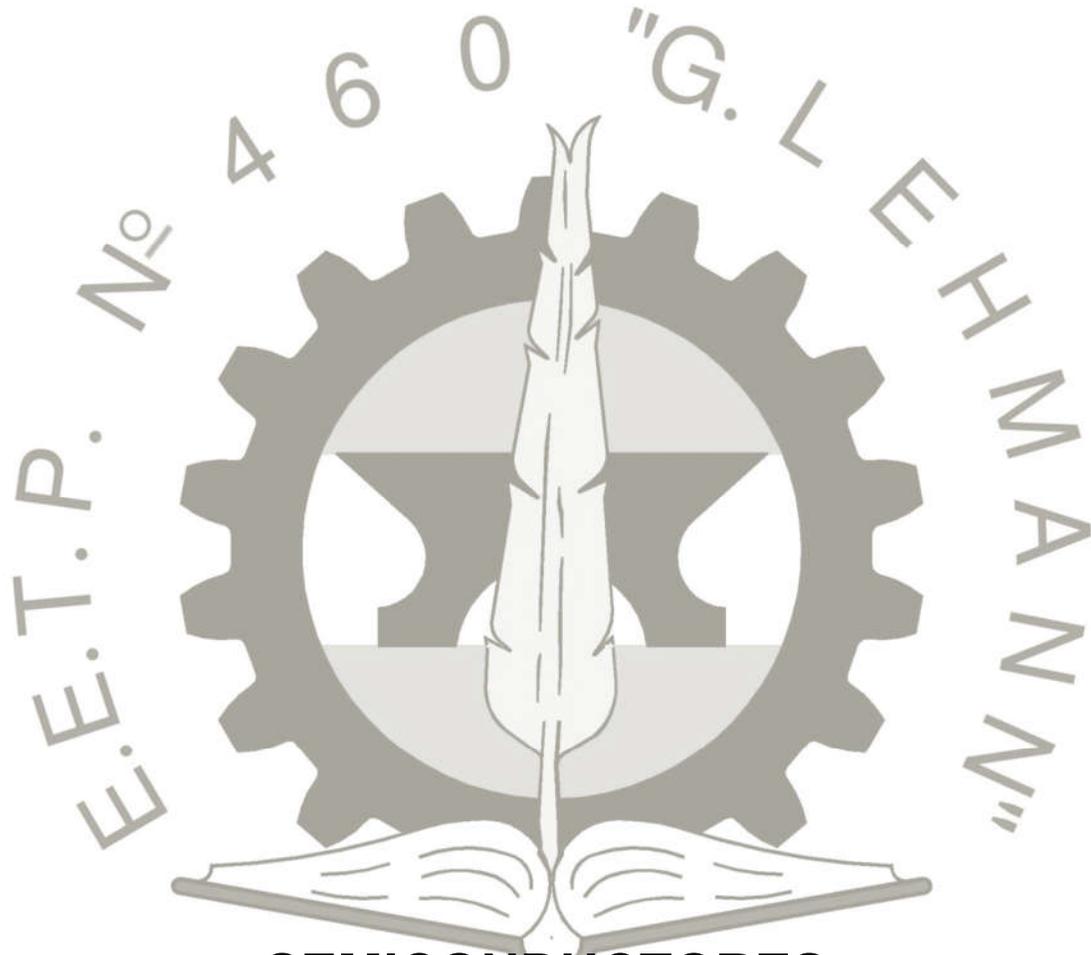


ELECTRÓNICA



SEMICONDUCTORES:

Materiales semiconductores intrínsecos

Impurezas en el sólido cristalino

Niveles de energía

Juntura P-N



premio Cyrus. B. Comstock de la Academia Nacional de las Ciencias. El mayor honor fue el Premio Nobel en Física que le fue otorgado en 1956, juntamente con sus dos antiguos colegas de los laboratorios "Bell Telephone", *John Bardeen* y *Walter H. Brattain* por el desarrollo del transistor

William B. Shockley falleció el 12 de Agosto de 1989 en Palo Alto (California) a los 79 años de edad.

William Bradford Shockley nació en Londres el 13 de febrero de 1910, aunque sus padres eran norteamericanos y sólo 3 años después de su nacimiento se lo llevaron a vivir a *Palo Alto, California*. Su padre era un ingeniero y su madre una topógrafa de minas. Considerando que le podrían dar a su hijo una mejor educación en casa, los Shockleys mantuvieron a William sin ir a la escuela hasta que cumplió 8 años. Aunque su educación probaría más tarde ser de excelente nivel, este aislamiento hizo que el pequeño William tuviera muchos problemas para adaptarse a su entorno social.

En el otoño de 1927 ingresó a la Universidad de California en Los Angeles, pero tras sólo un año ahí ingresó al prestigioso *Instituto de Tecnología de California*, en *Pasadena*. William terminó su licenciatura en física en 1932 y posteriormente obtuvo una beca para estudiar en el *Instituto Tecnológico de Massachusetts* (MIT), de donde se doctoró en 1936.

Con el apoyo de *Bell Telephone Laboratories* en 1936 comenzó los experimentos que le llevaron al descubrimiento y posterior desarrollo del transistor de unión. Durante la segunda Guerra Mundial ejerció como director de investigación en el grupo de investigaciones de operaciones de combate antisubmarino. Trabajó, igualmente, como consejero experto en la oficina del secretario para la guerra. Al finalizar la guerra, volvió a Bell Telephone como director de la investigación física del transistor.

La investigación de Shockley estuvo centrada en las bandas de energía de los sólidos, la difusión propia del cobre, el orden y el desorden en los enlaces, experimentos y teoría en los campos ferromagnéticos, experimentos de fotoelectrones en cloruro de plata y varios temas en la física del transistor.

Su trabajo fue recompensado con muchos honores. Recibió la Medalla al Mérito en 1946, por su trabajo en el departamento de guerra. El premio en memoria de Morris Leibmann del Instituto de Ingeniería de la Radio en 1952; los siguientes años, el premio de la Sociedad Americana de la Física de Oliver E. Buckley por su investigación del estado físico sólido y un año después el

1. MATERIALES SEMICONDUCTORES INTRINSECOS

El silicio es un elemento químico cuyo símbolo es "Si". Tiene un número atómico de 14, lo que significa que un átomo de Si aislado tiene 14 protones en su núcleo y 14 electrones orbitando alrededor de él. Diez de los 14 electrones están estrechamente ligados al núcleo y tienen menos importancia para las uniones químicas con otros elementos. Los cuatro electrones restantes determinan cómo los átomos de silicio se organizan entre sí para formar el silicio sólido. Este material compone alrededor del 20% de la corteza terrestre ($2,57 \cdot 10^5$ ppm) y en la naturaleza no se lo encuentra en estado puro sino, generalmente, combinado con oxígeno formando óxidos de Si (SiO_2 , dióxido de silicio) y silicatos. La arena es en gran parte dióxido de silicio.

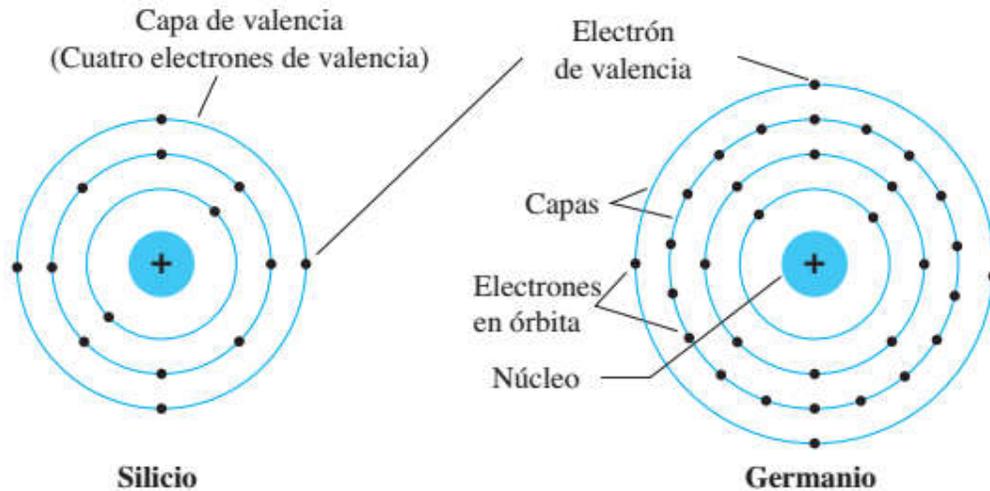


Figura 1.- Átomo de silicio (Si) y germanio (Ge).

El silicio y el germanio son dos de los materiales de base más utilizados en la industria microelectrónica. Tienen una estructura cristalina y, como se mencionó anteriormente, poseen cuatro electrones de valencia. La estructura cristalina hace que los átomos estén ligados compartiendo sus electrones de valencia. Las fuerzas internas provocadas por la tendencia de los átomos para completar su órbita externa con ocho electrones es muy grande. Mucho mayor que las fuerzas eléctricas de atracción o repulsión. Como cada átomo tiene cuatro electrones, los átomos vecinos comparten sus electrones de modo que todos tengan ocho.

En la figura 2, cada átomo es representado por su núcleo y la totalidad de los electrones ligados a él. Sólo los electrones de valencia se dibujan como tales. Cada átomo se encuentra balanceado, es decir que se trata de una sustancia eléctricamente neutra. También se observa que a cada átomo lo rodean ocho electrones formando los enlaces. La fuerza que mantiene a los átomos unidos y formando esta estructura cristalina perfectamente regular no es eléctrica, sino estructural.

Como sería muy complejo un diagrama en el espacio, desde el punto de vista gráfico se representará en el plano. En el análisis no debemos olvidar nunca que analizamos realmente fenómenos que ocurren en el espacio.

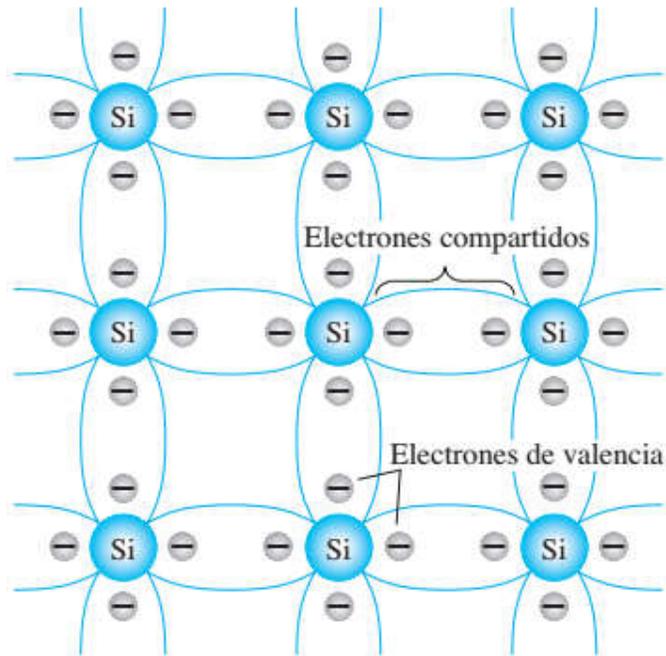


Figura 2.- Enlace covalente del átomo de silicio.

La temperatura significa energía cinética interna de todas las partículas que forman una sustancia. Los átomos de un cristal vibran en sus posiciones de equilibrio. Los electrones de valencia, en equilibrio térmico con el cristal al que pertenecen, comparten también esa energía cinética. Una determinada temperatura significa una energía promedio constante. Las diferencias momentáneas entre la energía de un electrón y de otros vecinos pueden ser muy grandes. Así es como, teóricamente, a cualquier temperatura $T > 0^{\circ}\text{K}$, algún electrón adquirirá más energía cinética que la necesaria para vencer la barrera potencial y podrá, por lo tanto, romper el enlace.

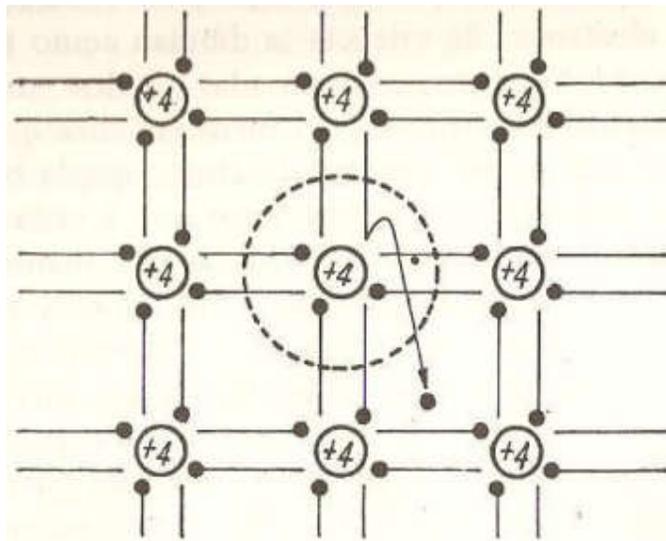


Figura 3.- Rotura de un enlace covalente del átomo de silicio.

En la figura 3, un electrón del átomo central rompió su enlace y quedó libre dentro del cristal. Un enlace sin su electrón es un enlace roto. Trata de recuperar el electrón perdido. La afinidad hacia los electrones vecinos es muy grande. Pero es evidente que si reconstruye el enlace robando un electrón vecino, rompe otro enlace. Así ocurre en verdad, normalmente. El enlace se reconstruye continuamente transfiriendo el problema a otro enlace vecino; éste a otro y así sucesivamente. Es evidente que el enlace roto es, por lo tanto móvil.

¿Y qué ocurre con el primer electrón que rompió el primer enlace, de esta cadena de enlaces rotos móviles? Es un electrón libre que se mueve en la estructura cristalina. Así que la rotura de un enlace genera dos fenómenos totalmente distintos a saber: 1) movimiento libre de un electrón, y 2) movimiento libre de un enlace roto.

El enlace roto, que se mueve en el seno del cristal se denomina hueco. Y como el electrón que falta es negativo, la zona inmediata donde falta el electrón se hace positiva. La neutralidad eléctrica se rompe en la vecindad del enlace roto. El hueco es, por consiguiente positivo. Y como es móvil, transporta también corriente eléctrica.

Así es como, en un semiconductor intrínseco (vale decir puro), existen dos fenómenos que determinan la conductividad del material. Puede decirse que en ellos existen dos partículas que se mueven en su seno: electrones de conducción y huecos. Negativos los primeros y positivos los segundos: $-q$ y $+q$ respectivamente, donde q es la carga del electrón.

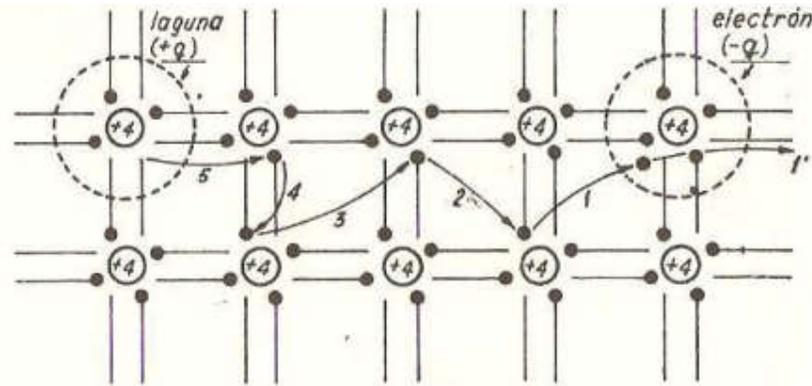


Figura 4.- Rotura de un enlace covalente y generación de un hueco.

La generación y el movimiento de un electrón de conducción y de un hueco (par electrón-hueco), se representa en la figura 4. En (1) un electrón de valencia rompió su enlace adquiriendo suficiente energía del medio circundante como para vencer la barrera de potencial que lo tenía sumido en ese "pozo" de energía que es su enlace. Debió recibir aproximadamente 1,1eV si el material es silicio o 0,7eV si es germanio. El electrón quedó libre en el espacio interatómico y sigue el camino demarcado con (1'). Es un electrón de conducción. La zona vecina está desequilibrada eléctricamente y en la figura está indicada en la esfera punteada de la derecha.

Casi inmediatamente ocurrió el fenómeno marcado como (2), mediante el cual un electrón de un enlace vecino fue a ocupar el lugar vacante que había dejado el electrón anterior. El hueco que había nacido en el proceso anterior donde un enlace se rompió, se traslada ahora de lugar siendo transferido al átomo vecino. Pero la afinidad por los electrones de ese hueco de potencial que forman los enlaces rotos es muy grande. Así, sucesivamente, en el proceso (3) el hueco es transferido. En el proceso (4) un electrón del mismo átomo ocupa el lugar vacante y en el proceso (5) nuevamente la vacante anterior es llenada. Y este proceso continúa. En la figura 4 se muestra la situación imperante después del proceso (5). La zona vecina al átomo que tiene el enlace roto está desequilibrada eléctricamente y es positiva, pues falta un electrón. La esfera punteada de la izquierda indica esa zona positiva llamada hueco. Debe observarse que el hueco se movió de (1) a (5), en sentido contrario a las flechas.

El electrón libre nacido en el proceso (1) se mueve a su vez, en forma independiente del hueco, y por el espacio interatómico. El hueco se mueve de enlace en enlace. En ningún momento pasa por el espacio interatómico. Esto resulta difícil de aceptar, pues en los procesos de (2) a (5), parece verse claramente que el electrón, al pasar de un átomo a otro, atraviesa el espacio interatómico. Pero debe observarse que esa zona tiene una energía potencial superior a la de los electrones que están en las valencias. El electrón de valencia

como partícula clásica, no puede, por lo tanto atravesar esta zona. Pero sí lo hace como partícula cuántica. En muchas oportunidades hemos de tratar con electrones que vencen barreras más grandes de las que pueden vencer con la energía que poseen.

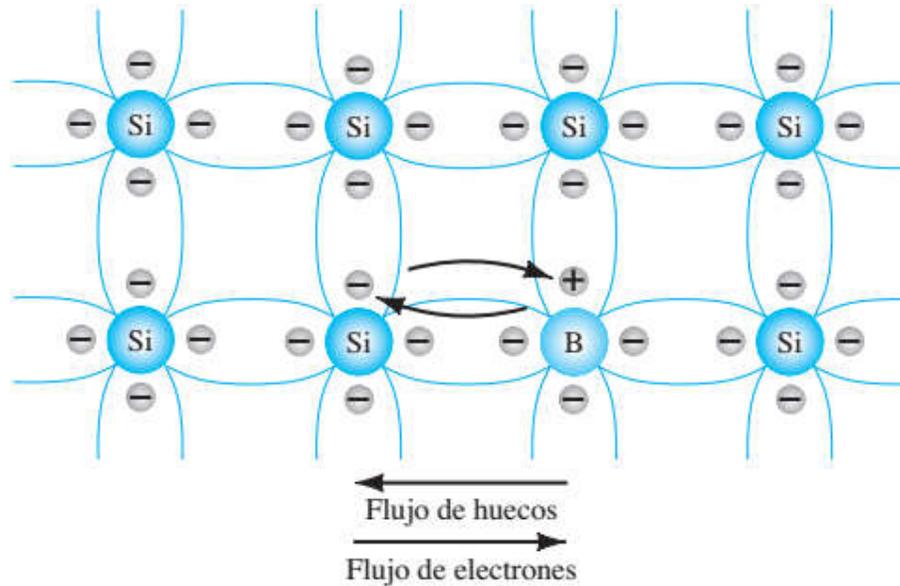


Figura 5.- Flujo de electrones y huecos.

Debemos aceptar por lo tanto, y pensar que la explicación final es cuántica, que los electrones de valencia se mueven de enlace en enlace sin variar su energía. Debemos pensar que ese movimiento es permanente, vale decir que cada átomo comparte ocho electrones en todo momento, pero esos ocho electrones son siempre distintos.

2. IMPUREZAS EN EL SOLIDO CRISTALINO

En el análisis efectuado hasta ahora, el sólido cristalino era puro. La presencia de huecos y electrones se debía a la rotura de enlaces y por lo tanto, estaban balanceadas en número. Siempre se generan pares "electrón-hueco" y siempre se recombinan, también por pares. La conductividad determinada por esos portadores se llama "intrínseca".

Sería poca la importancia de estos cristales si no existiera una forma práctica de dosificar a voluntad el número de portadores de uno u otro signo, cambiando así, no solamente el valor de la conductividad, sino también, y esto es mucho más importante, su naturaleza.

2.1 IMPUREZAS DONADORAS

Las impurezas donadoras provienen de la columna V de la tabla periódica. El arsénico, el fósforo y el antimonio son dos de los más representativos. Agregar impurezas donadoras es una forma de agregar electrones libres, o de conducción, sin agregar, al mismo tiempo huecos y sin romper la neutralidad eléctrica.

No sería posible agregarle, simplemente, electrones. Las tremendas fuerzas eléctricas que se generarían al desequilibrarse eléctricamente el cristal, impediría la operación. Y los pocos electrones inyectados escaparían al primer contacto con otro cuerpo cualquiera. El cristal cargado en el primer proceso se descargaría en el segundo.

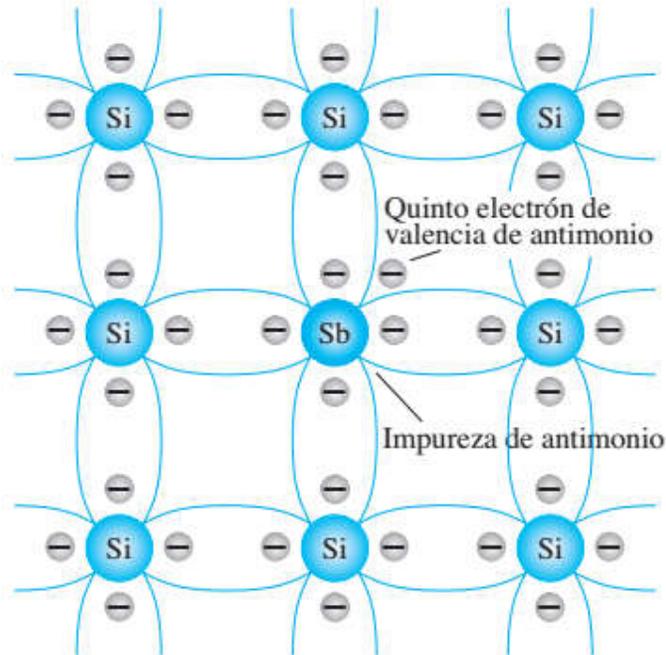


Figura 6.- Impureza de antimonio (material tipo n).

En la figura 6 se representa la zona del cristal con una impureza donadora. Se trata de un átomo de antimonio que ha sustituido a uno de silicio (o germanio) en la estructura cristalina. Estructuralmente el átomo de impureza es muy parecido y completa los cuatro enlaces normales de valencia del cristal. Pero el antimonio tiene cinco electrones de valencia. Un electrón queda sin completar enlace alguno. El átomo de antimonio es eléctricamente neutro, pero el quinto electrón, al no caer en el pozo de potencial que representa un enlace, tiene mucha más energía que los demás electrones. Es fácil aceptar que ese quinto electrón adquirirá la poca energía adicional que requiere, romperá el vínculo con su átomo y quedará libre. El débil vínculo que trata de mantenerlo junto al átomo original es de carácter eléctrico. Al alejarse el electrón deja al átomo de impureza donadora cargado positivamente. Será un ion positivo y atraerá al electrón.

El átomo de impureza en sí, fijo en la estructura cristalina, queda cargado positivamente. La ausencia de un electrón de los cinco que corresponden determina que predomine la carga positiva del núcleo. Será un ion positivo fijo. El cristal continúa siendo macroscópicamente neutro. Pero, microscópicamente, hay zonas positivas compensadas por otras negativas. Por cada ion positivo fijo de átomo donador, debe existir un electrón libre. De esta manera, agregando impurezas donadoras al cristal se puede controlar la cantidad de electrones de conducción que existirá en él.

2.2 IMPUREZAS ACEPTADORAS

Las impurezas aceptadoras se encuentran en la III columna de la tabla periódica. El aluminio, el indio, el galio y el boro son cuatro de los más representativos. Agregar impurezas aceptadoras es una forma de agregar huecos, sin agregar al mismo tiempo electrones y sin romper la neutralidad eléctrica.

En la figura 7 se representa la zona de un cristal con una impureza aceptadora. Es un átomo de boro que ha sustituido a uno de silicio (o germanio) en la estructura cristalina. Estructuralmente el átomo de boro es muy parecido al del cristal, pero solo puede completar tres de los cuatro enlaces de valencia. Queda un enlace roto. Pero este enlace roto no significa el nacimiento de un electrón de conducción. Este enlace, simplemente, nació roto.

No obstante, a pesar de poseer un enlace roto la zona es neutra. Los tres electrones de valencia balancean las tres cargas positivas del núcleo del átomo de boro. Pero el enlace roto tiene una gran afinidad hacia los electrones vecinos. Es evidente que el átomo completará ese enlace, determinando el nacimiento de un ion negativo fijo.

Cada átomo de impureza provoca el nacimiento de un hueco móvil y de un ion negativo fijo. El equilibrio macroscópico se mantiene; pero la distinta ubicación del ion y del hueco determinan desequilibrios microscópicos. De esta manera, agregando impurezas aceptadoras al cristal se puede controlar la cantidad de huecos que existirán en él.

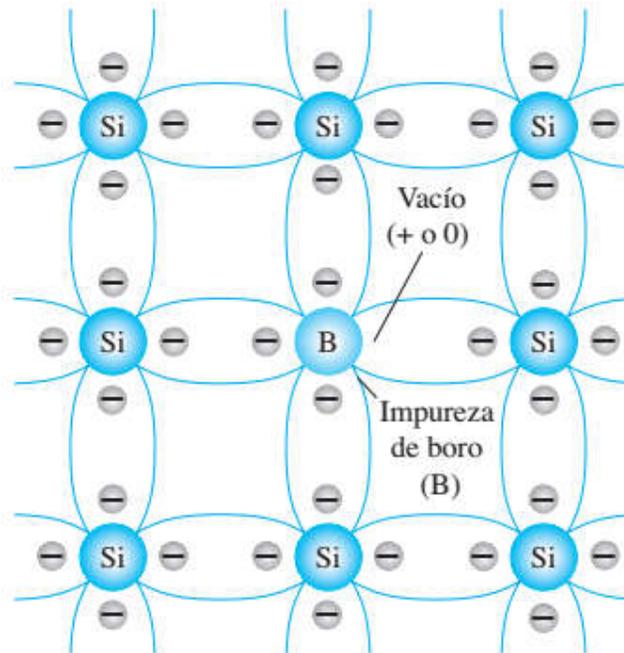


Figura 7.- Impureza de boro (material tipo p).

3. NIVELES DE ENERGÍA

En la estructura atómica aislada existen niveles discretos de energía (individuales) asociados con cada electrón que orbita, como se muestra en la siguiente figura. De hecho, cada material tendrá su propio conjunto permitido de niveles de energía para los electrones en su estructura atómica.

Mientras más distante se encuentre el electrón del núcleo, mayor será su estado de energía. Además, cualquier electrón que haya abandonado a su átomo tendrá un estado de energía mayor que cualquier electrón dentro de su estructura atómica.

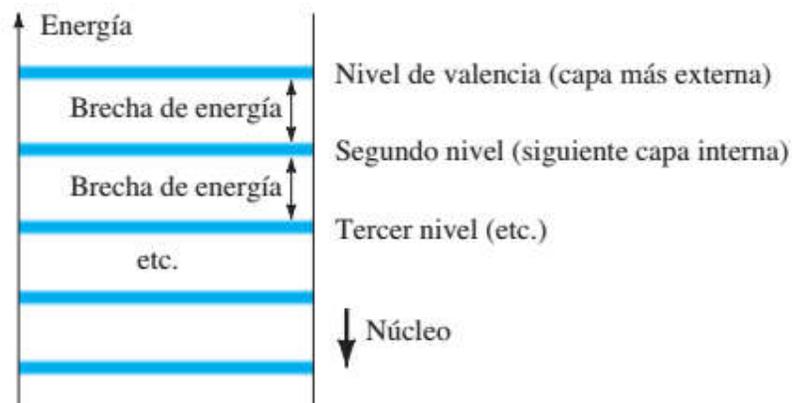


Figura 8.- Niveles de energía discretos en estructuras atómicas aisladas.

Entre los niveles de energía discretos existen bandas de energía vacías, brechas, en las que ningún electrón en la estructura atómica aislada puede permanecer. A medida que los átomos de un material se unen para formar la red de estructura cristalina, existirá una interacción entre los átomos, que tiene como efecto que los electrones de una órbita particular de un átomo tengan niveles de energía ligeramente diferentes de los electrones de un átomo adyacente en la misma órbita. El resultado neto será un incremento de los niveles discretos de los estados de energía posibles de los electrones de valencia.

Existen niveles y estados de energía en los que se puede encontrar cualquier electrón de la red atómica, además existe una región prohibida entre la banda de valencia y el nivel de ionización. La ionización es el mecanismo por el cual un electrón puede absorber energía suficiente para escapar de la estructura atómica e ingresar a la banda de conducción. El salto de energía necesario para que un electrón pase de la banda de valencia a la de conducción se denomina E_g . El valor numérico de E_g es de 1,1eV para el silicio y 0,7eV para el germanio.

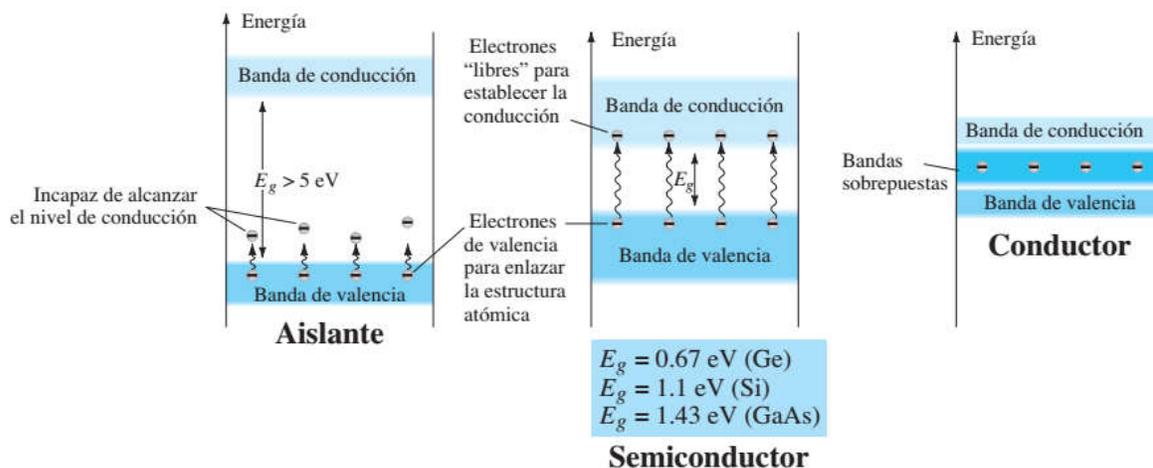


Figura 9.- Bandas de conducción y valencia de un material aislante, un semiconductor y un conductor.

Las bandas pueden estar llenas, casi llenas, casi vacías o vacías. Esta designación está relacionada con la cantidad de electrones que ocupan los niveles de energía disponibles en cada banda. Es conveniente remarcar que si bien las bandas se consideran continuas, no lo son en realidad. Los estados de energía son discretos y por lo tanto el número de estados finito. Como cada estado queda completo con un electrón, el número de electrones que cabe en una banda es también un número determinado. Cuando cada estado está ocupado por un electrón la banda está llena y no existe posibilidad de ubicar más electrones. Es necesario distinguir también entre "casi llena" y "casi vacía" debido al comportamiento eléctrico completamente diferente en cada caso. Debemos afirmar que:

- Una banda llena no conduce corriente.
- Una banda vacía no conduce corriente.
- Una banda casi llena conduce corriente mediante el desplazamiento de huecos.
- Una banda casi vacía conduce corriente mediante el desplazamiento de electrones.

A continuación hemos de justificar estas afirmaciones:

- Una banda está llena cuando no existe ningún estado de energía libre. Ningún electrón puede desplazarse del estado en que se encuentra hacia otro estado, a menos que en el mismo instante exista el movimiento contrario. Esto queda ejemplificado en la figura 10.
- Una banda vacía no conduce corriente pues no existen en ella cargas eléctricas.
- Una banda casi llena conduce corriente mediante el desplazamiento de huecos. En la figura 11 se observa que en el proceso (1) se rompe un enlace. La banda de valencia quedo casi llena pues le falta sólo un electrón. Los procesos (2), (3) y (4) continuaron inmediatamente dando lugar al desplazamiento del enlace roto. Hubo desplazamiento de cargas y, por lo tanto, conducción de corriente eléctrica.

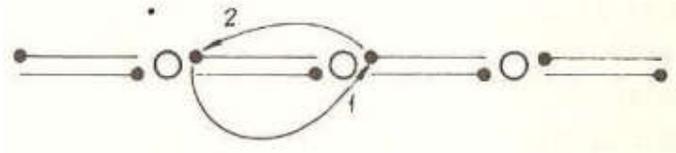


Figura 10.- Desplazamiento de un electrón de (1) a (2) y de (2) a (1).

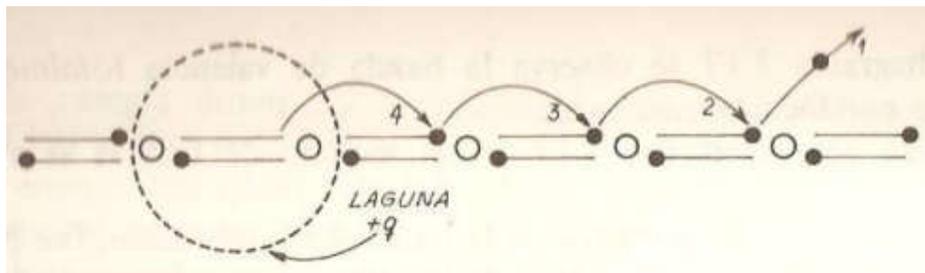


Figura 11.- Pérdida de un electrón y desplazamiento de un hueco.

- d) Una banda casi vacía conduce corriente eléctrica mediante el desplazamiento de electrones. En la figura 12 se observa el proceso de conducción de un electrón libre, en el seno del cristal, donde queda la banda de conducción. Solo un electrón la ocupa en este ejemplo. Está prácticamente vacía. El electrón puede, por lo tanto, moverse en entera libertad pues tiene a su disposición una cantidad casi infinita de estados donde ubicarse energéticamente. En la figura 13 se observa la banda de valencia totalmente llena y la banda de conducción casi vacía. El electrón $-q$, que se mueve en la banda de conducción, fue producido por una impureza y no por la rotura de un enlace, pues si la banda de valencia está totalmente llena es porque ningún enlace se ha roto.

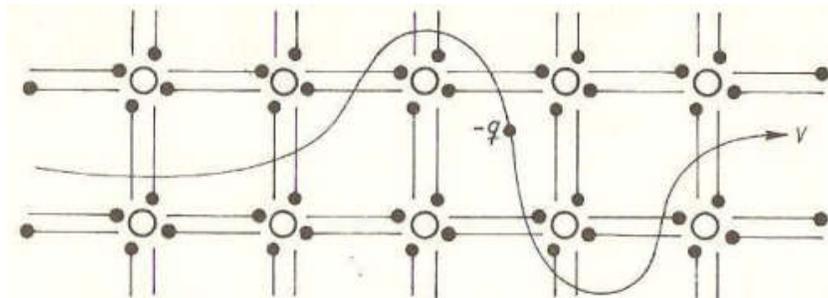


Figura 12.- Movimiento de un electrón libre en el seno del cristal.

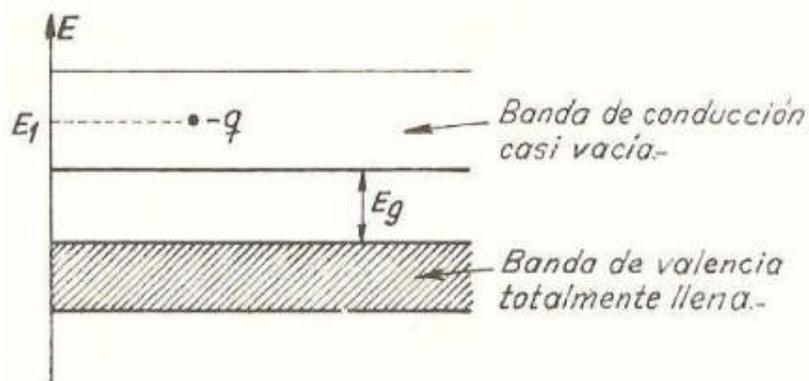


Figura 13.- Ubicación del electrón libre en la banda de conducción.

Como conclusión de los cuatro puntos analizados podemos decir:

- 1) Un semiconductor intrínseco a cero grado Kelvin es un aislante perfecto, pues posee una banda de valencia totalmente llena y una banda de conducción totalmente vacía.
- 2) Un semiconductor intrínseco a temperatura ambiente conduce corriente a través de electrones en la banda de conducción casi vacía y de huecos en la banda de valencia casi llena. Los pocos electrones que por rotura de enlaces han pasado a la banda de conducción faltan en la banda de valencia.
- 3) Los valores numéricos de los electrones que rompen los enlaces quedan determinados, además de la temperatura, por el valor numérico del salto de energía E_g . De esta manera resulta que el carbono (diamante), ($E_g = 5,5\text{eV}$), es un aislante casi perfecto, mientras que el silicio ($E_g = 1,1\text{eV}$) y el germanio ($E_g = 0,67\text{eV}$) son semiconductores típicos. El cobre ($E_g = 0\text{eV}$), que no tiene banda prohibida debido a que las bandas de conducción y de valencias se solapan, es un buen conductor. El dióxido de silicio (SiO_2), con un $E_g = 7\text{eV}$, es un aislante muy utilizado en la tecnología de los semiconductores y superior aún al diamante.

3.1 ESTRUCTURA DE LAS BANDAS EN UN SEMICONDUCTOR EXTRÍNSECO

Agregando impurezas donadoras o aceptadoras se convierte al semiconductor intrínseco en extrínseco. La conductividad, debida a los pares electrón-hueco en el material intrínseco, pasa a depender de los electrones en el semiconductor extrínseco tipo n y de los huecos en el semiconductor extrínseco tipo p. Los electrones son portadores mayoritarios en el primer tipo y los huecos son portadores mayoritarios en el segundo. Los portadores minoritarios carecen de importancia en la determinación de la conductividad y de la corriente de corrimiento que ella determina, aunque tienen la máxima importancia cuando la difusión es el proceso dominante.

Es necesario ubicar en el modelo de bandas los estados de energía permitidos de los átomos donadores y aceptadores. En los modelos de bandas de las siguientes figuras se han ubicado los niveles de energía donante E_d y aceptor E_a en semiconductores extrínsecos tipo n y tipo p.

La energía del quinto electrón de un átomo donador, antes de ionizarse, no está ubicada en la banda de conducción. Necesita algo de energía ($0,01\text{eV}$, por ejemplo) para romper la débil atracción del núcleo atómico y quedar libre en la banda de conducción. Es evidente, por consiguiente, que inicialmente no estaba en la banda de conducción, ya que necesita energía para llegar a ella. También es evidente que no estaba en la banda de valencia, pues de lo contrario hubiese necesitado una energía igual a E_g ($0,67\text{eV}$ por ejemplo), para romper la fuerte ligadura de valencia y llegar a la banda de conducción.

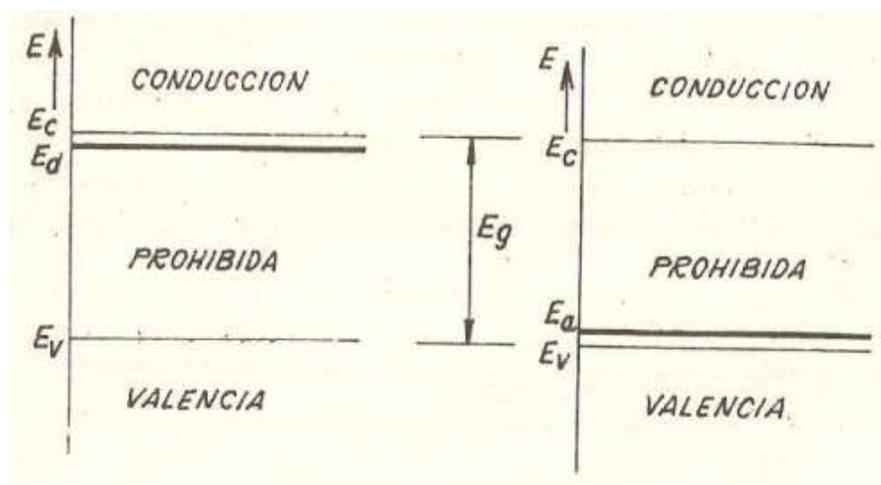


Figura 14.- Efecto de la impurezas en la estructura de las bandas de energía. Donador (izquierda) y aceptor (derecha).

Como la diferencia $E_c - E_d = 0,01\text{eV}$ es muy inferior a la diferencia $E_c - E_v = E_g$, ($0,67\text{eV}$ para el Ge y $1,1\text{eV}$ para el Si), la ubicación de los niveles de energía donantes cerca de la banda de conducción queda justificada. Los niveles donantes podrán estar ocupados o no. Cuando el átomo no está ionizado el quinto

electrón está ocupando su lugar y el átomo es neutro. Cuando el átomo se ioniza el electrón pasa a la banda de conducción y el estado donador queda libre y el átomo convertido en un ion fijo positivo.

No es contradictorio aceptar que dentro de la banda prohibida existan estados permitidos. La banda prohibida es del semiconductor, mientras que los estados permitidos son de las impurezas.

La figura 14 (derecha) representa los niveles de energía permitidos en un semiconductor tipo p. Los electrones de la banda de valencia pueden ubicarse en los átomos aceptores. Sólo necesitan una pequeña energía adicional a la que poseen. La diferencia $E_a - E_v = 0,05\text{eV}$ mientras que $E_c - E_v = 0,7\text{eV}$. En el modelo de bandas está ubicado el nivel permitido aceptor, dentro de la banda prohibida del semiconductor, y muy cerca del nivel de valencia. Todo de acuerdo con los valores numéricos de los distintos niveles.

Cuando los átomos de impurezas están ionizados, que es la situación normal a temperatura ambiente, los modelos pueden representarse como en la figura 15.

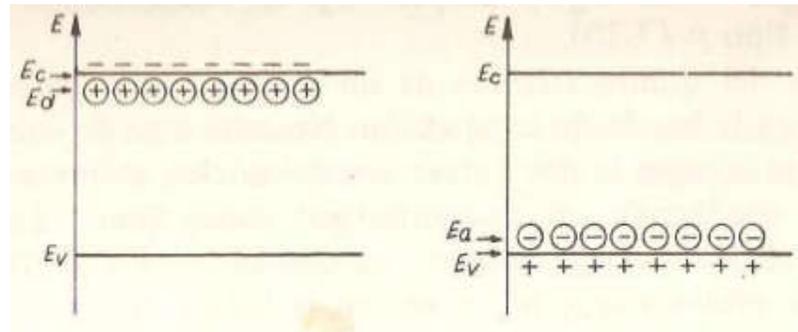


Figura 15.- Estructura de las bandas de energía con los átomos de impurezas ionizados.

Cuando la concentración de impurezas es muy grande, y los niveles donadores y aceptores interactúan entre sí, se aplica el principio de exclusión de Pauli, y los niveles se desdoblan generando una banda permitida dentro de la banda prohibida del cristal. Las figuras 16 y 17 representan los modelos en este caso. Si las bandas de las impurezas son muy anchas debido a su alta concentración, pueden solaparse con las de conducción o de valencia y el semiconductor se denomina degenerado o semi-metal.

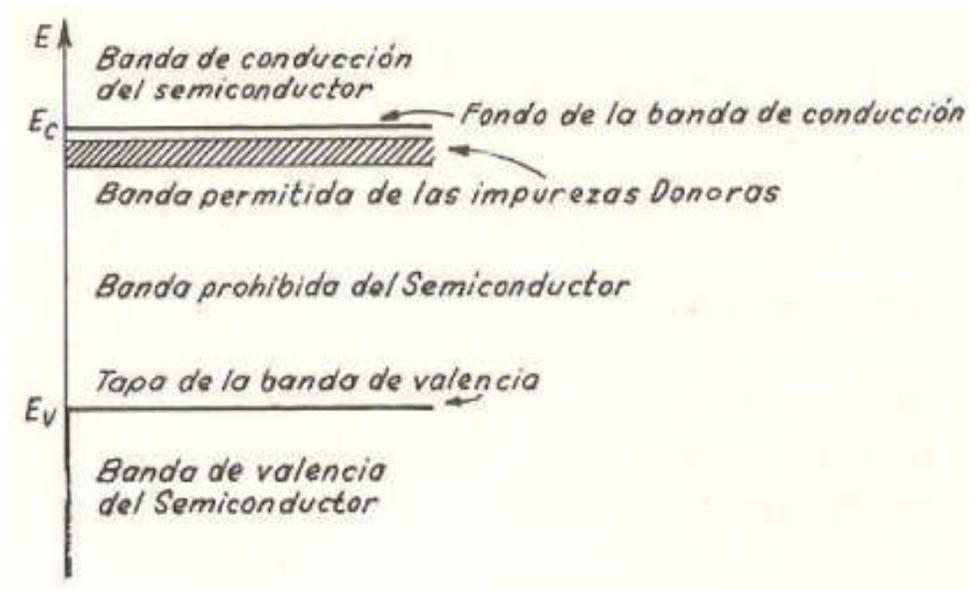


Figura 16.- Estructura de las bandas de energía con impurezas donadoras.

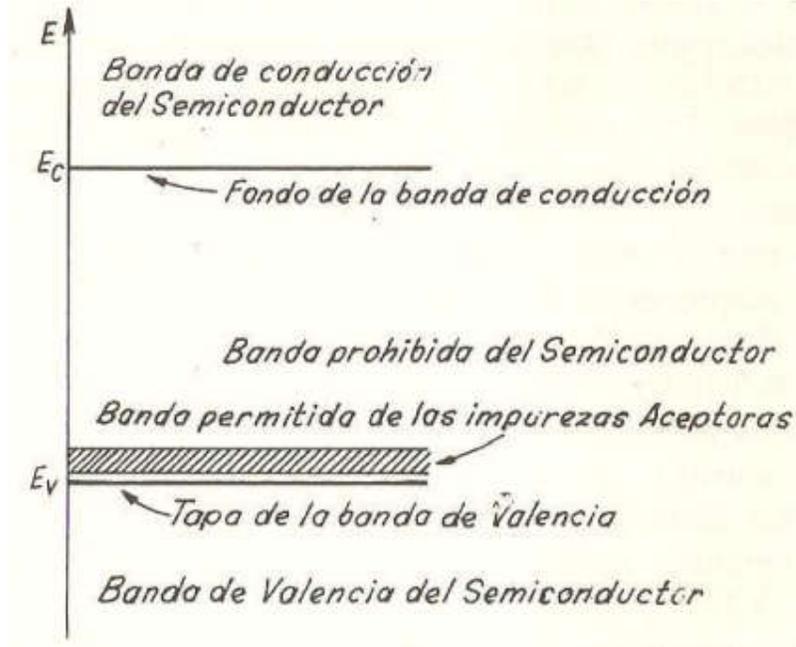


Figura 17.- Estructura de las bandas de energía con impurezas aceptadoras.

4. JUNTURA P-N

El estudio de la juntura p-n es fundamental porque constituye la pieza más importante para la construcción de los dispositivos de estado sólido. No solamente el diodo, que surge naturalmente por las propias características de una sola juntura, sino también para la casi totalidad de los dispositivos de estado sólido, como los transistores, tiristores, triacs, etc.

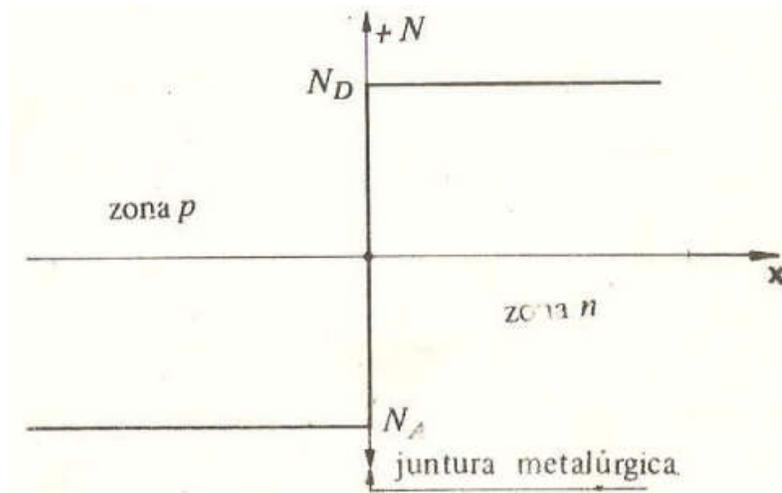


Figura 18.- Juntura p-n ideal.

Toda juntura está formada por una zona tipo p separada por otra zona de tipo n. El plano que separa ambas zonas se denomina plano metalúrgico. La figura 18 no representa la situación más común ya que es evidente que esa separación teóricamente perfecta sería imposible de conseguir en la práctica, pues las impurezas donadoras y aceptadoras se mezclarían inevitablemente en la zona de contacto. La figura 19 representa una juntura gradual. Puede observarse que existe una zona, relativamente grande, en la que las impurezas donadoras y aceptadoras se han mezclado, determinando un paso gradual de una zona a la otra. Toda juntura

abrupta es algo gradual, ya que esa mezcla es siempre inevitable. De todas maneras la juntura se llama abrupta cuando se pretendió conseguir una separación con la mayor perfección que la técnica permite.

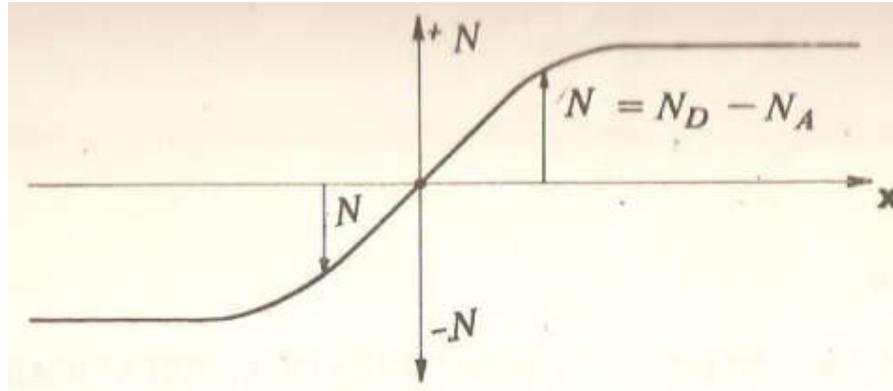


Figura 19.- Juntura p-n real.

4.1 JUNTURA P-N EN EQUILIBRIO (SIN POLARIZACIÓN)

Dado que en cada zona la carga total es neutra, por cada electrón hay un ion positivo, y por cada hueco un ion negativo, no existen distribuciones de carga neta ni campos eléctricos internos. Al crear dos zonas de diferente concentración de portadores, entra en juego el mecanismo de difusión que tiende a llevar partículas de donde hay más a donde hay menos. El efecto es que los electrones y los huecos cercanos a la unión de las dos zonas la cruzan y se instalan en la zona contraria, es decir que electrones de la región n pasan a la región p y huecos de la región p pasan a la región n. Este movimiento de portadores de carga tiene como efecto que a ambos lados de la unión se va creando una zona de carga, que es positiva en la región n y negativa en la región p. La distribución de cargas formada en la zona de la unión provoca un campo eléctrico desde la región n a la región p.

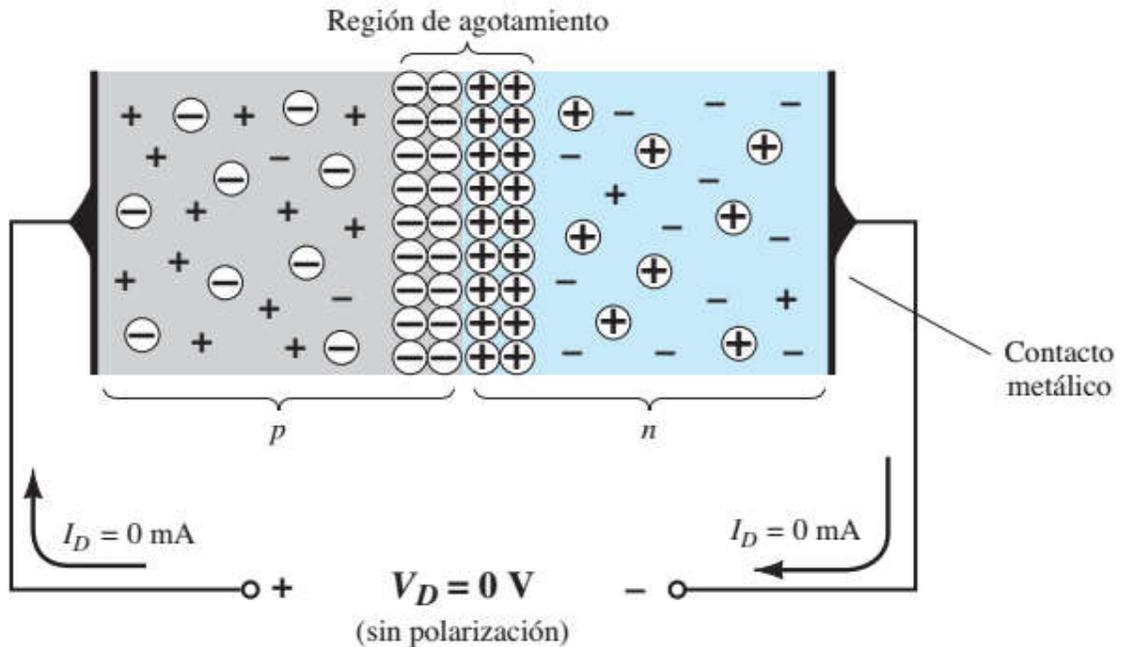


Figura 20.- Juntura p-n sin polarización externa.

El campo eléctrico generado se opone al desplazamiento de los portadores, que se mueven por efecto de la corriente de difusión. Conforme el campo va creciendo, debido al traslado de cargas, se llega a una situación de equilibrio en la que ya no fluyen cargas de una región a otra, debido a que el desplazamiento de cargas por difusión es contrarrestado por el campo eléctrico generado. Como resultado de este proceso, que se produce una sola vez y en el momento de formarse la juntura, nace el potencial de contacto. Este potencial no es medible mediante la conexión de algún instrumento. Esto es así, ya que necesariamente, al conectar cualquier instrumento de medición se generan nuevos contactos, los que determinaran nuevos potenciales que quedarán en serie con el potencial a medir. La suma de los potenciales de contacto en un circuito cerrado, en equilibrio térmico, es siempre cero, de acuerdo a la segunda ley de Kirchhoff.

4.2 JUNTURA P-N FUERA DE EQUILIBRIO (CON POLARIZACIÓN)

La rotura del equilibrio en una juntura p-n ocurre generalmente mediante la aplicación de un potencial externo. Para hacerlo es necesario soldar dos contactos óhmicos en las dos zonas neutras, alejados de la juntura. Los contactos son uniones de metal a semiconductor de muy baja resistencia óhmica (prácticamente nula). Se pueden distinguir tres zonas o regiones perfectamente definidas: dos zonas neutras y una zona intermedia llamada de transición, de carga espacial o de depleción, indistintamente.

4.2.1 Condición de Polarización en Directa ($V_D > 0V$)

La condición de polarización en directa o "encendido" se establece aplicando el potencial positivo al material tipo p y el potencial negativo al tipo n como se muestra en la figura 21.

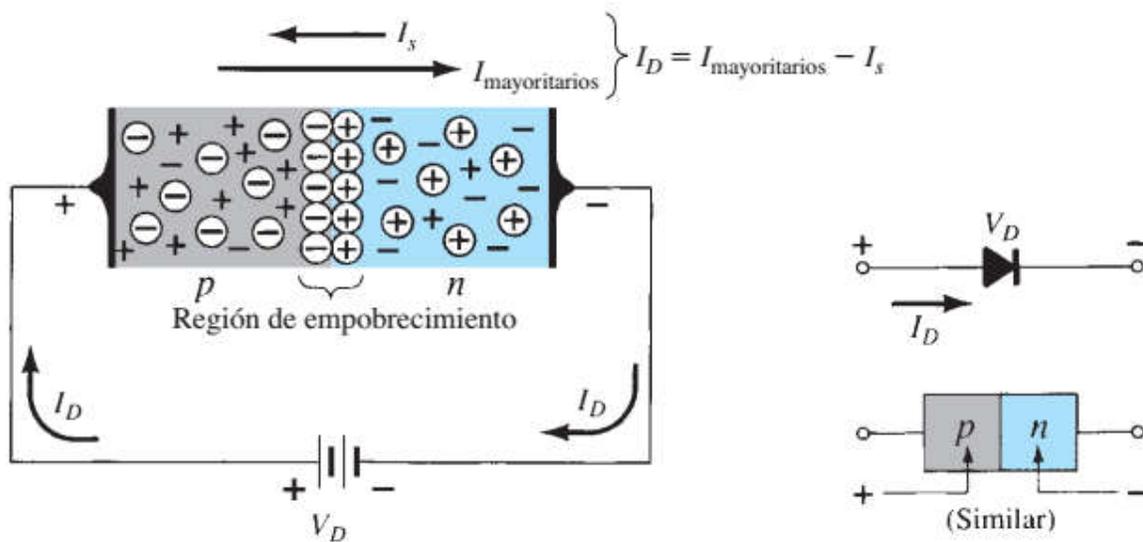


Figura 21.- Juntura p-n polarizada en forma directa.

El bloque p-n descrito en el apartado anterior en principio no permite el establecimiento de una corriente eléctrica entre sus terminales puesto que la zona de agotamiento no es conductora. Si se aplica una tensión positiva en el ánodo, se generará un campo eléctrico que "empujará" los huecos hacia la unión, provocando un estrechamiento de la zona de agotamiento. Sin embargo, mientras ésta exista la conducción es casi nula. Si la tensión aplicada supera a la de barrera, desaparece la zona de agotamiento, electrones y huecos se dirigen a la unión y se recombinan. En estas condiciones la corriente queda determinada por el circuito externo ya que la tensión en bornes de la juntura permanece prácticamente constante.

En resumen, polarizar un diodo p-n en directa es aplicar tensión positiva a la zona p y negativa a la zona n. Un diodo p-n conduce cuando está polarizado directamente, si bien recién cuando la tensión aplicada vence la barrera de potencial los portadores de carga tienen un movimiento suficiente para que la zona de agotamiento se inunde de cargas móviles.

Es posible demostrar mediante el empleo de la física de estado sólido que las características generales de un diodo semiconductor se pueden definir con la siguiente ecuación, tanto para la región de polarización inversa como para la directa:

$$I_D = I_S(e^{V_D/\eta V_T} - 1)$$

Donde:

- 1) I_S : es la corriente de saturación inversa.
- 2) e : (número de Euler) constante matemática aproximadamente igual a 2,71828. Es un número irracional.
- 3) V_D : tensión aplicada al diodo.
- 4) η : factor de idealidad cuyo valor depende de las dimensiones del diodo, del material semiconductor, de la magnitud de I_S y de la potencia que disipa ($\eta = 1$ para el Ge y $\eta = 2$ para el Si).
- 5) V_T : potencial térmico (25,71mV a una temperatura de 25°C).

$$V_T = \frac{k \cdot T}{q}$$

Donde:

- 1) k : constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$).
- 2) q : carga eléctrica de un electrón ($1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$).
- 3) T : temperatura absoluta del diodo ($^\circ\text{K}$).

En la figura 22 se muestra la curva originada por la ecuación anterior. Esta curva representa el comportamiento de un diodo ideal, sin embargo, los diodos reales se desvían de la condición ideal por varias razones, pero fundamentalmente se debe a su resistencia interna y la de sus contactos externos. Cada una contribuye a un voltaje adicional con el mismo nivel de corriente, como lo determina la ley de Ohm, lo que provoca el desplazamiento hacia la derecha, como se observa en la figura 22.

La dirección definida de la corriente convencional en la región de voltaje positivo corresponde a la punta de flecha del símbolo de diodo. En la figura 22 también se observa que la corriente de saturación en inversa, de un diodo real, es notoriamente mayor que la de I_S definida en la ecuación de Shockley. Esto se debe a efectos que no incluidos en dicha ecuación, como la generación de portadores en la región de empobrecimiento y corrientes de fuga superficiales, las cuales son sensibles al área de contacto en la unión. En otras palabras, la corriente de saturación en inversa de un diodo comercial será de un valor mayor que la que aparece como la corriente de saturación en inversa en la ecuación de Shockley.

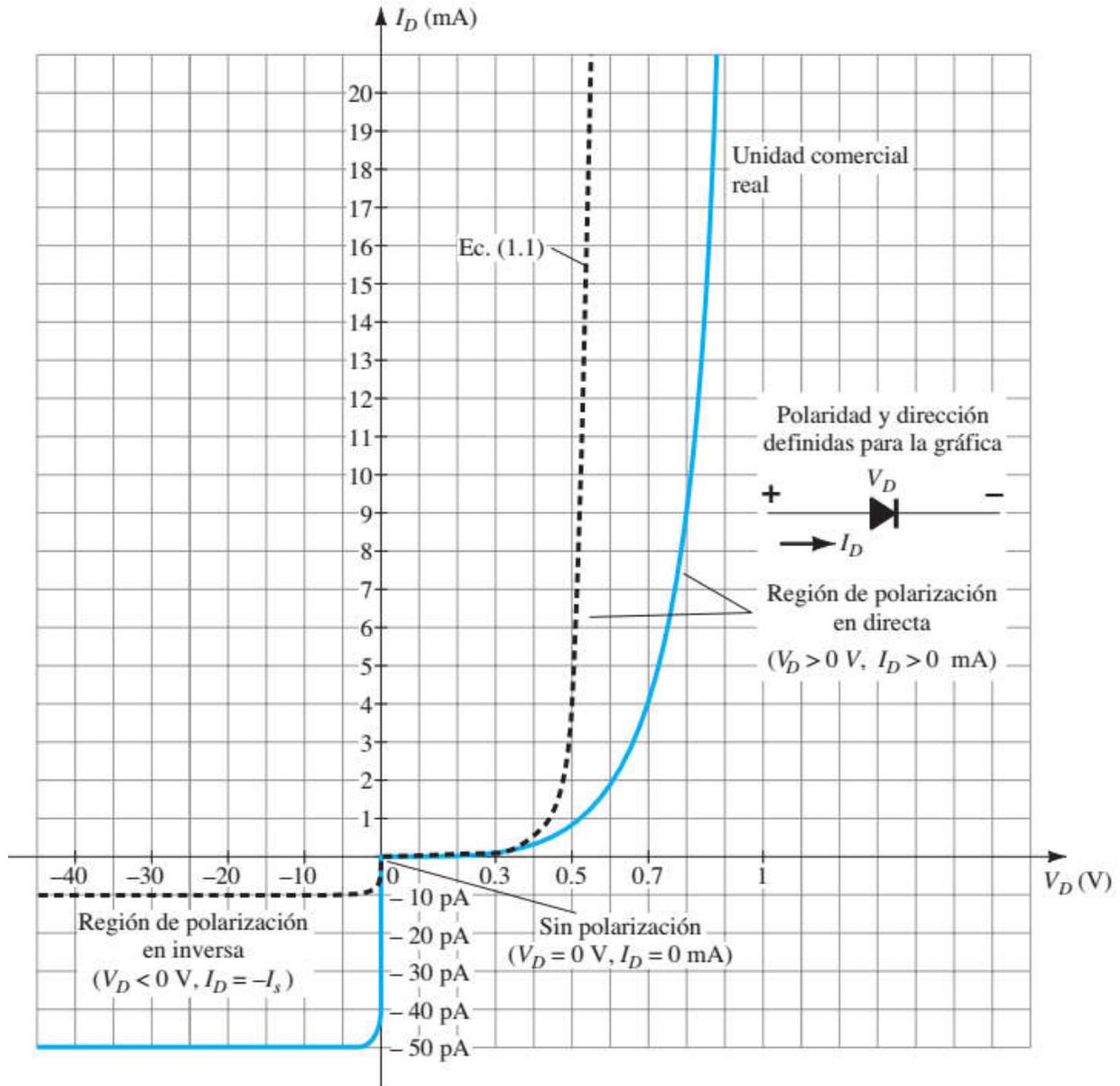


Figura 22.- Curva característica de un diodo ideal y real.

4.2.2 Condición de Polarización en Inversa ($V_D < 0V$)

Si se aplica un potencial externo a través de la unión p-n con el terminal positivo conectado al material tipo n y el negativo conectado al material tipo p, como se muestra en la figura 23, el número de iones positivos revelados en la región de empobrecimiento del material tipo n se incrementará por la gran cantidad de electrones libres atraídos por el potencial positivo del voltaje aplicado. Por las mismas razones, el número de iones negativos no revelados se incrementará en el material tipo p. El efecto neto, por consiguiente, es una mayor apertura de la región de empobrecimiento, la cual crea una barrera demasiado grande para que los portadores mayoritarios la puedan superar, por lo que el flujo de portadores mayoritarios se reduce efectivamente a cero.

Sin embargo, el número de portadores minoritarios que entran a la región de empobrecimiento no cambia, y se producen vectores de flujo de portadores minoritarios. La corriente en condiciones de polarización en inversa se llama corriente de saturación inversa y está representada por I_s .

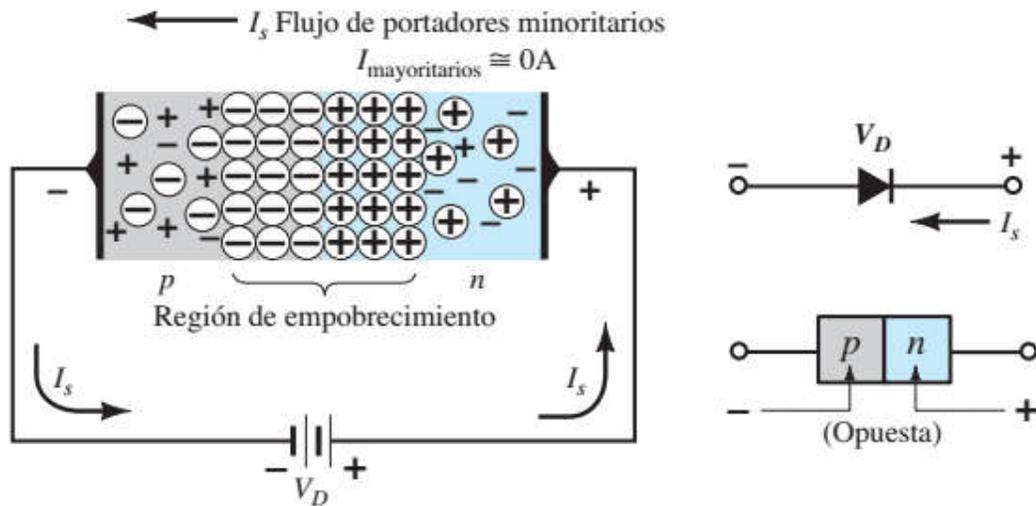


Figura 23.- Juntura p-n polarizada en forma inversa.

La corriente de saturación inversa generalmente es del orden de algunos microamperes, excepto en los diodos de alta potencia. El término "saturación" se deriva del hecho de que alcanza su nivel máximo con rapidez y que no cambia de manera significativa con los incrementos en el potencial de polarización en inversa. Las condiciones de polarización en inversa se ilustran en la figura 23 para el símbolo del diodo y unión p-n. Observe, en particular, que la dirección de I_s se opone a la flecha del símbolo. Observe también que el lado negativo del voltaje aplicado está conectado al material tipo p y el lado positivo al material tipo n.

4.2.3 Región de Zener

Existe un punto donde la aplicación de un voltaje demasiado negativo producirá un cambio abrupto de las características, como se muestra en la figura 24. La corriente se incrementa muy rápido en una dirección opuesta a la de la región de voltaje positivo. El potencial de polarización en inversa que produce este cambio dramático de las características se llama potencial Zener y su símbolo es V_Z .

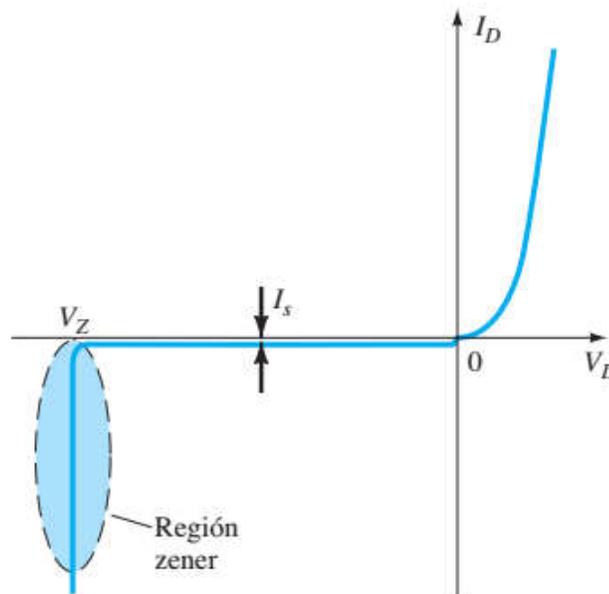


Figura 24.- Región de zener.

A medida que se incrementa el voltaje a través del diodo en la región de polarización en inversa, también se incrementará la velocidad de los portadores minoritarios responsables de la corriente de saturación inversa I_s . Con el tiempo, su velocidad y energía cinética asociada serán suficientes para liberar más portadores por colisiones con otras estructuras atómicas, que de lo contrario serían estables. Es decir, se producirá un proceso de ionización por medio del cual los electrones de valencia absorben suficiente energía para abandonar el átomo padre. Estos portadores adicionales pueden ayudar entonces al proceso de ionización al punto en que se establece una corriente de avalancha, definiendo la región de ruptura por avalancha.

Se puede acercar la región de avalancha (V_Z) al eje vertical incrementando los niveles de dopado. Sin embargo, conforme V_Z se reduce a niveles muy bajos, como por ejemplo -5 V, otro mecanismo, llamado ruptura por zener contribuirá al cambio abrupto de sus características. Esto sucede porque hay un fuerte campo eléctrico en la región de la unión que puede desbaratar las fuerzas de enlace dentro del átomo y "generar" portadores. Aun cuando el mecanismo de ruptura por zener es un contribuyente significativo sólo a niveles bajos de V_Z , este cambio abrupto de las características a cualquier nivel se llama región de zener y los diodos que emplean esta parte única de la característica de una unión p-n se llaman diodos zener.

La región de zener debe ser evitada cuando se utilizan diodos tradicionales, ya que el cambio abrupto en sus características puede llegar a ser irreversible, además de las obvias consecuencias que puede originar como parte de un circuito más complejo.

5. BIBLIOGRAFÍA

1. Robert L. Boylestad y Louis Nashelsky. "Electrónica: Teoría de Circuitos y Dispositivos Electrónicos". Décima edición. Pearson Educación. México 2009.
2. Angel D. Tremosa. "Electrónica del Estado Sólido". Segunda Edición. Ediciones Marymar. Buenos Aires 1980.

6. CUESTIONARIO

1. ¿Cuál es el número atómico del germanio?
2. ¿A que se denomina capa o banda de valencia?
3. ¿De qué compuesto natural se obtiene el silicio?
4. ¿Qué tipo de estructura forman los átomos de silicio o germanio?
5. ¿A qué temperatura, en grados centígrados, equivale 0° Kelvin? ¿Qué ocurre a esa temperatura?
6. ¿Qué nombre recibe un enlace roto? ¿Qué carga tiene? ¿De qué valor?
7. ¿A qué se refiere el término intrínseco?
8. ¿Qué objeto tiene agregar impurezas donadoras? Mencione al menos dos materiales considerados como impurezas donadoras. ¿Cuántos átomos de valencia tienen?
9. ¿Por qué se generan iones positivos fijos en un material tipo N?
10. ¿Cuál es el objetivo de agregar impurezas aceptadoras en un material semiconductor? Mencione al menos dos materiales considerados como impurezas aceptadoras.
11. ¿Por qué se generan iones negativos fijos en un material tipo P?
12. Explique la afirmación: "En la estructura atómica aislada existen niveles discretos de energía..."
13. ¿Cuál es la energía necesaria para que en el germanio, un electrón de valencia pase a la banda de conducción?
14. ¿Cuál es la diferencia entre una banda casi llena y una banda casi vacía?
15. ¿Qué es un material semiconductor extrínseco?
16. ¿A qué componente electrónico da origen una juntura P-N?
17. ¿En qué consiste el mecanismo de difusión?
18. ¿Qué efecto genera la "región de agotamiento" o "región libre de cargas"?

19. ¿Cuándo se establece una condición de polarización directa? ¿Qué ocurre con la región de agotamiento?
20. ¿Por qué existe una diferencia entre la curva real e ideal de un diodo?
21. ¿Cuándo se establece una condición de polarización inversa? ¿Qué ocurre con la región de agotamiento?
22. ¿Qué es el potencial de zener? ¿Qué efecto produce?
23. ¿Qué nombre reciben aquellos diodos que funcionan en esta zona? ¿Cómo deben ser polarizados?