deplexión deja de aumentar en el momento en que su diferencia de potencial es igual a la tensión inversa aplicada. Cuando esto sucede los electrones y los huecos no se alejan de la unión.

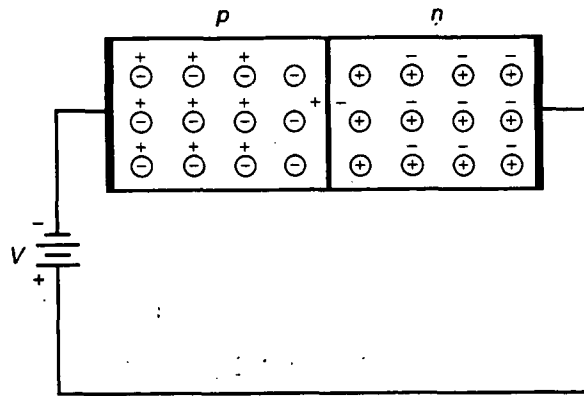
En ocasiones, la zona de deplexión se muestra como una zona sombreada como la de la Figura 2-16. La anchura de esta zona sombreada es proporcional a la tensión inversa. A medida que la tensión inversa crece, aumenta también la zona de deplexión.

### ❑ Corriente de portadores minoritarios

¿Existe alguna corriente después de haberse estabilizado la zona de deplexión? Sí. Incluso con polarización inversa hay una pequeña corriente. Recuérdese que la energía térmica crea continuamente pares de electrones libres y huecos, lo que significa que a ambos lados de la unión existen pequeñas concentraciones de portadores minoritarios. La mayor parte de éstos se recombinan con los portadores mayoritarios, pero los que se hallan dentro de la zona de deplexión pueden vivir lo suficiente para cruzar la unión. Cuando esto sucede, por el circuito externo circula una pequeña corriente.



**Figura 2-16.** a) Zona de deplexión; b) incrementar la polarización inversa aumenta el ancho de la zona de deplexión.



**Figura 2-17.** La producción térmica de electrones libres y huecos en la zona de depleción produce una corriente inversa de saturación minoritaria.

En la Figura 2-17 se ilustra esta idea. Supóngase que la energía térmica ha creado un electrón libre y un hueco cerca de la unión. La zona de depleción empuja al electrón libre hacia la derecha, provocando que un electrón deje el extremo derecho del cristal. El hueco en la zona de depleción es empujado hacia la izquierda. Este hueco extra en el lado  $p$  ocasiona que un electrón entre por el extremo izquierdo del cristal y se recombine con un hueco. Como la energía térmica está creando constantemente pares electrón-hueco dentro de la zona de depleción, se producirá continuamente una pequeña corriente en el circuito externo.

La corriente inversa originada por los portadores minoritarios producidos térmicamente se llama **corriente inversa de saturación**. En las ecuaciones esta corriente se simboliza por  $I_s$ . El nombre representa el hecho de que no se puede obtener una corriente de portadores minoritarios mayor que la producida por energía térmica; es decir, aumentar la tensión inversa no hará que crezca el número de portadores minoritarios creados térmicamente.

### ❑ Corriente superficial de fugas

Además de la corriente de portadores minoritarios producidos térmicamente, ¿existe alguna otra corriente en el diodo polarizado en inversa? Sí, una *pequeña corriente circula sobre la superficie del cristal*. Esta corriente se denomina **corriente superficial de fugas**, que es causada por impurezas en la superficie del cristal e imperfecciones en su estructura interna.

### ❑ Recordatorio

La corriente inversa total en un diodo es una corriente de portadores minoritarios muy pequeña y dependiente de la temperatura y una corriente de fugas superficial muy pequeña y directamente proporcional a la tensión aplicada. En muchas aplicaciones la corriente inversa de un diodo de silicio es tan pequeña que pasa inadvertida. La principal idea a recordar es que *la corriente es aproximadamente cero en un diodo de silicio polarizado en inversa*.



## 2-11. RUPTURA

Los diodos admiten unos valores máximos en las tensiones que se les aplican. Por tanto, existe un límite para la tensión máxima en inversa con que se puede polarizar un diodo sin correr el riesgo de destruirlo.

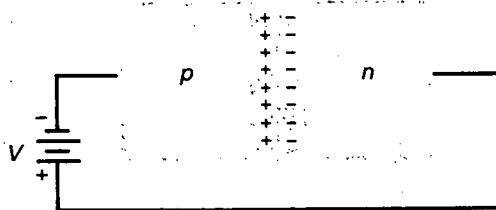
Si se aumenta continuamente la tensión inversa, llegará un momento en que se alcance la tensión de ruptura del diodo. Para muchos diodos, la tensión de ruptura es normalmente mayor de 50 V. La tensión de ruptura se muestra en la hoja de características del diodo. Hablaremos sobre las hojas de características en el Capítulo 3.

Una vez alcanzada la tensión de ruptura, una gran cantidad de portadores minoritarios aparece repentinamente en la zona de deplexión y el diodo conduce descontroladamente.

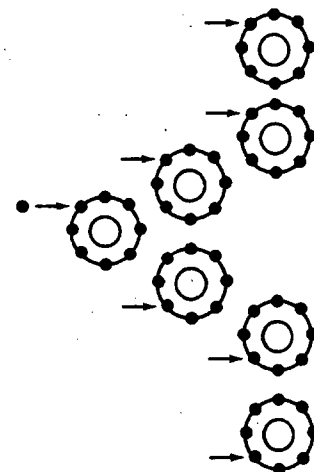
¿De dónde vienen estos portadores? Se producen por el *efecto de avalancha* (Fig. 2-18) que aparece con tensiones inversas elevadas. Como siempre, hay una pequeña corriente inversa de portadores minoritarios. Cuando la tensión inversa aumenta, obliga a los portadores minoritarios a moverse más rápidamente. De esta forma chocarán con los átomos del cristal. Si dichos portadores adquieren la energía suficiente, pueden golpear a los electrones de valencia y liberarlos; es decir, pueden producir electrones libres. Estos nuevos portadores minoritarios pueden unirse a los ya existentes para colisionar contra otros átomos. El proceso es geométrico, ya que un electrón libre libera a un electrón de valencia, obteniéndose dos electrones libres. Estos dos electrones libres liberan, a su vez, a otros dos de valencia, y así sucesivamente, de forma que el proceso continúa hasta que la corriente inversa es muy grande.

En la Figura 2-19 se observa una vista ampliada de la zona de deplexión. La polarización inversa obliga a los electrones libres a moverse hacia la derecha. Cada electrón, a medida que se desplaza, gana velocidad. Cuanto mayor sea la tensión inversa, más rápido se mueven los electrones. Si un electrón con una gran velocidad tiene la energía suficiente, puede golpear el electrón de valencia del primer átomo y colocarlo en una orbital mayor, lo que da como resultado dos electrones libres, los cuales pueden acelerarse y desligar dos electrones más. De esta forma, el número de portadores minoritarios puede llegar a ser demasiado grande y el diodo puede conducir sin control.

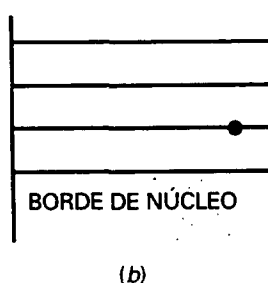
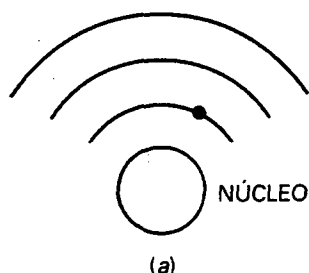
La tensión de ruptura de un diodo depende del nivel de dopaje del mismo. Con diodos rectificadores (el tipo más común), la tensión de ruptura suele ser mayor de 50 V.



**Figura 2-18.** La avalancha produce muchos electrones libres y huecos en la zona de deplexión.



**Figura 2-19.** El proceso de avalancha es una progresión geométrica: 1, 2, 4, 8, ...



**Figura 2-20.** El nivel de energía es proporcional al tamaño de la orbital.  
a) Orbitales; b) niveles de energía.

## 2-12. NIVELES DE ENERGÍA

Como una buena aproximación, la energía total de un electrón puede identificarse con el tamaño de su orbital. Es decir, puede pensarse que el tamaño de cada uno de sus radios (Fig. 2-20a) es equivalente a los niveles de energía representados en la Figura 2-20b. Los electrones de la orbital más pequeña están en el primer nivel de energía; los electrones de la segunda orbital están en el segundo nivel de energía y así sucesivamente.

### ❑ Más energía en el orbital mayor

Como el electrón es atraído por el núcleo, se requiere energía adicional para llevarlo a un orbital mayor. Cuando un electrón salta de la primera al segundo orbital, gana energía potencial con respecto al núcleo. Algunos de los agentes externos que pueden hacer saltar a un electrón a un nivel de energía mayor son el calor, la luz y la tensión eléctrica.

Supóngase, por ejemplo, que una fuerza externa eleva el electrón de la primera al segundo orbital. Este electrón tiene más energía potencial porque está más alejado del núcleo. La situación es similar a la de un objeto situado sobre la Tierra. Cuanto más alto se halle el objeto, mayor será su energía potencial con respecto a la Tierra. Si se suelta el objeto, puede realizar un mayor trabajo al caer sobre la Tierra.

### ❑ Los electrones pueden emitir luz

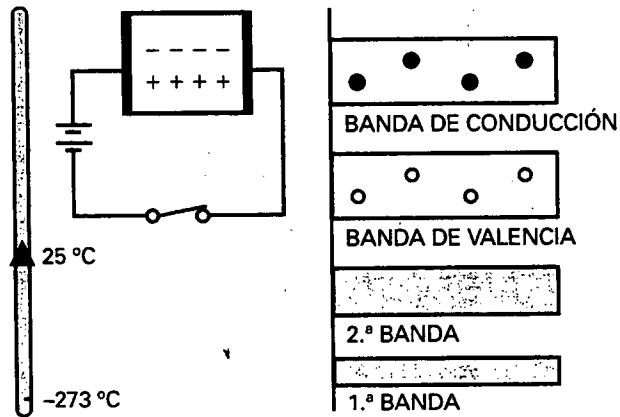
Después de que un electrón ha saltado a una orbital mayor, puede regresar a su nivel de energía inicial. Si lo hace, devolverá la energía sobrante en forma de calor, luz u otro tipo de radiación.

En un **diodo emisor de luz** (LED: *Light-Emitting Diode*), la tensión aplicada eleva los electrones a niveles superiores de energía. Cuando estos electrones caen de nuevo a los niveles inferiores de energía, desprenden luz. Dependiendo del material que se use en la fabricación del diodo, la luz es roja, verde, naranja o azul. Algunos LED producen radiación infrarroja (invisible), que es útil en sistemas de alarma antirrobo.

### ❑ Bandas de energía

Cuando un átomo de silicio está aislado, la orbital de un electrón sólo se ve influida por las cargas del átomo aislado. Lo que provoca que los niveles de energía sean los que se representan por las líneas de la Figura 2-20b. Pero cuando los átomos de silicio están en un cristal la orbital de cada electrón también se ve influenciada por las cargas de muchos otros átomos de silicio. Como cada electrón tiene una posición única dentro de la red cristalina, no hay dos electrones que posean exactamente el mismo patrón de cargas alrededor. Ésta es la razón de que la orbital de cada electrón sea diferente; o, dicho de otro modo, los niveles de energía de cada electrón son distintos.

La Figura 2-21 muestra lo que le sucede a los niveles de energía. Todos los electrones de la primera orbital tienen niveles de energía ligeramente diferentes porque no hay dos electrones que vean exactamente el mismo



**Figura 2-21.** Semiconductor intrínseco y sus bandas de energía.

entorno de cargas. Como hay miles de millones de electrones en la primera orbital, estas ligeras diferencias de niveles de energía forman un grupo o *banda* de energía. Similarmente, los miles de millones de electrones de la segunda orbital forman la segunda banda de energía, y así sucesivamente para el resto de las bandas.

Otra aclaración. Como ya se sabe, la energía térmica produce unos pocos electrones libres y huecos. Los huecos permanecen en la banda de valencia, pero los electrones libres se mueven a la banda de energía inmediatamente superior, la cual se denomina *banda de conducción*. Éste es el motivo por el que la Figura 2-21 muestra una banda de conducción con algunos electrones libres y una banda de valencia con algunos huecos. Cuando se cierra el interruptor, existe una pequeña corriente en el semiconductor puro. Los electrones libres se desplazan a través de la banda de conducción y los huecos lo hacen a través de la banda de valencia.

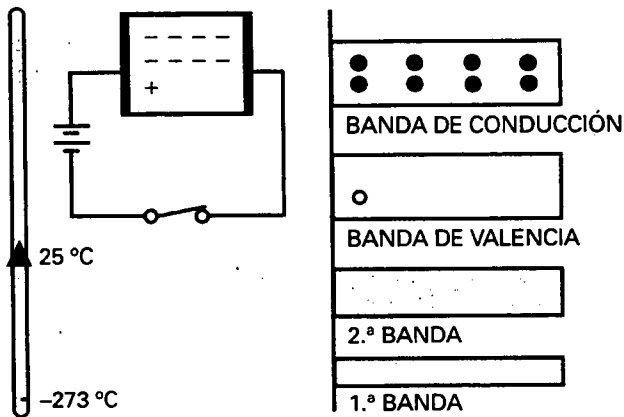
### □ Bandas de energía tipo *n*

La Figura 2-22 presenta las bandas de energía para un semiconductor tipo *n*. Como cabría esperar, los portadores mayoritarios son los electrones libres en la banda de conducción, y los minoritarios son los huecos en la banda de valencia. Como el interruptor está cerrado en la Figura 2-22, los portadores mayoritarios circulan hacia la izquierda y los minoritarios hacia la derecha.

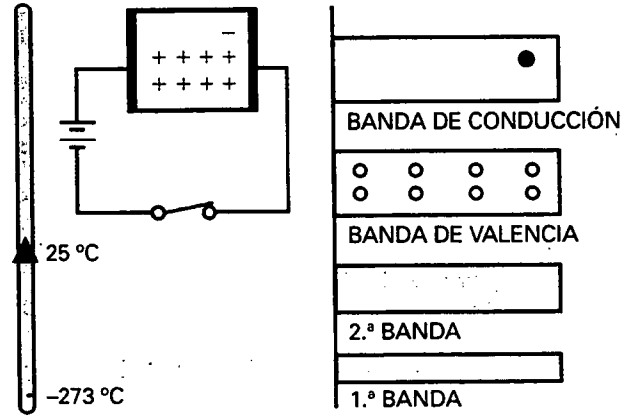
### □ Bandas de energía tipo *p*

La Figura 2-23 muestra las bandas de energía para un semiconductor tipo *p*. Aquí se observa una inversión de papeles de los portadores. Ahora los portadores mayoritarios son los huecos en la banda de valencia, y los minoritarios son los electrones de la banda de conducción. Como el interruptor está cerrado, los portadores mayoritarios circulan hacia la derecha y los minoritarios hacia la izquierda.

## 52 PRINCIPIOS DE ELECTRÓNICA



**Figura 2-22.** Semiconductor tipo *n* y sus bandas de energía.



**Figura 2-23.** Semiconductor tipo *p* y sus bandas de energía.

## 2-13. LA BARRERA DE ENERGÍA

Para comprender el funcionamiento de tipos más avanzados de dispositivos semiconductores, es necesario conocer el modo en que los niveles de energía controlan la acción de una unión *pn*.

### □ Antes de la difusión

Suponiendo una unión abrupta (es decir, una unión que pasa bruscamente del material tipo *p* al material tipo *n*), ¿cómo es el diagrama de energía correspondiente?

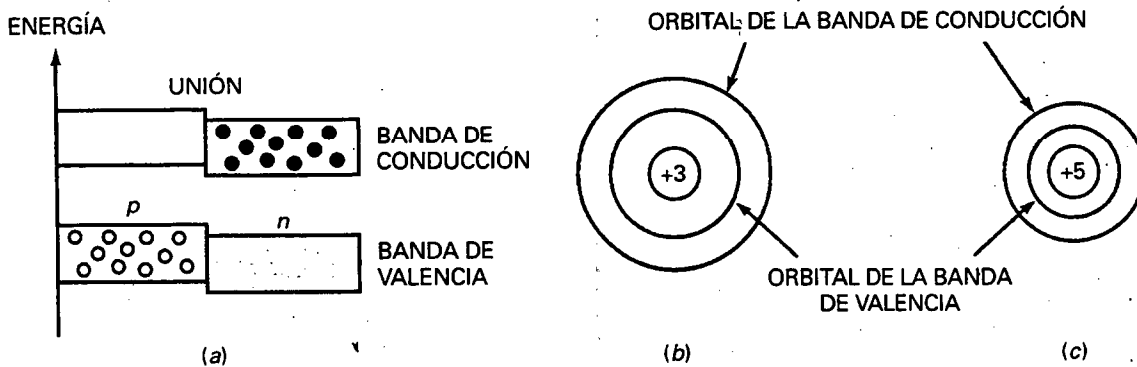
En la Figura 2-24a se representan las bandas de energía antes de que los electrones se hayan difundido a través de la unión. El lado *p* tiene gran cantidad de huecos en la banda de valencia y el lado *n* posee muchos electrones en la banda de conducción. Pero ¿por qué las bandas *p* están ligeramente más altas que las bandas *n*?

El lado *p* está formado por átomos trivalentes con una carga de la parte interna de +3, como se muestra en la Figura 2-24b. Por otra parte, el lado *n* tiene átomos pentavalentes con una carga de la parte interna de +5 (Figura 2-24c). La parte interna de +3 atrae a un electrón con menos fuerza que la parte interna de +5.

Por tanto, los orbitales de un átomo trivalente (lado *p*) son ligeramente mayores, en energía, que los de un átomo pentavalente (lado *n*).

Una unión abrupta como la de la Figura 2-24a es una idealización, ya que el lado *p* no puede terminar súbitamente donde comienza la región *n*. Un diodo real exhibe un cambio gradual de un material a otro.

Por esta razón, la Figura 2-25a constituye un diagrama de energía más realista de un diodo de unión.



**Figura 2-24.** a) Bandas de energía de una unión abrupta antes de la difusión; b) los átomos de tipo *p* tienen orbitales más grandes, equivalentes a un nivel de energía mayor; c) los átomos de tipo *n* tienen orbitales más pequeñas, equivalentes a un nivel de energía menor.

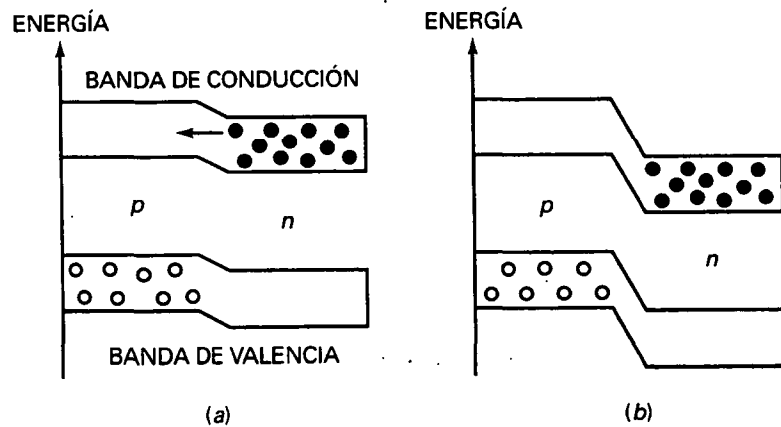
### □ En el equilibrio

En el instante inicial, cuando el diodo se forma, no existe la zona de depleción (Fig. 2-25a). En ese caso los electrones libres se difundirán a través de la unión. En términos de los niveles de energía, este hecho supone que los electrones de la parte superior de la banda de conducción *n* se muevan a través de la unión, como se describió antes. Inmediatamente después de cruzar la unión, un electrón libre se recombinará con un hueco; es decir, el electrón caerá de la banda de conducción a la banda de valencia y, al hacerlo, emitirá calor, luz y otras radiaciones. Esta recombinación no sólo crea la zona de depleción, sino que además cambia los niveles de energía en la unión.

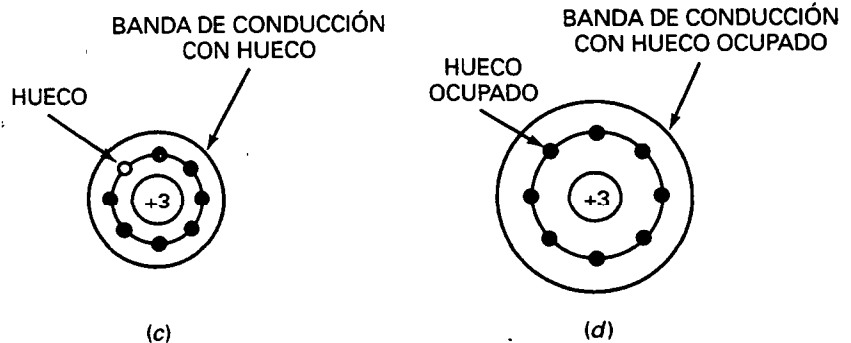
La Figura 2-25b muestra los diagramas de energía después de que haya sido creada la zona de depleción. Las bandas *p* se han desplazado hacia arriba con respecto a las bandas *n*. Como se puede ver, la parte inferior de la banda *p* está al mismo nivel que la parte superior de la banda *n* correspondiente, lo que quiere decir que los electrones en el lado *n* ya no tienen energía suficiente para cruzar la unión. A continuación se da una explicación simplificada del desplazamiento hacia arriba de la banda *p*.

La Figura 2-25c contiene una orbital de la banda de conducción alrededor de uno de los átomos trivalentes antes de que se lleve a cabo la difusión. Cuando un electrón se difunde a través de la unión, cae en un hueco de un átomo trivalente (Fig. 2-25d). Este electrón extra en la orbital de valencia aumentará el tamaño del orbital de la banda de conducción, alejándola más del núcleo del átomo trivalente, como se aprecia en la Figura 2-25d. Por tanto, cualquier nuevo electrón que llegue a esta región necesitará más energía que antes para moverse en una orbital de la banda de conducción. Dicho en otros términos, el aumento del orbital de la banda de conducción indica que el nivel de energía se ha incrementado, lo que equivale a decir que las bandas *p* se desplazan hacia arriba con respecto a las bandas *n* después de que se crea la zona de depleción.

En el equilibrio, los electrones de la banda de conducción en el lado *n* se mueven en orbitales que no son lo suficientemente grandes para ajustarse a las orbitales del lado *p* (Fig. 2-25b). Es decir, los electrones en el lado *n* no



**Figura 2-25.** La difusión modifica las bandas de energía. *a)* Bandas de energía antes de la difusión; *b)* bandas de energía después de formarse la zona de deplexión; *c)* el átomo tipo *p* tiene una orbital menor antes de la difusión; *d)* el átomo tipo *p* tiene una orbital más grande después de la difusión, equivalente a un nivel de energía mayor.

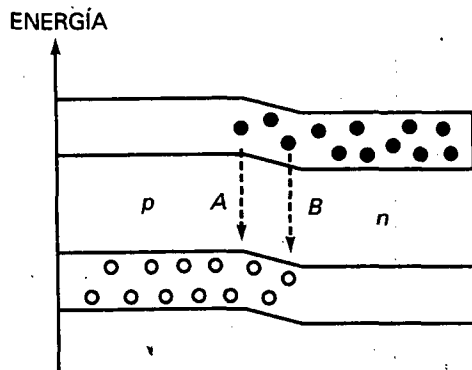


tienen la suficiente energía para atravesar la unión. Para un electrón que trate de difundirse a través de la unión, la trayectoria que debe recorrer presenta una barrera de energía (Fig. 2-25*b*). El electrón no puede atravesar esta barrera a menos que reciba energía de una fuente de alimentación externa. (Esta fuente de energía puede ser una fuente de tensión, pero también puede ser calor, luz o otra radiación.)

### ❑ Polarización directa

Mediante la polarización directa se logra que disminuya la barrera de energía (Fig. 2-26). En otras palabras, la batería aumenta el nivel energético de los electrones libres, lo que equivale a empujar la banda *n* hacia arriba. Debido a esto, los electrones libres adquieren la energía suficiente para entrar en la zona *p*. Exactamente después de entrar en dicha zona, cada electrón cae en un hueco (trayectoria A). Como electrón de valencia, continúa su viaje hacia la izquierda del cristal, lo que equivale a que los huecos se muevan hacia la unión.

Algunos huecos penetran en la región *n* como se muestra en la Figura 2-26. En este caso, los electrones de la banda de conducción pueden seguir la trayectoria de recombinación B. Independientemente de dónde se



**Figura 2-26.** La polarización directa proporciona más energía a los electrones libres, equivalente a un nivel de energía mayor.

lleve a cabo esta recombinación, el resultado es el mismo. Un flujo estable de electrones libres se mueve hacia la unión y cae en los huecos cercanos a ella. Los electrones así capturados (ahora electrones de valencia) se mueven hacia la izquierda en un flujo continuo mediante los huecos de la región *p*. Se produce así una corriente continua de electrones a través del diodo.

Cuando los electrones libres caen de la banda de conducción a la de valencia irradian su exceso de energía en forma de calor y luz. En un diodo normal la radiación es energía calorífica, la cual no se puede aprovechar. Pero con un diodo emisor de luz (LED), la radiación es una luz de color rojo, verde, azul o naranja. Los diodos LED se emplean mucho como indicadores visuales en instrumentos electrónicos, teclados de ordenador y electrónica de consumo.

## 2-14. LA BARRERA DE POTENCIAL Y LA TEMPERATURA

La **temperatura de la unión** es la *temperatura dentro del diodo, exactamente en la unión pn*. La **temperatura ambiente** es diferente. Es la temperatura del aire fuera del diodo, el aire circundante al diodo. Cuando el diodo está conduciendo, la temperatura de la unión es más alta que la temperatura ambiente a causa del calor creado en la recombinación.

La barrera de potencial depende de la temperatura en la unión. Un incremento en la temperatura de la unión crea más electrones libres y huecos en las regiones dopadas. Como estas cargas se difunden en la zona de depleción, ésta se estrecha, lo que significa que *hay menos barrera de potencial a temperaturas altas de la unión*.

Antes de continuar necesitamos definir un símbolo:

$$\Delta = \text{el cambio en} \quad (2-2)$$

La letra griega  $\Delta$  (delta) significa aquí «el cambio en». Por ejemplo,  $\Delta V$  significa el cambio en la tensión, y  $\Delta T$  significa el cambio en la temperatura.

La relación  $\Delta V/\Delta T$  representa el cambio en la tensión dividido por el cambio en la temperatura.

Ahora podemos establecer una regla para estimar el cambio en la barrera de potencial: *la barrera de potencial de un diodo de silicio decrece 2 mV por cada incremento de 1 grado Celsius.*

Como una derivación:

$$\frac{\Delta V}{\Delta T} = -2 \text{ mV/}^\circ\text{C} \quad (2-3)$$

Reordenando:

$$\Delta V = (-2 \text{ mV/}^\circ\text{C}) \Delta T \quad (2-4)$$

Con esto podemos calcular la barrera de potencial a cualquier temperatura de la unión.

### EJEMPLO 2-5

Suponiendo una barrera de potencial de 0.7 V a una temperatura ambiente de 25 °C, ¿cuál es la barrera de potencial en un diodo de silicio cuando la temperatura de la unión es de 100 °C? ¿Y si es de 0 °C?

### SOLUCIÓN

Cuando la temperatura de la unión es 100 °C, el cambio en la barrera de potencial es:

$$\Delta V = (-2 \text{ mV/}^\circ\text{C}) \Delta T = (-2 \text{ mV/}^\circ\text{C})(100^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) = -150 \text{ mV}$$

Esto nos dice que la barrera de potencial decrece 150 mV desde su valor a temperatura ambiente. Así, queda igual a:

$$V_B = 0.7 \text{ V} - 0.15 \text{ V} = 0.55 \text{ V}$$

Cuando la temperatura de la unión es 0 °C, el cambio en la barrera de potencial vale:

$$\Delta V = (-2 \text{ mV/}^\circ\text{C}) \Delta T = (-2 \text{ mV/}^\circ\text{C})(0^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) = 50 \text{ mV}$$

lo que quiere decir que la barrera de potencial crece 50 mV desde su valor a temperatura ambiente. Así, queda igual a:

$$V_B = 0.7 \text{ V} + 0.05 \text{ V} = 0.75 \text{ V}$$

## 2-15. DIODO CON POLARIZACIÓN INVERSA

A continuación se expondrán algunas ideas avanzadas acerca de los diodos polarizados en inversa. En principio, sabemos que la zona de deplexión modifica su anchura cuando la tensión inversa cambia. Veamos qué consecuencias trae consigo este hecho.



### ❑ Corriente transitoria

Cuando la tensión inversa aumenta, los electrones y los huecos se apartan de la unión. A medida que esto sucede, van quedando atrás iones positivos y negativos; en consecuencia, la zona de deplexión se ensancha. Según aumenta la tensión inversa, la zona de deplexión se hace más ancha. Mientras la zona de deplexión se ajusta a su nueva anchura, en el circuito externo circula una corriente. Esta corriente transitoria vuelve a ser cero después de que la zona de deplexión ha dejado de crecer.

El tiempo durante el que circula la corriente transitoria depende de la constante de tiempo ( $RC$ ) del circuito externo. Casi siempre sucede en cuestión de nanosegundos. Por ello, pueden ignorarse los efectos de la corriente transitoria para frecuencias de trabajo por debajo de los 10 MHz, aproximadamente.

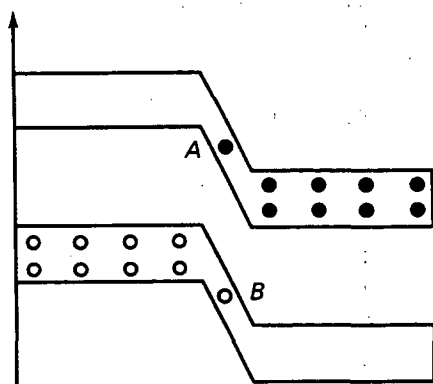
### ❑ Corriente inversa de saturación

Como se explicó anteriormente, la polarización directa de un diodo eleva la banda  $n$  y permite a los electrones libres traspasar la unión. La polarización inversa tiene el efecto contrario: amplía la zona de deplexión y hace descender la banda  $n$ , como se representa en la Figura 2-27.

Esta figura muestra la corriente inversa de saturación en función de las bandas de energía. Supóngase que aparece un par electrón-hueco en el área de la unión  $A$  y  $B$ . El electrón libre en  $A$  desciende por la barrera de energía empujando hacia fuera un electrón del extremo derecho de la banda de conducción. De manera similar, un electrón de valencia desciende por la barrera hacia el hueco en  $B$ . El electrón de valencia que cae deja un hueco. Este hueco de más en el lado  $p$  permite que entre un electrón al extremo izquierdo del cristal.

Cuanto mayor es la temperatura en la unión, mayor es la corriente inversa de saturación. Una aproximación útil que debe recordarse es la siguiente:  $I_s$  se duplica por cada aumento de  $10^\circ\text{C}$  de la temperatura, que se puede expresar como:

$$\text{Porcentaje } \Delta I_s = 100\% \text{ para un incremento de } 10^\circ\text{C} \quad (2-5)$$



**Figura 2-27.** La energía térmica produce electrones libres y huecos en la deplexión.

Por tanto, el cambio en la corriente de saturación es del 100 por 100 por cada aumento de 10 °C en la temperatura. Si los cambios en la temperatura son menores que 10 °C, utilizamos esta regla equivalente:

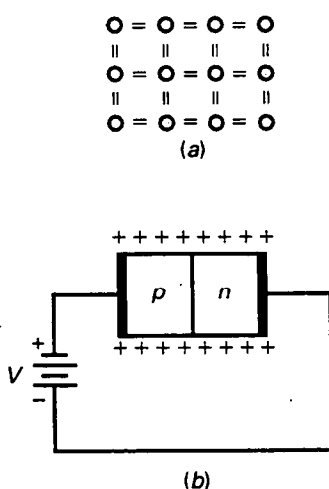
$$\text{Porcentaje } \Delta I_s = 7 \% \text{ por } ^\circ\text{C} \quad (2-6)$$

Es decir, la variación de la corriente de saturación es de 7 por 100 por cada grado Celsius, solución que es una buena aproximación de la regla de los 10°.

### □ Silicio frente a germanio

En un átomo de silicio la *distancia entre la banda de valencia y la banda de conducción* se denomina **gap de energía**. Cuando la energía térmica produce electrones libres y huecos, se debe dar a los electrones de valencia suficiente energía para saltar a la banda de conducción. A mayor gap de energía más dificultad para que la energía térmica produzca pares electrón-hueco. Afortunadamente, el silicio tiene un mayor gap de energía; esto significa que la energía térmica no produce muchos pares electrón-hueco a temperaturas normales.

En un átomo de germanio la banda de valencia está mucho más cerca de la banda de conducción. En otras palabras, el germanio tiene un gap de energía mucho menor que el silicio. Por esta razón, la energía térmica produce muchos más pares electrón-hueco en los dispositivos de germanio. Éste es el problema mencionado anteriormente. La excesiva corriente inversa de los dispositivos de germanio los excluye de su uso generalizado en ordenadores modernos, electrónica de consumo y circuitos de comunicaciones.



**Figura 2-28.** a) Los átomos en la superficie de un cristal no tienen vecinos; b) la superficie del cristal tiene huecos.

### □ Corriente superficial de fugas

Se habló brevemente de la corriente superficial de fugas en el Apartado 2-10. Recuerde qué es una corriente inversa sobre la superficie del cristal. He aquí una explicación simplificada de la existencia de una corriente superficial de fugas. Supóngase que los átomos en los extremos superior e inferior en la Figura 2-28a son átomos de la superficie del cristal. Como estos átomos no tienen vecinos, tienen sólo 6 electrones en la orbital de valencia, lo que implica 2 huecos en cada átomo de la superficie. Puesto que estos huecos se hallan a lo largo de la superficie del cristal, mostrado en la Figura 2-28b, esta superficie es como un semiconductor tipo *p*. Debido a ello, pueden entrar electrones por el extremo izquierdo del cristal, viajar por los huecos de la superficie y salir por el extremo derecho del cristal. De esta manera se produce una pequeña corriente inversa a lo largo de la superficie.

La corriente superficial de fugas es directamente proporcional a la tensión inversa. Por ejemplo, si se duplica la tensión inversa, la corriente superficial de fugas  $I_{SL}$  se duplica. Podemos definir la resistencia superficial de fugas como:

$$R_{SL} = \frac{V_R}{I_{SL}} \quad (2-7)$$

**EJEMPLO 2-6**

Un diodo de silicio tiene una corriente inversa de saturación de 5 nA a 25 °C. ¿Cuál es la corriente de saturación a 100 °C?

**SOLUCIÓN**

El cambio en la temperatura es

$$\Delta T = 100^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C} = 75^\circ\text{C}$$

Según la Ecuación (2-5), la corriente se dobla siete veces entre 5 °C y 95 °C:

$$I_s = (2^7)(5 \text{ nA}) = 640 \text{ nA}$$

y tomando como referencia la Ecuación (2-6), hay 5° adicionales entre 95 °C y 100 °C:

$$I_s = (1.07^5)(640 \text{ nA}) = 898 \text{ nA}$$

**EJEMPLO 2-7**

Si la corriente superficial de fugas es 2 nA para una tensión inversa de 25 V, ¿qué valor toma la corriente superficial de fugas para una tensión inversa de 35 V?

**SOLUCIÓN**

Hay dos formas de resolver este problema. Primero, calcular la resistencia superficial de fugas:

$$R_{st} = \frac{25 \text{ V}}{2 \text{ nA}} = 12.5(10^9) \Omega$$

Después, calcular la corriente superficial de fugas a 35 V como sigue:

$$I_{st} = \frac{35 \text{ V}}{12.5(10^9) \Omega} = 2.8 \text{ nA}$$

El segundo método sería así: Como la corriente superficial de fugas es directamente proporcional a la tensión inversa:

$$I_{st} = \frac{35 \text{ V}}{25 \text{ V}} 2 \text{ nA} = 2.8 \text{ nA}$$

## AYUDAS AL ESTUDIO

**RESUMEN****Sección 2-1. Conductores**

Un átomo de cobre neutro tiene solamente un electrón en su orbital exterior. Como este único electrón puede desligarse fácilmente de su átomo, se le da el nombre de electrón libre. El cobre es un buen conductor porque incluso la tensión más pequeña hace que los electrones libres fluyan de un átomo al siguiente.

**Sección 2-2. Semiconductores**

El silicio es el material semiconductor más utilizado. El átomo de silicio aislado tiene 4 electrones en su orbital exterior o de valencia. El número de electrones en el orbital de valencia es la clave de la conductividad. Los conductores tienen un electrón de valencia, los semiconductores 4 y los aislantes poseen 8.

**Sección 2-3. Cristales de silicio**

Cada átomo de silicio en un cristal tiene sus 4 electrones de valencia más cuatro electrones compartidos con los átomos vecinos. A temperatura ambiente, un cristal puro de silicio tiene sólo unos pocos electrones libres y huecos producidos térmicamente. El tiempo que transcurre entre la creación y la recombinación de un electrón libre con un hueco recibe el nombre de tiempo de vida.

**Sección 2-4. Semiconductores intrínsecos**

Un semiconductor intrínseco es un semiconductor puro. Cuando se aplica una tensión externa al semiconductor intrínseco, los electrones libres se dirigen hacia el terminal positivo de la batería y los huecos se mueven hacia el negativo.

**Sección 2-5. Dos tipos de flujos**

En un semiconductor intrínseco existen dos tipos de portadores. En primer lugar está el flujo de los electrones libres a través de las orbitales grandes (banda de conducción). En segundo lugar está el flujo de los huecos a través de orbitales más pequeñas (banda de valencia).

**Sección 2-6. Dopaje de un semiconductor**

El dopaje aumenta la conductividad de un semiconductor. A un semiconductor dopado se le llama *semiconductor extrínseco*. Cuando un semiconductor intrínseco se dopa con átomos pentavalentes (donadores) tiene más electrones libres que huecos. Si un semiconductor

intrínseco se dopa con átomos trivalentes (aceptadores) tiene más huecos que electrones libres.

**Sección 2-7. Dos tipos de semiconductores extrínsecos**

En un semiconductor tipo *n* los electrones libres son los portadores mayoritarios y los huecos son los portadores minoritarios. En un semiconductor tipo *p*, por el contrario, los huecos son los portadores mayoritarios y los electrones libres son los portadores minoritarios.

**Sección 2-8. El diodo no polarizado**

Un diodo no polarizado tiene una zona de depleción en la unión *pn*. Los iones en esta zona de depleción producen una barrera de potencial. A temperatura ambiente, esta barrera de potencial es aproximadamente de 0,7 V para un diodo de silicio y 0,3 V para un diodo de germanio.

**Sección 2-9. Polarización directa**

Cuando una tensión externa se opone a la barrera de potencial, el diodo está polarizado en directa. Si la tensión aplicada es mayor que la barrera de potencial, la corriente es grande. Es decir, la corriente circula con facilidad en un diodo polarizado en directa.

**Sección 2-10. Polarización inversa**

Cuando una tensión externa refuerza la barrera de potencial, el diodo está polarizado en inversa. La anchura de la zona de depleción aumenta al incrementarse la tensión inversa. La corriente es aproximadamente cero.

**Sección 2-11. Ruptura**

Una tensión inversa demasiado grande producirá el efecto Zener o de avalancha. Así pues, una gran corriente de ruptura destruirá el diodo. En general, los diodos no deben trabajar en la zona de ruptura. La única excepción es el diodo Zener, un diodo de propósito específico, que se estudiará en un capítulo posterior.

**Sección 2-12. Niveles de energía**

Cuanto mayor es la orbital, mayor es el nivel de energía de un electrón. Si una fuerza externa eleva un electrón a un nivel de energía superior, el electrón emitirá energía cuando regresa a su orbital original.

### Sección 2-13. La barrera de energía

La barrera de potencial de un diodo parece una barrera de energía. Los electrones que intentan atravesar la unión necesitan tener suficiente energía para escalar esta barrera. Una fuente de tensión externa que polariza el diodo en directa da a los electrones la energía suficiente para pasar a través de la zona de deplexión.

### Sección 2-14. Barrera de potencial y temperatura

Cuando la temperatura de la unión se incrementa, la *zona de deplexión* se hace más estrecha y la barrera de potencial decrece. Decrecerá aproximadamente 2 mV por cada grado Celsius de incremento de temperatura.

### Sección 2-15. Diodo polarizado en inversa

Hay tres componentes en la corriente inversa de un diodo. Primera, la corriente transitoria que ocurre cuando la tensión inversa cambia. Segunda, la corriente de portadores minoritarios, también llamada *corriente de saturación* porque es independiente de la

tensión inversa. Tercera, la corriente superficial de fugas. Se incrementa cuando crece la tensión inversa.

## DEFINICIONES

(2-2)  $\Delta$  = el cambio en

$$(2-7) R_{SL} = \frac{V_R}{I_{SL}}$$

## LEYES

(2-1) Saturación de valencia:  $n = 8$

## DERIVACIONES

$$(2-3) \frac{\Delta V}{\Delta T} = -2 \text{ mV/}^\circ\text{C}$$

$$(2-4) \Delta V = (-2 \text{ mV/}^\circ\text{C}) \Delta T$$

(2-5) Porcentaje  $\Delta I_S = 100\%$  para un incremento de  $10^\circ\text{C}$

(2-6) Porcentaje  $\Delta I_S = 7\%$  por  $^\circ\text{C}$

## CUESTIONES

- ¿Cuántos protones contiene el núcleo de un átomo de cobre?
  - 1
  - 4
  - 18
  - 29
- La carga resultante de un átomo neutro de cobre es
  - 0
  - +1
  - 1
  - +4
- Si a un átomo de cobre se le extrae su electrón de valencia, la carga resultante vale
  - 0
  - +1
  - 1
  - +4
- La atracción que experimenta hacia el núcleo el electrón de valencia de un átomo de cobre es
  - Ninguna
  - Débil
  - Fuerte
  - Imposible de describir
- ¿Cuántos electrones de valencia tiene un átomo de silicio?
  - 0
  - 1
  - 2
  - 4
- El semiconductor más empleado es
  - Cobre
  - Germanio
  - Silicio
  - Ninguno de los anteriores
- ¿Qué número de protones posee un átomo de silicio?
  - 4
  - 14
  - 29
  - 32
- Los átomos de silicio se combinan en una estructura ordenada que recibe el nombre de
  - Enlace covalente
  - Cristal
  - Semiconductor
  - Orbital de valencia
- Un semiconductor intrínseco presenta algunos huecos a temperatura ambiente causados por
  - El dopaje
  - Electrones libres
  - Energía térmica
  - Electrones de valencia
- Cada electrón de valencia en un semiconductor intrínseco establece un
  - Enlace covalente
  - Electrón libre
  - Hueco
  - Recombinación.
- La unión de un electrón libre con un hueco recibe el nombre de
  - Enlace covalente
  - Tiempo de vida
  - Recombinación
  - Energía térmica

## 62 PRINCIPIOS DE ELECTRÓNICA

12. A temperatura ambiente un cristal de silicio intrínseco se comporta como
  - a) Una batería
  - b) Un conductor
  - c) Un aislante
  - d) Un hilo de cobre
13. El tiempo que transcurre entre la creación de un hueco y su desaparición se conoce como
  - a) Dopaje
  - b) Tiempo de vida
  - c) Recombinación
  - d) Valencia
14. Al electrón de valencia de un conductor se le denomina también por
  - a) Electrón ligado
  - b) Electrón libre
  - c) Núcleo
  - d) Protón
15. ¿Cuántos tipos de flujo de portadores presenta un conductor?
  - a) 1
  - b) 2
  - c) 3
  - d) 4
16. ¿Cuántos tipos de flujo de portadores presenta un semiconductor?
  - a) 1
  - b) 2
  - c) 3
  - d) 4
17. Cuando se aplica una tensión a un semiconductor, los huecos circulan
  - a) Distanciándose del potencial negativo
  - b) Hacia el potencial positivo
  - c) En el circuito externo
  - d) Ninguna de las anteriores
18. ¿Cuántos huecos presenta un conductor?
  - a) Muchos
  - b) Ninguno
  - c) Sólo los producidos por la energía térmica
  - d) El mismo número que de electrones libres
19. En un semiconductor intrínseco, el número de electrones libres es
  - a) Igual al número de huecos
  - b) Mayor que el número de huecos
  - c) Menor que el número de huecos
  - d) Ninguna de las anteriores
20. La temperatura de cero absoluto es igual a
  - a)  $-273^{\circ}\text{C}$
  - b)  $0^{\circ}\text{C}$
  - c)  $25^{\circ}\text{C}$
  - d)  $50^{\circ}\text{C}$
21. A la temperatura de cero absoluto un semiconductor intrínseco presenta
  - a) Pocos electrones libres
  - b) Muchos huecos
  - c) Muchos electrones libres
  - d) Ni huecos ni electrones libres
22. A temperatura ambiente un semiconductor intrínseco tiene
  - a) Algunos electrones libres y huecos
  - b) Muchos huecos
  - c) Muchos electrones libres
  - d) Ningún hueco
23. El número de electrones libres y de huecos en un semiconductor intrínseco aumenta cuando la temperatura
  - a) Disminuye
  - b) Aumenta
  - c) Se mantiene constante
  - d) Ninguna de las anteriores
24. El flujo de electrones de valencia hacia la izquierda significa que los huecos circulan hacia
  - a) La izquierda
  - b) La derecha
  - c) En cualquier dirección
  - d) Ninguna de las anteriores
25. Los huecos se comportan como
  - a) Átomos
  - b) Cristales
  - c) Cargas negativas
  - d) Cargas positivas
26. ¿Cuántos electrones de valencia tienen los átomos trivalentes?
  - a) 1
  - b) 3
  - c) 4
  - d) 5
27. ¿Qué número de electrones de valencia tiene un átomo donador?
  - a) 1
  - b) 3
  - c) 4
  - d) 5
28. Si quisiera producir un semiconductor tipo *p*, ¿qué emplearía?
  - a) Átomos aceptadores
  - b) Átomos donadores
  - c) Impurezas pentavalentes
  - d) Silicio
29. Los huecos son minoritarios en un semiconductor tipo
  - a) Extrínseco
  - b) Intrínseco
  - c) Tipo *n*
  - d) Tipo *p*
30. ¿Cuántos electrones libres contiene un semiconductor tipo *p*?
  - a) Muchos
  - b) Ninguno
  - c) Sólo los producidos por la energía térmica
  - d) El mismo número que de huecos
31. La plata es el mejor conductor. ¿Cuál es el número de electrones de valencia que tiene?
  - a) 1
  - b) 4
  - c) 18
  - d) 29
32. Si un semiconductor intrínseco tiene un billón de electrones libres a la temperatura ambiente, ¿cuántos presentará a la temperatura de  $75^{\circ}\text{C}$ ?
  - a) Menos de un billón
  - b) Un billón
  - c) Más de un billón
  - d) Imposible de contestar
33. Una fuente de tensión es aplicada a un semiconductor tipo *p*. Si el extremo izquierdo del cristal es positivo, ¿en qué sentido circularán los portadores mayoritarios?
  - a) Hacia la izquierda
  - b) Hacia la derecha
  - c) En ninguna dirección
  - d) Imposible de contestar

34. ¿Cuál de los siguientes conceptos está menos relacionado con los otros tres?
- Conductor
  - Semiconductor
  - Cuatro electrones de valencia
  - Estructura cristalina
35. ¿Cuál de las siguientes temperaturas es aproximadamente igual a la temperatura ambiente?
- 0 °C
  - 25 °C
  - 50 °C
  - 75 °C
36. ¿Cuántos electrones hay en la orbital de valencia de un átomo de silicio dentro de un cristal?
- 1
  - 4
  - 8
  - 14
37. Los iones positivos son átomos que
- Han ganado un protón
  - Han perdido un protón
  - Han ganado un electrón
  - Han perdido un electrón
38. ¿Cuál de los siguientes conceptos describe un semiconductor tipo *n*?
- Neutro
  - Cargado positivamente
  - Cargado negativamente
  - Tiene muchos huecos
39. Un semiconductor tipo *p* contiene huecos y
- Iones positivos
  - Iones negativos
  - Átomos pentavalentes
  - Átomos donadores
40. ¿Cuál de los siguientes conceptos describe un semiconductor tipo *p*?
- Neutro
  - Cargado positivamente
  - Cargado negativamente
  - Tiene muchos electrones libres
41. ¿Cuál de los siguientes elementos no se puede mover?
- Huecos
  - Electrones libres
  - Iones
  - Portadores mayoritarios
42. ¿A qué se debe la zona de deplexión?
- Al dopaje
  - A la recombinación
  - A la barrera de potencial
  - A los iones
43. La barrera de potencial de un diodo de silicio a temperatura ambiente es de
- 0,3 V
  - 0,7 V
  - 1 V
  - 2 mV por °C
44. Para producir una gran corriente en un diodo de silicio polarizado en directa, la tensión aplicada debe superar
- 0 V
  - 0,3 V
  - 0,7 V
  - 1 V
45. En un diodo de silicio la corriente inversa es normalmente
- Muy pequeña
  - Muy grande
  - Cero
  - En la región de ruptura
46. La corriente superficial de fugas es parte de
- La corriente de polarización directa
  - La corriente de ruptura en polarización directa
  - La corriente inversa
  - La corriente de ruptura en polarización inversa
47. La tensión que provoca el fenómeno de avalanche es
- La barrera de potencial
  - La zona de deplexión
  - La tensión de codo
  - La tensión de ruptura
48. La difusión de electrones libres a través de la unión de un diodo produce
- Polarización directa
  - Polarización inversa
  - Ruptura
  - La zona de deplexión
49. Cuando la tensión inversa crece de 5 V a 10 V, la zona de deplexión
- Se reduce
  - Crece
  - No le ocurre nada
  - Se rompe
50. Cuando un diodo es polarizado en directa, la recombinación de electrones libres y huecos puede producir
- Calor
  - Luz
  - Radiación
  - Todas las anteriores
51. Si aplicamos una tensión inversa de 20 V a un diodo, la tensión en la zona de deplexión será de
- 0 V
  - 0,7 V
  - 20 V
  - Ninguna de las anteriores
52. Cada grado de aumento de temperatura en la unión decrece la barrera de potencial en
- 1 mV
  - 2 mV
  - 4 mV
  - 10 mV
53. La corriente inversa de saturación se duplica cuando la temperatura de la unión se incrementa
- 1 °C
  - 2 °C
  - 4 °C
  - 10 °C
54. La corriente superficial de fugas se duplica cuando la tensión inversa aumenta
- 7 por 100
  - 100 por 100
  - 200 por 100
  - 2 mV

## PREGUNTAS DE ENTREVISTA DE TRABAJO

Un equipo de expertos en electrónica crearon estas preguntas. En la mayoría de los casos el texto proporciona información suficiente para responder a todas las preguntas. Ocasionalmente usted puede encontrarse con algún término que no le es familiar. Si esto sucede, busque el término en el diccionario técnico. Además, puede aparecer alguna pregunta no cubierta en este libro. En este caso, investigue en alguna biblioteca o consulte las respuestas al final del libro.

1. Dígame por qué el cobre es un buen conductor de electricidad.
2. ¿En qué difiere un semiconductor de un conductor? Incluya dibujos en su explicación.
3. Dígame todo lo que sepa acerca de los huecos y cómo se diferencian de los electrones libres. Incluya algunos dibujos.
4. Deme la idea básica de semiconductores dopados. Quiero ver algunos dibujos que justifiquen su explicación.
5. Demuéstreme, dibujando y explicando la acción, por qué existe corriente en un diodo polarizado en directa.
6. Dígame por qué existe una corriente muy pequeña en un diodo polarizado en inversa.
7. Un diodo semiconductor polarizado en inversa se romperá bajo ciertas condiciones. Quiero que describa la avalancha con suficiente detalle para que yo pueda entenderlo.
8. Quiero saber por qué un diodo emisor de luz produce luz. Hábleme sobre ello.
9. ¿Los huecos circulan en un conductor? ¿Por qué o por qué no? ¿Qué le sucede a los huecos cuando alcanzan el final de un semiconductor?
10. ¿Qué es la corriente superficial de fugas?
11. ¿Por qué es importante la recombinación en un diodo?
12. ¿En qué se diferencian el silicio extrínseco del intrínseco? ¿Por qué es importante la diferencia?
13. En sus propias palabras describa lo que sucede cuando se origina la unión *pn*. Su argumento debería incluir la información sobre la *zona de deplexión*.
14. En la unión *pn* de un diodo, ¿cuáles son las cargas portadoras que se mueven, huecos o electrones libres?

## PROBLEMAS

- 2-1. ¿Cuál es la carga neta de un átomo de cobre si gana tres electrones?
- 2-2. ¿Cuánto vale la carga neta de un átomo de silicio si pierde todos sus electrones de valencia?
- 2-3. Clasifique cada uno de los siguientes como un conductor o semiconductor:
  - a) Germanio
  - b) Plata
  - c) Silicio
  - d) Oro
- 2-4. Un diodo está polarizado en directa. Si la corriente es 5 mA a través del lado *n*, ¿cuál es la carga a través de cada uno de los siguientes:
  - a) Lado *p*
  - b) Cables de conexión externos
  - c) Unión
- 2-5. Clasifique cada uno de los siguientes como un semiconductor tipo *n* o tipo *p*:
  - a) Dopado por un átomo aceptador
  - b) Cristal con impurezas pentavalentes
  - c) Los portadores mayoritarios son huecos
  - d) Se añadieron átomos donadores al cristal
  - e) Los portadores minoritarios son electrones
- 2-6. Un diseñador debe utilizar un diodo de silicio entre las temperaturas de 0 °C a 75 °C. ¿Cuáles serán los valores mínimo y máximo de la barrera de potencial?
- 2-7. Un diodo de silicio tiene una corriente de saturación de 10 nA a 25 °C. Si debe funcionar en el rango de 0 °C a 75 °C, ¿cuáles serán los valores máximos y mínimos de la corriente de saturación?
- 2-8. Un diodo presenta una corriente superficial de fugas a 10 nA cuando su tensión inversa es de 10 V. ¿Cuál será su corriente superficial de fugas si la tensión inversa crece hasta 50 V?

## PROBLEMAS DE MAYOR DIFICULTAD

- 2-9. Un diodo de silicio tiene una corriente inversa de 5  $\mu$ A a 25 °C y 100  $\mu$ A a 100 °C. ¿Cuáles son los valores de la corriente de saturación y la corriente superficial de fugas a 25 °C?
- 2-10. Los dispositivos con uniones *pn* se utilizan para fabricar ordenadores. La velocidad de un ordenador depende de lo rápido que se pueda «encender» y «apagar» un diodo. Basándose en lo que ha aprendido sobre polarización inversa, ¿qué puede hacer para acelerar un ordenador?