

CAPÍTULO

Diodos semiconductores

1



1.1 INTRODUCCIÓN

Unas cuantas décadas que han seguido a la introducción del transistor, hacia finales de los años cuarenta, han sido testigo de un cambio asombroso en la industria de la electrónica. La miniaturización que se ha logrado nos deja sorprendidos de sus alcances. Sistemas completos aparecen ahora sobre una oblea de silicio, miles de veces más pequeña que un solo elemento de las redes iniciales. Las ventajas asociadas con los sistemas actuales, comparados con las redes de bulbos de los años anteriores, resultan, en su mayor parte, obvias de inmediato: son más pequeños y ligeros, no tienen requerimientos de calentamiento o disipación de calor (como en el caso de los bulbos), tienen una construcción más robusta, son más eficientes y no requieren de un periodo de calentamiento.

La miniaturización desarrollada en los años recientes ha dado por resultado sistemas tan pequeños que ahora el propósito básico del encapsulado sólo es obtener algunos medios para manipular el dispositivo y asegurar que las conexiones permanezcan fijas en forma adecuada en la base del semiconductor. Los límites de la miniaturización dependen de tres factores: la calidad del material semiconductor, la técnica del diseño de redes y los límites de la manufactura y el equipo de procesamiento.

1.2 EL DIODO IDEAL

El primer dispositivo electrónico que se presenta es el que se denomina *diodo*, el más sencillo de los dispositivos semiconductores, pero que desempeña un papel muy importante en los sistemas electrónicos. Con sus características, que son muy similares a las de un interruptor sencillo, aparece en una amplia variedad de aplicaciones, que van desde las más sencillas a las más complejas. Además de los detalles de su construcción y características, los datos y gráficas importantes se encontrarán en las hojas de especificaciones y también se estudiarán con objeto de asegurar una comprensión de la terminología que se utiliza, aparte de demostrar la riqueza de la información que los fabricantes suelen proporcionar.

Antes de analizar la construcción y las características de un dispositivo real, primero se considerará el dispositivo ideal para ofrecer una base de comparación. El *diodo ideal* es un dispositivo con *dos terminales*, que tiene el símbolo y características que se muestran en la figura 1.1a y b, respectivamente.

De manera ideal, un diodo conducirá corriente en la dirección que define la flecha en el símbolo, y actuará como un circuito abierto en cualquier intento por establecer corriente en dirección opuesta. En esencia:

Las características de un diodo ideal son aquellas de un interruptor que puede conducir corriente en una sola dirección.

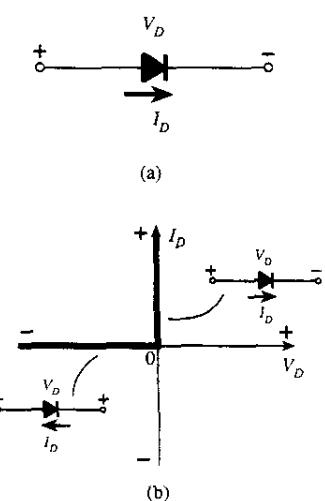


Figura 1.1 Diodo ideal: a) símbolo; b) características.



En la descripción de los elementos que se presentan a continuación es importante que se definan los diferentes *símbolos de letras, polaridades de voltajes y direcciones de la corriente*. Si la polaridad del voltaje aplicado es consistente con el que se muestra en la figura 1.1a, las características que deben ser consideradas en la figura 1.1b están hacia la derecha del eje vertical. En caso de que se aplique un voltaje inverso, son pertinentes las características hacia la izquierda del eje. Si la corriente a través del diodo tiene la dirección que se indica en la figura 1.1a, la porción de las características que deben considerarse es arriba del eje horizontal, mientras que una inversión en la dirección requeriría del empleo de las características abajo del eje. Para la mayoría de las características de los dispositivos que aparecen en este libro, la *ordenada* (o eje "y") será el eje de la *corriente*, en tanto la *abscisa* (o eje "x") será el eje del *voltaje*.

Uno de los parámetros importantes para el diodo es la resistencia en el punto o la región de operación. Si se considera la región de conducción definida por la dirección de I_D y polaridad de V_D en la figura 1.1a (el cuadrante superior derecho de la figura 1.1b), se deduce que el valor de la resistencia directa, R_F , según lo define la ley de Ohm, es

$$R_F = \frac{V_F}{I_F} = \frac{0 \text{ V}}{2, 3, \text{ mA}, \dots, \text{sólo un valor positivo}} = 0 \Omega \quad (\text{corto circuito})$$

donde V_F es el voltaje de polarización directa a través del diodo e I_F es la corriente a través del diodo.

Por tanto, el diodo ideal es un circuito cerrado para la región de conducción.

Si ahora se considera la región de potencial negativo aplicado (tercer cuadrante) de la figura 1.1b,

$$R_R = \frac{V_R}{I_R} = \frac{-5, -20, \text{ o cualquier potencial de polarización inversa}}{0 \text{ mA}} = \infty \Omega \quad (\text{circuito abierto})$$

donde V_R es el voltaje inverso a través del diodo e I_R es la corriente inversa en el diodo.

Por tanto, el diodo ideal es un circuito abierto en la región de no conducción.

En resumen, son aplicables las condiciones que se describen en la figura 1.2.

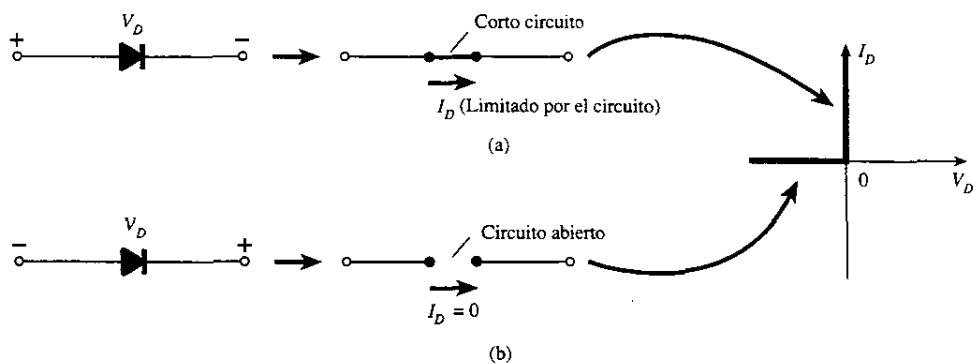


Figura 1.2 a) Estados de conducción y b) no conducción del diodo ideal según está determinado por la polarización aplicada.

Por lo general, resulta sencillo hasta cierto punto determinar si un diodo se encuentra en la región de conducción o de no conducción, al observar la dirección de la corriente I_D que se establece mediante un voltaje aplicado. Para el flujo convencional (opuesto al flujo de electrones), si la corriente resultante del diodo tiene la misma dirección que la punta de la flecha del símbolo del diodo, éste está operando en la región de conducción, según se describe en la figura 1.3a. Si la corriente resultante tiene la dirección opuesta, como se muestra en la figura 1.3b, el circuito abierto equivalente es el apropiado.

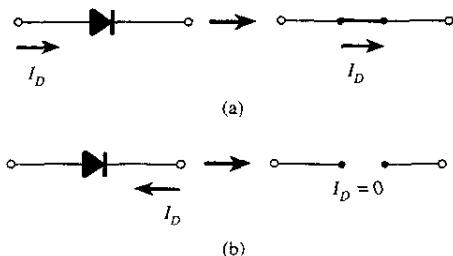


Figura 1.3 a) Estados de conducción y b) no conducción del diodo ideal, según está determinado por la dirección de la corriente convencional establecida por la red.

Como se indicó antes, el propósito inicial de esta sección es presentar las características de un dispositivo ideal para poder compararlas con las características de la variedad comercial. Según se avance a través de las próximas secciones, se deben considerar las siguientes preguntas:

¿Qué tan cercana será la resistencia directa o de “encendido” de un diodo práctico comparado con el nivel 0-Ω deseado?

¿Es la resistencia inversa parcial lo suficientemente grande como para permitir una aproximación de circuito abierto?

1.3 MATERIALES SEMICONDUCTORES

El término *semiconductor* revela por sí mismo una idea de sus características. El prefijo *semi* suele aplicarse a un rango de niveles situado a la mitad entre dos límites.

El término conductor se aplica a cualquier material que soporte un flujo generoso de carga, cuando una fuente de voltaje de magnitud limitada se aplica a través de sus terminales.

Un aislante es un material que ofrece un nivel muy bajo de conductividad bajo la presión de una fuente de voltaje aplicada.

Un semiconductor, por tanto, es un material que posee un nivel de conductividad sobre algún punto entre los extremos de un aislante y un conductor.

De manera inversa, y relacionada con la conductividad de un material, se encuentra su resistencia al flujo de la carga o corriente. Esto es, mientras más alto es el nivel de conductividad, menor es el nivel de resistencia. En las tablas, el término *resistividad* (ρ , la letra griega rho) se utiliza a menudo para comparar los niveles de resistencia de los materiales. En unidades métricas, la resistividad de un material se mide en $\Omega\text{-cm}$ o $\Omega\text{-m}$. Las unidades de $\Omega\text{-cm}$ se derivan de la sustitución de las unidades para cada cantidad de la figura 1.4 en la siguiente ecuación (derivada de la ecuación básica de resistencia $R = \rho l/A$):

$$\rho = \frac{RA}{l} = \frac{(\Omega)(\text{cm}^2)}{\text{cm}} \Rightarrow \Omega\text{-cm} \quad (1.1)$$

De hecho, si el área de la figura 1.4 es de 1 cm^2 y la longitud de 1 cm , la magnitud de la resistencia del cubo de la figura 1.4 es igual a la magnitud de la resistividad del material según se demuestra a continuación:

$$|R| = \rho \frac{l}{A} = \rho \frac{(1 \text{ cm})}{(1 \text{ cm}^2)} = |\rho| \text{ ohms}$$

Este hecho será de utilidad cuando se comparan los niveles de resistividad en los análisis que se presentan enseguida.

En la tabla 1.1 se muestran los valores típicos de resistividad para tres categorías amplias de materiales. Aunque se pueda estar familiarizado con las propiedades eléctricas del cobre y la mica, las características de los materiales semiconductores, germanio (Ge) y silicio (Si), pue-

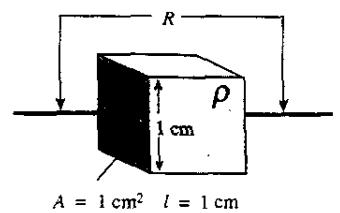


Figura 1.4 Definición de las unidades métricas de resistividad.



TABLA 1.1 Valores típicos de resistividad

Conductor	Semiconductor	Aislante
$\rho \approx 10^{-6} \Omega\text{-cm}$ (cobre)	$\rho \approx 50 \Omega\text{-cm}$ (germanio) $\rho \approx 50 \times 10^3 \Omega\text{-cm}$ (silicio)	$\rho \approx 10^{12} \Omega\text{-cm}$ (mica)

den ser relativamente nuevas. Como se encontrará en los capítulos que siguen, ciertamente no son los únicos dos materiales semiconductores; sin embargo, son los que más interesan en el desarrollo de dispositivos semiconductores. En años recientes el cambio ha sido estable con el silicio, pero no así con el germanio, cuya producción aún es escasa.

Observe en la tabla 1.1 el rango tan grande entre los materiales conductores y aislantes para la longitud de 1 cm (un área de 1-cm²) de material. Dieciocho lugares separan la colocación del punto decimal de un número a otro. Ge y Si han recibido la atención que tienen por varias razones. Una consideración muy importante es el hecho de que pueden ser fabricados con un muy alto nivel de pureza. De hecho, los avances recientes han reducido los niveles de impureza en el material puro a una parte por cada 10 mil millones (1 : 10 000 000 000). Es posible que alguien se pregunte si estos niveles de impureza son realmente necesarios. En realidad lo son si se considera que la adición de una parte de impureza (del tipo adecuado) por millón, en una oblea de silicio, puede cambiar dicho material de un conductor relativamente pobre a un buen conductor de electricidad. Como es obvio, se está manejando un espectro completamente nuevo de niveles de comparación, cuando se trata con el medio de los semiconductores. La capacidad de cambiar las características del material en forma significativa a través de este proceso, que se conoce como "dopado", es otra razón más por la cual el Ge y el Si han recibido tanta atención. Otras razones incluyen el hecho de que sus características pueden alterarse en forma significativa a través de la aplicación de calor o luz, una consideración importante en el desarrollo de dispositivos sensibles al calor o a la luz.

Algunas de las cualidades únicas del Ge y el Si que se observaron antes se deben a su estructura atómica. Los átomos de ambos materiales forman un patrón muy definido que es periódico en naturaleza (esto es que continuamente se repite el mismo). A un patrón completo se le llama *cristal*, y al arreglo periódico de los átomos, *red cristalina*. Para el Ge y el Si el cristal tiene la estructura de diamante de tres dimensiones que se muestra en la figura 1.5. Cualquier material compuesto sólo de estructuras repetidas de cristal del mismo tipo se denomina estructura de *cristal único*. Para los materiales semiconductores de aplicación práctica en el campo de la electrónica, esta característica de cristal único existe y, además, la periodicidad de la estructura no cambia en forma significativa con la adición de impurezas en el proceso de dopado.

Ahora, se examinará la estructura del átomo en sí y se observará cómo se pueden afectar las características eléctricas del material. Como se tiene entendido, el átomo se compone de tres partículas básicas: el *electrón*, el *protón* y el *neutrón*. En la red atómica, los neutrones y los protones forman el *núcleo*, mientras que los electrones se mueven alrededor del núcleo sobre una *órbita* fija. Los modelos de Bohr de los semiconductores que se usan con mayor frecuencia, el *germanio* y el *silicio*, se muestran en la figura 1.6.

Como se indica en la figura 1.6a, el átomo de germanio tiene 32 electrones en órbita, mientras que el silicio tiene 14 electrones en varias órbitas. En cada caso, existen cuatro electrones en la órbita exterior (*valencia*). El potencial (*potencial de ionización*) que se requiere para movilizar cualquiera de estos cuatro electrones de valencia, es menor que el requerido por cualquier otro electrón dentro de la estructura. En un cristal puro de germanio o de silicio estos cuatro electrones de valencia se encuentran unidos a cuatro átomos adjuntos, como se muestra en la figura 1.7 para el silicio. Tanto el Ge como el Si son referidos como *átomos tetravalentes*, porque cada uno tiene cuatro electrones de valencia.

Una unión de átomos fortalecida por el compartimiento de electrones se denomina unión covalente.

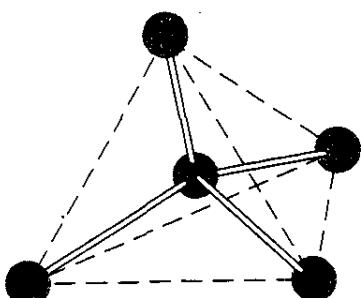


Figura 1.5 Estructura de un solo cristal de Ge y Si.

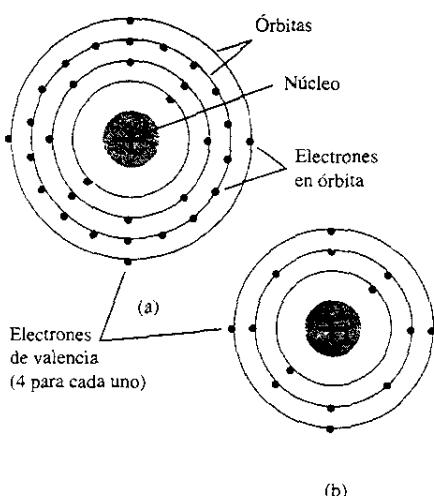


Figura 1.6 Estructura atómica: a) germanio; b) silicio.

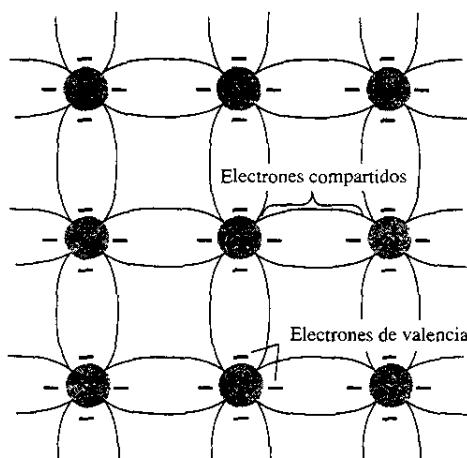


Figura 1.7 Unión covalente del átomo de silicio.

Si bien la unión covalente generará una unión más fuerte entre los electrones de valencia y su átomo, aún es posible para los electrones de valencia absorber suficiente energía cinética por causas naturales, para romper la unión covalente y asumir el estado “libre”. El término “libre” revela que su movimiento es muy sensible a los campos eléctricos aplicados, como los establecidos por las fuentes de voltaje o cualquier diferencia de potencial. Estas causas naturales incluyen efectos como la energía lumínica en la forma de fotones y la energía térmica del medio que lo rodea. A temperatura ambiente existen aproximadamente 1.5×10^{10} portadores libres en un centímetro cúbico de material intrínseco de silicio.

Los materiales intrínsecos son aquellos semiconductores que han sido cuidadosamente refinados para reducir las impurezas a un nivel muy bajo, esencialmente tan puro como se puede obtener a través de la tecnología moderna.

A los electrones libres localizados en el material que se deben sólo a causas naturales, se les conoce como *portadores intrínsecos*. A la misma temperatura, el material intrínseco de germanio tendrá aproximadamente 2.5×10^{13} transmisores libres por centímetro cúbico. La relación del número de portadores en el germanio respecto al silicio es mayor de 10^3 e indica que el germanio es un mejor conductor a temperatura ambiente. Esto puede ser cierto, aunque en el estado intrínseco ambos aún son considerados conductores pobres. Observe en la tabla 1.1 cómo la resistividad también difiere por una relación de aproximadamente 1000 : 1 con el silicio, teniendo, por tanto, un mayor valor. Por supuesto, éste debe ser el caso, debido a que la resistividad y la conductividad son inversamente proporcionales.

Un incremento en la temperatura de un semiconductor puede generar un incremento sustancial en el número de electrones libres en el material.

Según aumenta la temperatura desde el cero absoluto (0 K), un número mayor de electrones de valencia absorben suficiente energía térmica como para romper la unión covalente y contribuir así al número de portadores libres, según se describió antes. Este mayor número de portadores aumentará el índice de conductividad y generará un menor nivel de resistencia.

Se dice que los materiales semiconductores como el Ge y el Si, que muestran una reducción en resistencia con el incremento en la temperatura, tienen un coeficiente de temperatura negativo.

Quizá el lector recuerde que la resistencia de casi todos los conductores se incrementará con la temperatura. Esto se debe al hecho de que el número de portadores en un conductor no



se incrementará significativamente con la temperatura, pero su patrón de vibración con respecto a una localización relativamente fija aumentará la dificultad para que los electrones pasen a través de ella. Un incremento en la temperatura, por tanto, genera un aumento del nivel de resistencia y un *coeficiente positivo de temperatura*.

1.4 NIVELES DE ENERGÍA

En la estructura atómica aislada existen niveles de energía discretos (individuales) asociados con cada electrón en una órbita, según se muestra en la figura 1.8a. Cada material tendrá, de hecho, su propio conjunto de niveles de energía permisibles para los electrones en su estructura atómica.

Mientras más distante se encuentre el electrón del núcleo, mayor es el estado de energía, y cualquier electrón que haya dejado a su átomo, tiene un estado de energía mayor que cualquier electrón en la estructura atómica.

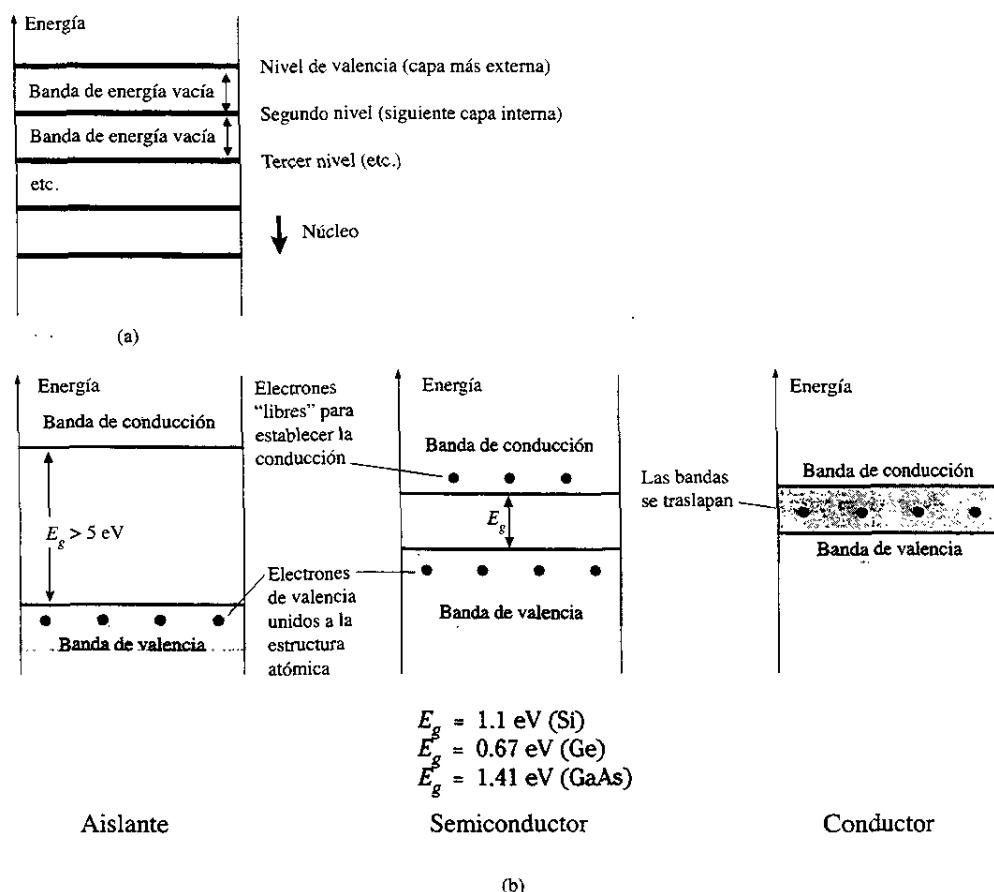


Figura 1.8 Niveles de energía: a) niveles discretos en estructuras atómicas aisladas; b) bandas de conducción y valencia de un aislador, semiconductor y conductor.

Entre los niveles de energía discretos existen bandas vacías, en las cuales no pueden aparecer electrones dentro de la estructura atómica aislada. Cuando los átomos de un material se unen para formar la estructura de la red cristalina, existe una interacción entre los átomos que ocasiona que los electrones dentro de una órbita en particular de un átomo tengan ligeras diferencias en sus niveles de energía, respecto a los electrones en la misma órbita de un átomo adjunto. El resultado neto es una expansión de la banda de los niveles discretos de estados de energía posibles para los electrones de valencia, como se muestra en la figura 1.8b. Observe que existen niveles y estados de energía máximos en los cuales se puede encontrar cualquier electrón, y una *región prohibida* entre la banda de valencia y el nivel de ionización. Recuerde que la ionización es el mecanismo mediante el cual un electrón puede absorber suficiente



energía para separarse de su estructura atómica y entrar en la banda de conducción. Se observará que la energía asociada con cada electrón se mide en *electrón volts* (eV). La unidad de medida es adecuada, porque

$$W = QV \quad \text{eV} \quad (1.2)$$

según se derivó de la ecuación definida para el voltaje $V = W/Q$. Q es la carga asociada con un único electrón.

Sustituyendo la carga de un electrón y una diferencia de potencial de 1 volt en la ecuación (1.2) se tiene un nivel de energía referido como un *electrón volt*. Debido a que la energía también se mide en joules y que la carga de un electrón = 1.6×10^{-19} coulomb,

$$W = QV = (1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(1 \text{ V})$$

$$\text{y} \quad 1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J} \quad (1.3)$$

A 0 K o cero absoluto (-273.15°C), todos los electrones de valencia de los materiales semiconductores se encuentran en la capa exterior del átomo con niveles de energía asociados con la banda de valencia de la figura 1.8b. Sin embargo, a temperatura ambiente (300 K, 25°C) un gran número de electrones de valencia han adquirido suficiente energía para dejar la banda de valencia, y han atravesado la banda de energía vacía definida por E_g en la figura 1.8b y entrado a la banda de conducción. Para el silicio E_g es de 1.1 eV, para el germanio 0.67 eV y para el arseniuro de galio 1.41 eV. Para el germanio, E_g obviamente es menor, y se debe al gran número de portadores en dicho material, comparado al silicio expuesto a temperatura ambiente. Observe que para el aislante la banda de energía es con frecuencia de 5 eV o más, lo cual limita drásticamente el número de electrones que pueden entrar a la banda de conducción a temperatura ambiente. El conductor tiene electrones en la banda de conducción aun a 0 K. Por tanto, es bastante obvio que a temperatura ambiente existan portadores libres más que suficientes para soportar un gran flujo de carga o corriente.

En la sección 1.5 encontrará que si ciertas impurezas se añaden a los materiales semiconductores intrínsecos, ocurrirán estados de energía en las bandas prohibidas, lo que causará una reducción neta en E_g para ambos materiales semiconductores y, por consecuencia, también una mayor densidad de portadores en la banda de conducción a temperatura ambiente.

1.5 MATERIALES EXTRÍNSECOS: TIPO *n* Y TIPO *p*

Las características de los materiales semiconductores pueden ser alteradas significativamente por la adición de ciertos átomos de impureza a un material semiconductor relativamente puro. Estas impurezas, aunque sólo haya sido añadida 1 parte en 10 millones, pueden alterar en forma suficiente la estructura de la banda y cambiar totalmente las propiedades eléctricas del material.

Un material semiconductor que haya sido sujeto al proceso de dopado se denomina un material extrínseco.

Existen dos materiales extrínsecos de gran importancia para la fabricación de dispositivos semiconductores: el tipo *n* y el tipo *p*. Cada uno se describirá con detalle más adelante.

Material tipo *n*

Tanto el material tipo *n* como el tipo *p* se forman mediante la adición de un número predeterminado de átomos de impureza al germanio o al silicio. El tipo *n* se crea a través de la introducción de elementos de impureza que poseen *cinco* electrones de valencia (*pentavalentes*), como el *antimonio*, *arsénico* y *fósforo*. El efecto de estos elementos impuros se indica en la figura 1.9

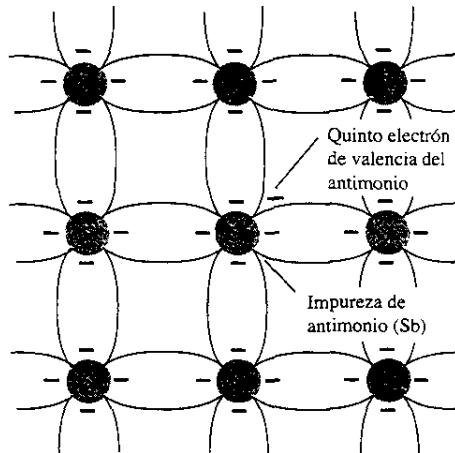


Figura 1.9 Impureza de antimonio en el material tipo *n*.

(utilizando el antimonio como impureza en el silicio). Observe que las cuatro uniones covalentes aún se encuentran presentes. Existe, sin embargo, un quinto electrón adicional debido al átomo de impureza, mismo que se encuentra *desasociado* de cualquier unión covalente en particular. Este electrón restante, unido débilmente a su átomo (antimonio), se encuentra relativamente libre para moverse dentro del recién formado material tipo *n*. Debido a que el átomo de impureza insertado ha donado un electrón relativamente “libre” a la estructura:

A las impurezas difundidas con cinco electrones de valencia se les llama átomos donores.

Es importante comprender que, aunque un número importante de portadores “libres” se han creado en el material tipo *n*, éste aún es eléctricamente *neutral*, debido a que de manera ideal el número de protones cargados positivamente en los núcleos es todavía igual al número de electrones “libres” cargados negativamente y en órbita en la estructura.

El efecto de este proceso de dopado sobre la conductividad relativa se describe mejor a través del diagrama de bandas de energía de la figura 1.10. Observe que un nivel de energía discreto (llamado el *nivel del donor*) aparece en la banda prohibida con un E_g significativamente menor que aquel del material intrínseco. Aquellos electrones “libres” que se deben a la impureza añadida se sitúan en este nivel de energía, y tienen menor dificultad para absorber la energía térmica suficiente para moverse a la banda de conducción a temperatura ambiente. El resultado es que a temperatura ambiente existe un gran número de portadores (electrones) en el nivel de conducción, y la conductividad del material aumenta en forma significativa. A temperatura ambiente en un material de Si intrínseco existe aproximadamente un electrón libre por cada 10^{12} átomos (uno por cada 10^9 para Ge). Si el nivel de “dosificación” fuera de 1 en 10 millones (10^7), la proporción ($10^{12}/10^7 = 10^5$) indicaría que la concentración de portadores se ha incrementado en una proporción de 100,000 : 1.

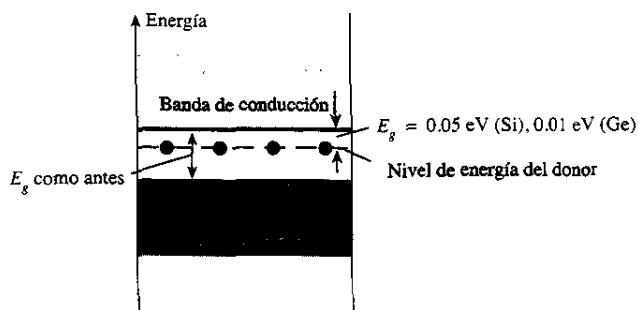


Figura 1.10 Efecto de las impurezas del donor sobre la estructura de la banda de energía.

Material tipo *p*

El material tipo *p* se forma mediante el dopado de un cristal puro de germanio o de silicio con átomos de impureza que poseen *tres* electrones de valencia. Los elementos que se utilizan con mayor frecuencia para este propósito son el *boro*, *galio* e *indio*. El efecto de alguno de estos elementos, como el boro sobre el silicio, se indica en la figura 1.11.

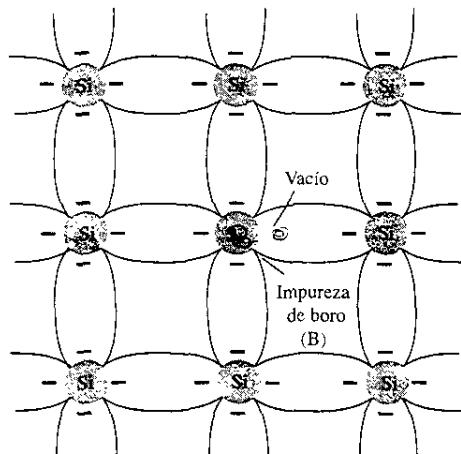


Figura 1.11 Impureza de boro en el material tipo *p*.

Observe que ahora existe un número de electrones insuficiente para completar las uniones covalentes de la red cristalina recién formada. A la vacante que resulte se le llama *hueco*, y está representado por un pequeño círculo o signo positivo debido a la ausencia de una carga negativa. Por tanto, la vacante resultante *aceptará* con facilidad un electrón “libre”:

A las impurezas difundidas con tres electrones de valencia se les conoce como átomos aceptores.

El material resultante tipo *p* es eléctricamente neutro, por las mismas razones descritas para el material tipo *n*.

Flujo de electrones comparado con flujo de huecos

El efecto del hueco sobre la conducción se muestra en la figura 1.12. Si un electrón de valencia adquiere suficiente energía cinética para romper su unión covalente y llena un hueco, entonces se creará un hueco en la unión covalente que liberó el electrón. Sin embargo, existe una transferencia de huecos hacia la izquierda y de electrones hacia la derecha, según se muestra en la figura 1.12. La dirección que se utilizará en el texto es la del *flujo convencional*, el cual se indica por la dirección del flujo de huecos.

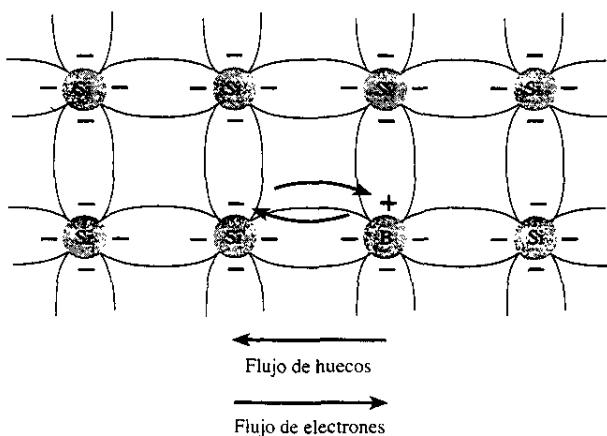
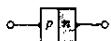


Figura 1.12 Flujo de electrones en función de flujo de huecos.



Portadores mayoritarios y minoritarios

En el estado intrínseco, el número de electrones libres en Ge o en Si se debe sólo a aquellos electrones en la banda de valencia que han adquirido suficiente energía de las fuentes térmicas o lumínicas para romper la unión covalente o a las pocas impurezas que no pudieron eliminarse. Las “vacantes” dejadas atrás en la estructura de uniones covalentes representan una cantidad muy limitada de huecos. En un material tipo *n*, el número de huecos no ha cambiado de manera significativa de su nivel intrínseco. El resultado neto, por tanto, es que el número de electrones supera por mucho el número de huecos. Por esta razón:

*En un material tipo *n* (figura 1.13a) al electrón se le llama portador mayoritario y el hueco es el portador minoritario.*

Para el material tipo *p* el número de huecos supera por mucho el número de electrones, como se muestra en la figura 1.13b. Por tanto:

*En un material tipo *p* el hueco es el portador mayoritario y el electrón es el portador minoritario.*

Cuando el quinto electrón de un átomo donor deja a su átomo, el átomo restante adquiere una carga positiva neta: de ahí el signo positivo en la representación del ion donor. Por razones análogas, el signo negativo aparece en el ion aceptor.

Los materiales tipo *n* y *p* representan los bloques de construcción básicos de los dispositivos semiconductores. En la siguiente sección se encontrará que la “unión” de un solo material tipo *n* con un material tipo *p* tendrá por resultado un elemento semiconductor de importancia considerable en los sistemas electrónicos.

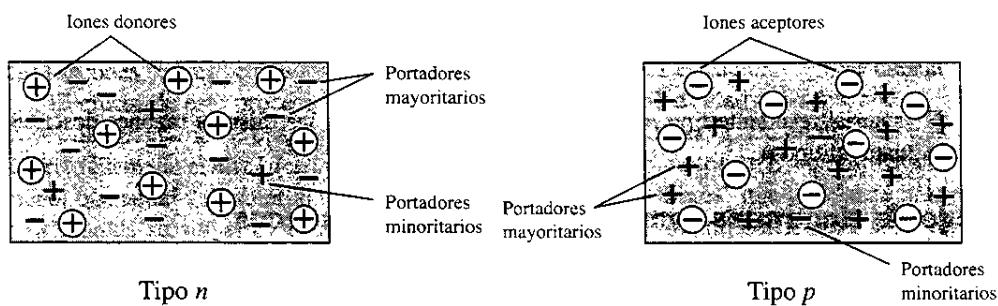


Figura 1.13 a) material tipo *n*; b) material tipo *p*.

1.6 DIODO SEMICONDUCTOR

En la sección 1.5 se presentaron tanto los materiales tipo *n* como tipo *p*. El diodo semiconductor se forma con sólo juntar estos materiales (construidos en la misma base: Ge o Si), según se muestra en la figura 1.14, utilizando técnicas que se describirán en el capítulo 20. En el momento en que son “unidos” los dos materiales, los electrones y los huecos en la región de la unión se combinan, dando por resultado una falta de portadores en la región cercana a la unión.

A esta región de iones positivos y negativos descubiertos se le llama región de agotamiento, debido al agotamiento de portadores en esta región.

Como el diodo es un dispositivo de dos terminales, la aplicación de un voltaje a través de sus terminales permite tres posibilidades: *sin polarización* ($V_D = 0$ V), *polarización directa* ($V_D > 0$ V) y *polarización inversa* ($V_D < 0$ V). Cada una es una condición que dará un resultado que el usuario deberá comprender con claridad para que el dispositivo se aplique en forma efectiva.

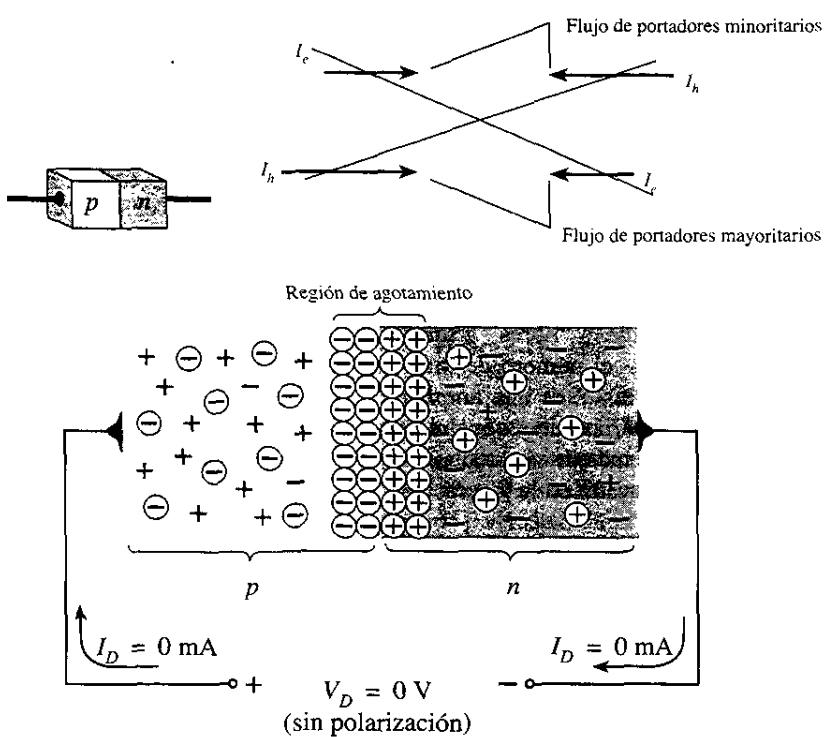


Figura 1.14 Unión $p-n$ sin polarización externa.

Sin polarización aplicada ($V_D = 0 \text{ V}$)

Bajo condiciones sin polarización, cualquiera de los portadores minoritarios (huecos) en el material tipo n que se encuentren dentro de la región de agotamiento, pasarán directamente al material tipo p . Mientras más cercano se encuentre el portador minoritario a la unión, mayor será la atracción de la capa de iones negativos y menor la oposición de los iones positivos en la región de agotamiento del material tipo n . Con la idea de que surjan análisis futuros, se supone que todos los portadores minoritarios del material tipo n que se localizan en la región de agotamiento debido a su movimiento aleatorio pasarán directamente al material tipo p . Se puede considerar que algo similar pasa con los portadores minoritarios (electrones) del material tipo p . Este flujo de portadores se indica en la figura 1.14 para los portadores minoritarios de cada material.

Los portadores mayoritarios (electrones) del material tipo n deben sobreponerse a las fuerzas de atracción de la capa de iones positivos del material tipo n , y a la capa de iones negativos en el material tipo p , con el fin de migrar hacia el área localizada más allá del área de agotamiento del material tipo p . Sin embargo, en el material tipo n el número de portadores mayoritarios es tan grande que invariablemente habrá un pequeño número de portadores mayoritarios con suficiente energía cinética para pasar a través de la región de agotamiento hacia el material tipo p . Una vez más, la misma consideración se puede aplicar a los portadores mayoritarios (huecos) del material tipo p . El flujo resultante debido a los portadores mayoritarios también se describe en la figura 1.14.

Si se examina con cuidado la figura 1.14, se observará que las magnitudes relativas de los vectores de flujo son tales que el flujo neto en cualquier dirección es igual a cero. Esta cancelación de los vectores se indica por medio de las líneas cruzadas. La longitud del vector que representa el flujo de huecos se dibujó en una escala mayor que el flujo de los electrones con objeto de demostrar que la magnitud de cada uno no necesariamente debe ser la misma para la cancelación del flujo, y que los niveles de dopado para cada material pueden dar como resultado un flujo de portadores desigual de electrones y huecos. En resumen:

En ausencia de un voltaje de polarización aplicado, el flujo neto de la carga en cualquier dirección para un diodo semiconductor es cero.

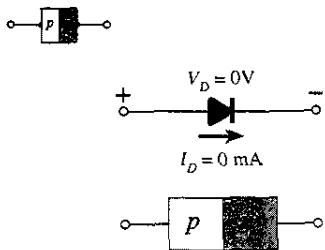


Figura 1.15 Condiciones para un diodo semiconductor sin polarización.

El símbolo para el diodo se repite en la figura 1.15 con las regiones tipo *n* y tipo *p* asociadas. Observe que la flecha está asociada con el componente tipo *p* y la barra con la región de tipo *n*. Como se indicó, para $V_D = 0$ V, la corriente en cualquier dirección es 0 mA.

Condición de polarización inversa ($V_D < 0$ V)

Si un potencial externo de V volts se aplica a través de la unión *p-n* de tal forma que la terminal positiva se encuentre conectada con el material tipo *n* y la terminal negativa esté conectada con el material tipo *p* como se muestra en la figura 1.16, el número de iones positivos en la región de agotamiento del material tipo *n* se incrementará debido al gran número de electrones "libres" atraídos por el potencial positivo del voltaje aplicado. Por razones similares, el número de iones negativos se incrementará en el material tipo *p*. El efecto neto, por tanto, es una ampliación de la región de agotamiento. Dicha ampliación establecerá una barrera de potencial demasiado grande para ser superada por los portadores mayoritarios, además de una reducción efectiva del flujo de los portadores mayoritarios a cero, como se muestra en la figura 1.16.

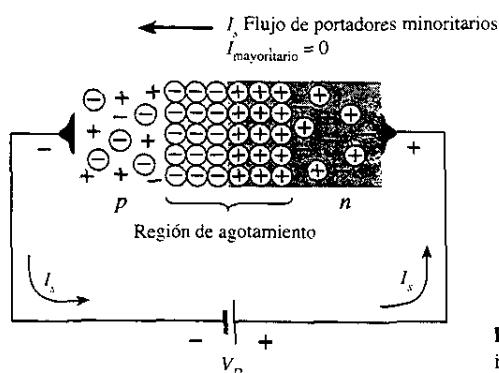


Figura 1.16 Unión *p-n* con polarización inversa.

Sin embargo, el número de portadores minoritarios que están entrando a la región de agotamiento no cambiarán, y dan como resultado vectores de flujo de portadores minoritarios de la misma magnitud que sin voltaje aplicado, como lo indica la figura 1.14.

A la corriente que existe bajo las condiciones de polarización inversa se le llama corriente de saturación inversa, y se representa mediante I_s .

La corriente de saturación inversa rara vez es mayor que unos cuantos microamperes, con excepción de los dispositivos de alta potencia. De hecho, en años recientes se encontró que su nivel está casi siempre en el rango de nanoamperes para dispositivos de silicio, y en el rango de microamperes para el germanio. El término *saturación* proviene del hecho de que alcanza su máximo nivel con rapidez y no cambia de manera significativa con el incremento del potencial de polarización inversa, como se muestra en las características de los diodos de la figura 1.19 para $V_D < 0$ V. Las condiciones de polarización inversa se describen en la figura 1.17 para el símbolo de diodo y la unión *p-n*. Observe, en particular, que la dirección de I_s es contra la flecha del símbolo. A su vez, que el potencial *negativo* está conectado al material tipo *p* y el potencial *positivo* al material tipo *n*, y que la diferencia en las literales subrayadas para cada región revela una condición de polarización inversa.

Condición de polarización directa ($V_D > 0$ V)

Una condición de *polarización directa* o "encendido" se establece al aplicar el potencial positivo al material tipo *p* y el potencial negativo al material tipo *n*, como lo muestra la figura 1.18. Por tanto, para mayor referencia:

Un diodo semiconductor tiene polarización directa cuando se ha establecido la asociación tipo p y positivo y tipo n y negativo.

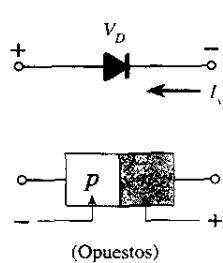


Figura 1.17 Condiciones de polarización inversa para un diodo semiconductor.

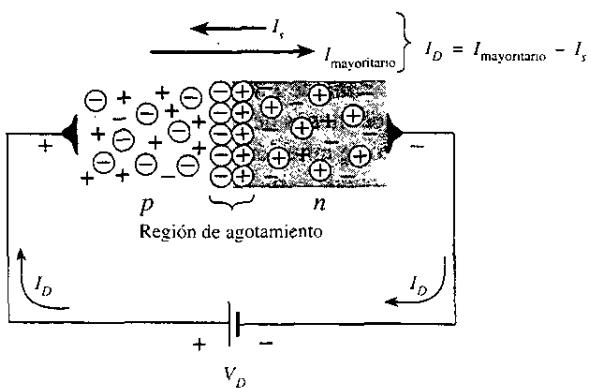


Figura 1.18 Unión *p-n* con polarización directa.

La aplicación de un potencial de polarización directa V_D “presionará” los electrones en el material tipo *n* y los huecos en el material tipo *p* para que se recombinen con los iones cercanos a la unión y reducirá el ancho de la región de agotamiento como se indica en la figura 1.18. El flujo de electrones, portadores minoritarios, del material tipo *p* al material tipo *n* (y de los huecos del material tipo *n* al material tipo *p*) no ha cambiado en magnitud (debido a que el nivel de conducción se encuentra controlado básicamente por el número limitado de impurezas en el material), pero la reducción en el ancho de la región de agotamiento ha generado un gran flujo de portadores mayoritarios a través de la unión. Ahora, un electrón de material tipo *n* “observa” una barrera muy reducida en la unión, debido a la pequeña región de agotamiento y a una fuerte atracción del potencial positivo aplicado al material tipo *p*. Mientras se incremente en magnitud la polarización aplicada, la región de agotamiento continuará disminuyendo su anchura hasta que un flujo de electrones pueda pasar a través de la unión, lo que da como resultado un incremento exponencial en la corriente, como se muestra en la región de polarización directa de las caracte-

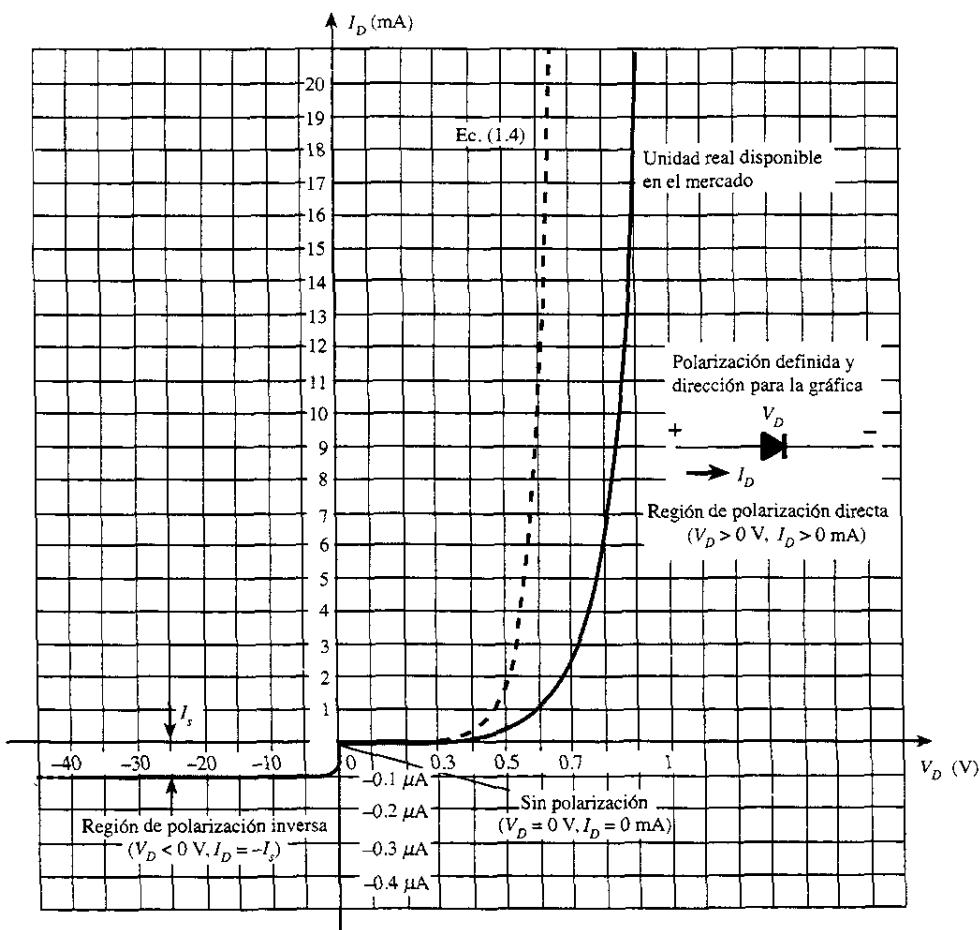


Figura 1.19 Características del diodo semiconductor de silicio.



rísticas de la figura 1.19. Observe que la escala vertical de la figura 1.19 está en miliamperes (aunque algunos diodos semiconductores tendrán una escala vertical en amperes), y la escala horizontal en la región de polarización directa tiene un máximo de 1 V. Por tanto, en general, el voltaje a través de un diodo de polarización directa será de menos de 1 V. Observe también la rapidez con que se incrementa la corriente después del punto de inflexión de la curva de respuesta.

A través del empleo de la física del estado sólido se puede demostrar que las características generales de un diodo semiconductor se pueden definir mediante la ecuación siguiente para las regiones de polarización directa e inversa:

$$I_D = I_s(e^{kV_D/T_K} - 1) \quad (1.4)$$

donde I_s = corriente de saturación inversa

K = $11,600 / \eta$ con $\eta = 1$ para Ge y $\eta = 2$ para Si en niveles relativamente bajos de corriente del diodo (en o abajo del punto de inflexión de la curva) y $\eta = 1$ para Ge y Si en mayores niveles de corriente del diodo (en la sección de crecimiento rápido de la curva)

$$T_K = T_C + 273^\circ$$

En la figura 1.19 se ofrece una gráfica de la ecuación (1.4). Si se expande la ecuación (1.4) en la forma siguiente, se puede describir con facilidad el componente de contribución para cada región de la figura 1.19:

$$I_D = I_s e^{kV_D/T_K} - I_s$$

Para valores positivos de V_D , el primer término de la ecuación anterior crecerá con mayor rapidez, y superará el efecto del segundo término. El resultado será positivo para los valores positivos de V_D e I_D , y crecerá de la misma manera que la función $y = e^x$, la cual aparece en la figura 1.20. En $V_D = 0$ V, la ecuación (1.4) se convierte en $I_D = I_s(e^0 - 1) = I_s(1 - 1) = 0$ mA, como aparece en la figura 1.19. Para valores negativos de V_D , el primer término disminuirá rápidamente debajo de I_s , dando como resultado $I_D = -I_s$, que es la línea horizontal de la figura 1.19. La ruptura de las características en $V_D = 0$ V se debe sólo al cambio drástico en la escala de mA a μ A.

Observe en la figura 1.19 que la unidad comercial disponible tiene características que se encuentran desplazadas a la derecha por unas cuantas décimas de un volt. Esto se debe a la resistencia interna del "cuerpo" y a la resistencia externa de "contacto" de un diodo. Cada una contribuye a un voltaje adicional sobre el mismo nivel de corriente, como lo determina la ley de Ohm ($V = IR$). Con el tiempo, mientras se mejoran los métodos de producción, esta diferencia disminuirá y las características reales se aproximarán a aquellas de la sección (1.4).

Es importante observar el cambio en la escala para los ejes vertical y horizontal. Para los valores positivos de I_D , la escala se encuentra en miliamperes y la escala de la corriente abajo del eje se calcula en microamperes (o posiblemente nanoamperes). Para V_D , la escala para los valores positivos está en décimas de volts y para los valores negativos la escala es en decenas de volts.

En un principio, la ecuación (1.4) parece algo compleja y es susceptible de generar un temor injustificado de que ésta se someterá a todas las aplicaciones subsecuentes de diodos. Sin embargo, afortunadamente en una sección posterior se hará un número de aproximaciones que eliminará la necesidad de aplicar la ecuación (1.4) y ofrecerá una solución con un mínimo de dificultad matemática.

Antes de dejar el tema del estado de polarización directa, las condiciones para la conducción (el estado "encendido") se repiten en la figura 1.21 con los requerimientos de polaridad y la dirección resultante del flujo de portadores mayoritarios. Observe en particular cómo la dirección de la conducción concuerda con la flecha en el símbolo (según se reveló para el diodo ideal).

Región Zener

Aunque la escala de la figura 1.19 se encuentra en múltiplos de diez volts en la región negativa, existe un punto en el cual la aplicación de un voltaje demasiado negativo dará por resultado un agudo cambio en las características, como lo muestra la figura 1.22. La corriente se incrementa

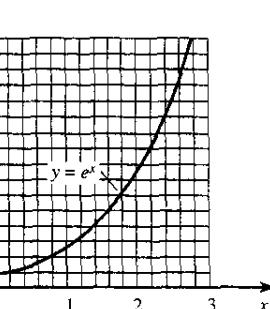


Figura 1.20 Gráfica de e^x .

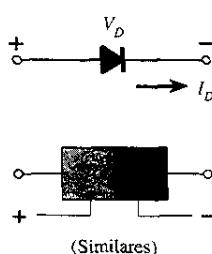


Figura 1.21 Condiciones de polarización directa para un diodo semiconductor.

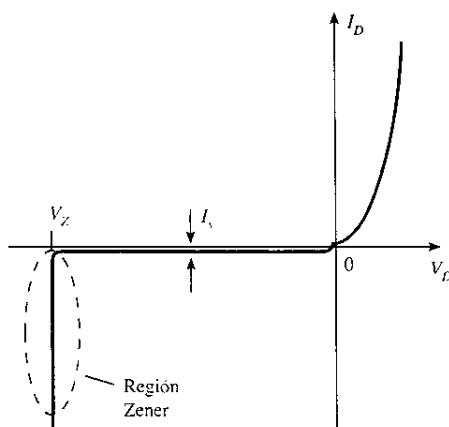


Figura 1.22 Región Zener.

a una velocidad muy rápida en una dirección opuesta a aquella de la región de voltaje positivo. El potencial de polarización inversa que da como resultado este cambio muy drástico de las características se le llama *potencial Zener* y se le da el símbolo V_Z .

Mientras el voltaje a través del diodo se incrementa en la región de polarización inversa, la velocidad de los portadores minoritarios responsables de la corriente de saturación inversa I_s también se incrementarán. Eventualmente, su velocidad y energía cinética asociada ($W_K = \frac{1}{2}mv^2$) será suficiente para liberar portadores adicionales por medio de colisiones con otras estructuras atómicas estables. Esto es, se generará un proceso de *ionización* por medio del cual los electrones de valencia absorben suficiente energía para dejar su átomo. Dichos portadores adicionales pueden luego ayudar al proceso de ionización, hasta el punto en el cual se establece una gran corriente de *avalancha* que determina la región de *ruptura de avalancha*.

La región de avalancha (V_Z) se puede acercar al eje vertical al incrementar los niveles de dopado en los materiales tipo *p* y tipo *n*. Sin embargo, mientras V_Z disminuye a niveles muy bajos, como -5 V , otro mecanismo llamado *ruptura Zener* contribuirá con un cambio agudo en la característica. Esto ocurre debido a que existe un fuerte campo eléctrico en la región de la unión que puede superar las fuerzas de unión dentro del átomo y “generar” portadores. Aunque el mecanismo de ruptura Zener es un contribuyente significativo sólo en los niveles más bajos de V_Z , este cambio rápido en la característica a cualquier nivel se denomina *región Zener*, y los diodos que utilizan esta porción única de la característica de una unión *p-n* son los *diodos Zener*. Estos diodos se describen en la sección 1.14.

La región Zener del diodo semiconductor descrito se debe evitar si la respuesta de un sistema no debe ser alterada completamente por el severo cambio en las características de esta región de voltaje inverso.

El máximo potencial de polarización inversa que puede ser aplicado antes de entrar a la región Zener se conoce como voltaje pico inverso (referido simplemente como el valor PIV, por las iniciales en inglés de: Peak Inverse Voltage) o PRV, por las iniciales en inglés de: Peak Reverse Voltage).

Si una aplicación requiere de un valor PIV mayor que el de una sola unidad, se deben conectar en serie un número de diodos de la misma característica. Los diodos también se conectan de manera paralela para aumentar la capacidad de transporte de corriente.

Silicio en función de germanio

Los diodos de silicio tienen, en general, un PIV y un valor de corriente más altos, y rangos más amplios de temperatura que los diodos de germanio. Los valores PIV para el silicio pueden encontrarse en la vecindad de 1000 V , mientras que el valor máximo para el germanio está más cerca de los 400 V . El silicio puede utilizarse para aplicaciones en las cuales la temperatura puede aumentar a cerca de 200°C (400°F), mientras que el germanio tiene un valor máximo mucho menor (100°C). Sin embargo, la desventaja del silicio, comparado con el germanio, según se indica en la figura 1.23, es el mayor voltaje de polarización directa que se requiere

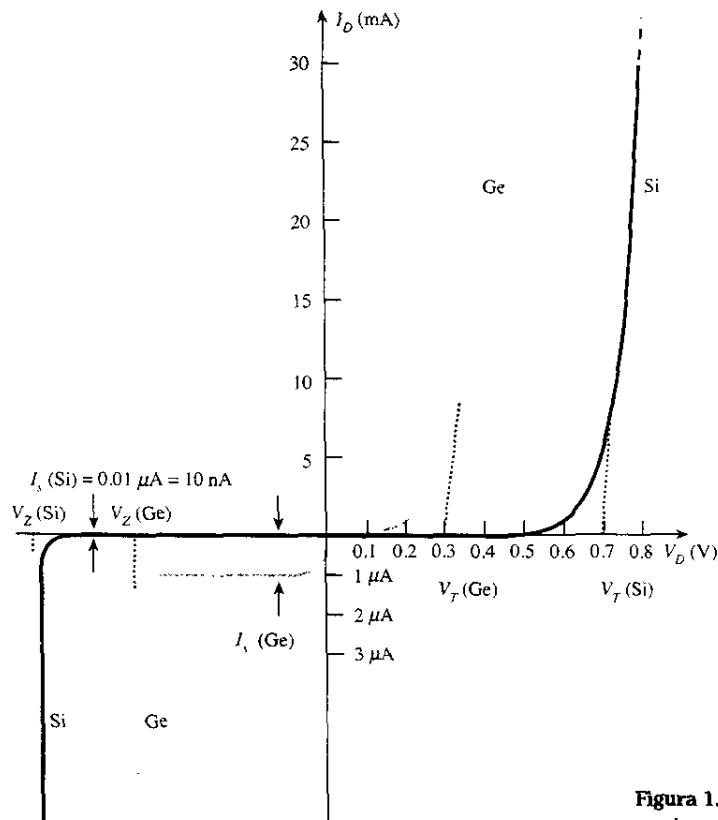


Figura 1.23 Comparación de diodos semiconductores de Si y Ge.

para alcanzar la región de conducción. Éste suele ser del orden de 0.7 V de magnitud para los diodos de silicio disponibles *en el mercado*, y 0.3 V para diodos de germanio cuando se redondea a la siguiente décima. La mayor variación para el silicio se debe, básicamente, al factor η en la sección (1.4). Este factor toma parte en la determinación de la forma de la curva sólo en niveles de corriente muy bajos. Una vez que la curva empieza su crecimiento vertical, el factor η cae a 1 (el valor continuo del germanio). Esto es evidente por las similitudes en las curvas una vez que el potencial de conducción se ha alcanzado. El potencial por el cual ocurre este crecimiento se conoce como *potencial de conducción de umbral o de encendido*. Con frecuencia, la primera letra de un término que describe una cantidad en particular se usa en la notación para dicha cantidad. Sin embargo, para asegurar un mínimo de confusión con otros términos, como el voltaje de salida (V_o , por las iniciales en inglés de: *output*) y el voltaje de polarización directa (V_F , por la inicial en inglés de: *forward*), la notación V_T ha sido adaptada para este libro por la palabra “umbral” (por la inicial en inglés de: *threshold*).

En resumen:

$V_T = 0.7 \text{ (Si)}$
$V_T = 0.3 \text{ (Ge)}$

Obviamente, mientras más cercana al eje vertical es la excursión, más cerca de lo “ideal” está el dispositivo. Sin embargo, las otras características del silicio comparadas con el germanio lo hacen ser el elegido en la mayor parte de las unidades disponibles en el mercado.

Efectos de la temperatura

La temperatura puede tener un marcado efecto sobre las características de un diodo semiconductor de silicio, según se comprobó mediante un diodo de silicio típico en la figura 1.24. A partir de múltiples experimentos se encontró que:

La corriente de saturación inversa I_s será casi igual al doble en magnitud por cada 10 °C de incremento en la temperatura.

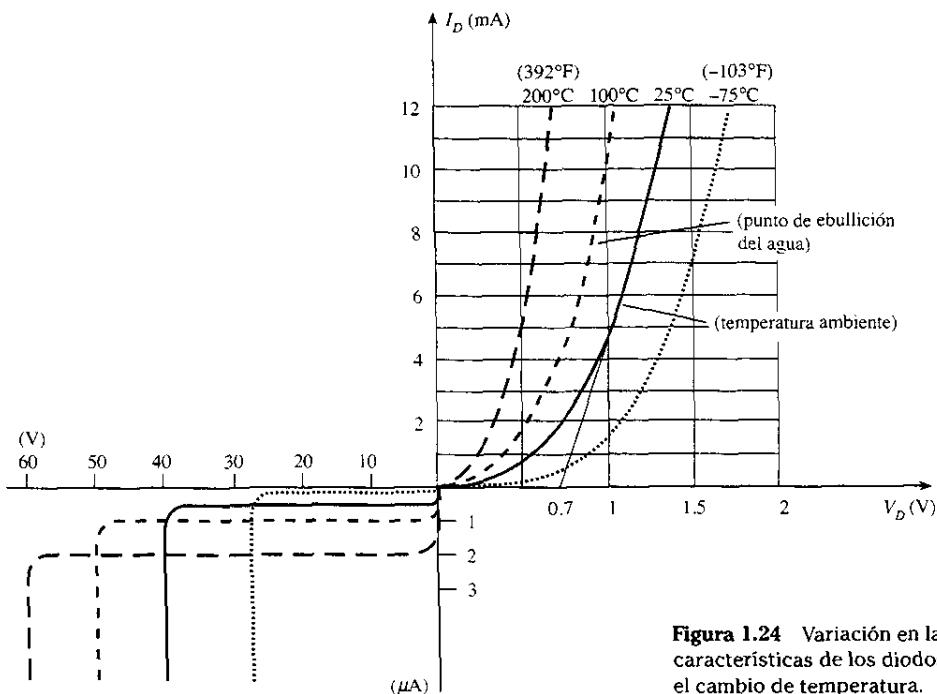


Figura 1.24 Variación en las características de los diodos con el cambio de temperatura.

No es poco frecuente que un diodo de germanio con un I_s del orden de 1 o 2 μA a 25°C tenga una corriente de fuga de $100 \mu\text{A} = 0.1 \text{ mA}$ a una temperatura de 100°C . Los niveles de corriente de esta magnitud en la región de polarización inversa con seguridad cuestionarían la condición deseada de circuito abierto en la región de polarización inversa. Los valores típicos de I_s para el silicio son mucho menores que para el germanio para unos niveles similares de potencia y corriente, según se mostró en la figura 1.23. El resultado es que aún a mayor temperatura, los niveles de I_s para los diodos de silicio no alcanzan los mismos altos niveles que para el germanio, una razón muy importante para que los dispositivos de silicio tengan un nivel significativamente mayor de desarrollo y utilización en el diseño. Fundamentalmente, el equivalente de circuito abierto en la región de polarización inversa es mejor a cualquier temperatura con silicio en lugar de germanio.

Los niveles de I_s aumentan a mayor temperatura con niveles menores del voltaje de umbral, como se muestra en la figura 1.24. Simplemente, al incrementar el nivel de I_s en la ecuación (1.4) observe el rápido incremento en la corriente del diodo. Desde luego, el nivel de T_K también se incrementará en la misma ecuación, pero el mayor valor de I_s sobrepondrá el menor cambio en porcentaje en T_K . Mientras la temperatura mejora las características en polarización directa, en realidad se convierten en características más "ideales", pero cuando se revisan las hojas de especificación se encuentra que las temperaturas más allá del rango de operación normal pueden tener un efecto muy perjudicial en los niveles de potencia y corriente máximas del diodo. En la región de polarización inversa, el voltaje de ruptura se incrementa con la temperatura, pero observe también el incremento no deseado en la corriente de saturación inversa.

1.7 NIVELES DE RESISTENCIA

Cuando el punto de operación de un diodo se mueve desde una región a otra, la resistencia del diodo también cambiará debido a la forma no lineal de la curva característica. En los siguientes párrafos se demostrará cómo el tipo de voltaje o señal aplicado definirá el nivel de la resistencia de interés. Se presentarán tres niveles diferentes en esta sección, pero aparecerán de nuevo cuando se analicen otros dispositivos. Por tanto, es muy importante que su determinación se comprenda con claridad.