

TEMA 1: FÍSICA DE LOS SEMICONDUCTORES

1. INTRODUCCIÓN

Los semiconductores son materiales con una resistividad entre la de los conductores y los aislantes. Su resistividad puede modificarse mediante dopado, que implica agregar impurezas para cambiar el número de electrones libres. Aumentar los electrones produce un semiconductor tipo N, mientras que reducirlos resulta en un tipo P. El silicio y el germanio son semiconductores destacados que pueden doparse para producir ambos tipos.

La unión de un semiconductor tipo P con uno tipo N forma un diodo, donde las cargas opuestas en la frontera crean una diferencia de potencial. La corriente solo puede fluir en una dirección, de P a N. Los transistores, como el transistor de unión, consisten en configuraciones de PNP o NPN, con tres terminales: emisor, base y colector. Estos dispositivos pueden utilizarse como amplificadores, donde el emisor suministra corriente a través de la base al colector.

2. EL ÁTOMO DE BOHR Y LOS NÚMEROS CUÁNTICOS

Según el modelo de Bohr, los átomos consisten en un núcleo central de protones y neutrones, con electrones orbitando alrededor en órbitas circulares. Bohr propuso varios postulados:

1. Cada una de las órbitas, fue considerada primero como un estado estacionario. A cada uno de estos estados corresponde una cierta energía W_n , dando lugar a los niveles de energía del electrón.
2. Únicamente son posibles aquellas órbitas para las cuales el momento angular (producto de su momento de inercia I por velocidad angular ω) del electrón es un múltiplo entero de $h/2\pi$, donde h es la constante de Planck.
3. El paso de un estado de energía W_{n1} a otro estado de energía W_{n2} , se produce repentinamente con la emisión ($W_{n1} > W_{n2}$) o con la absorción ($W_{n1} < W_{n2}$) de un cuanto de energía.

Sin embargo, se encontró que el número cuántico n , que define la órbita, no era suficiente para describir todos los estados posibles de un electrón y el perfeccionamiento del modelo de Bohr condujo a la introducción de cuatro números cuánticos adicionales: el número cuántico principal (n), el acimutal (l), el magnético exterior (m_l) y el magnético exterior o espín (m_s).

La energía de un electrón en un átomo está determinada principalmente por n y en menor medida por l . La influencia ml y ms en la energía del electrón se considera insignificante.

En un átomo a baja temperatura, los distintos electrones deben disponerse en las órbitas posibles de mínima energía. Para explicar la ordenación de los electrones, Pauli enunció su principio de exclusión: *“En un átomo cualquiera no pueden existir dos electrones en el mismo estado cuántico, esto es, el grupo de valores asignados a los cuatro números cuánticos debe ser diferente para los distintos electrones del átomo”*.

Los electrones de valencia, que son aquellos en los niveles o subniveles sin saturar, son los responsables de los enlaces químicos entre átomos para formar compuestos. Los elementos del grupo IV, como el carbono, silicio y germanio, son fundamentales en el estudio de semiconductores y sus configuraciones atómicas son 14 para el Silicio y 32 para el Germanio.

Cuando un átomo gana o pierde electrones, se ioniza, pudiendo ser positiva (pérdida) o negativa (ganancia). Esta capacidad explica la formación de compuestos mediante la transferencia de electrones y la creación de iones, que se atraen electrostáticamente. En el caso de los elementos del grupo IV, tienden a completar su subnivel p mediante enlaces en una estructura cristalina tetraédrica, donde cada átomo comparte electrones con otros cuatro átomos, formando una disposición equidistante.

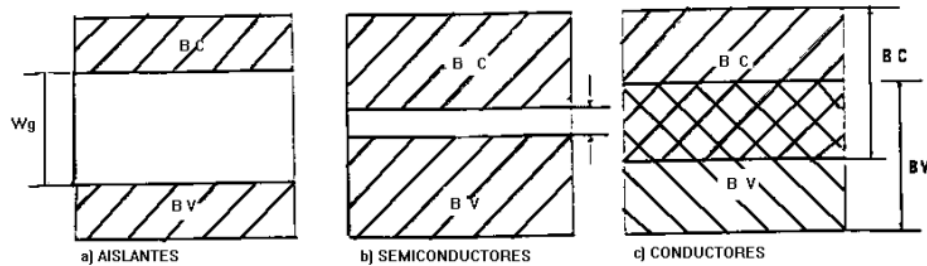
3. BANDAS DE ENERGÍA

La confirmación de los postulados de Bohr por parte de de Broglie y Schrödinger condujo al desarrollo de la mecánica cuántica. En un átomo aislado, los niveles de energía se representan por las capas y subcapas. Sin embargo, en una red cristalina tridimensional formada por átomos, cada átomo influye en los niveles de energía de sus vecinos. Aunque los electrones en las capas internas no se ven afectados, los cambios se observan principalmente en los niveles de energía de las capas exteriores, donde se encuentran los electrones de valencia.

En los aislantes, hay una banda prohibida donde no se encuentran estados posibles para los electrones.

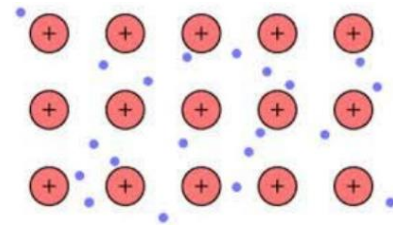
En los semiconductores, no hay banda prohibida y la banda superior se llama banda de conducción, mientras que la inferior es la banda de valencia. A temperaturas bajas, estos materiales se comportan como aislantes porque la energía necesaria para mover un electrón de la banda de valencia a la de conducción es mayor que la energía térmica disponible. Sin embargo, a temperaturas más altas, los electrones pueden adquirir suficiente energía térmica (mayor a la anchura de banda de la banda prohibida W_g) para saltar a la banda de conducción, aumentando así la conductividad.

Cuando la banda de conducción se superpone con la banda de valencia, no hay banda prohibida y se comporta como un conductor eléctrico, ya que se necesita poca energía externa para producir corriente.



4. CONDUCCIÓN EN LOS METALES

Un metal puede conceptualizarse como una región que contiene un sistema tridimensional de iones positivos fuertemente unidos, rodeados por una gran cantidad de electrones que se mueven casi completamente libres, formando lo que se conoce como un "gas de electrones".



Según la teoría del gas electrónico en un metal, los electrones se mueven continuamente, cambiando de dirección en cada colisión con los iones positivos del metal. La distancia promedio entre estas colisiones se llama camino libre medio. Debido a este movimiento errático, no hay un movimiento neto de carga y la corriente resultante es nula.

Cuando se aplica un campo eléctrico E al metal, los electrones son acelerados. Esto añade una pequeña componente de velocidad en la dirección opuesta al campo eléctrico ($-E$). En cada colisión inelástica con un ion, el electrón pierde parte de su energía cinética, pero luego se acelera nuevamente antes de la siguiente colisión. En promedio, esto resulta en una velocidad de arrastre v cuya dirección es opuesta al campo eléctrico y cuyo valor es proporcional a E . Es decir:

$$v = \mu \cdot E$$

Donde μ es la movilidad de los electrones. El flujo resultante de los electrones (carga $-e$) a la velocidad de deriva μ , constituye una corriente. Si hay n electrones libre por metro cúbico. La derivada de corriente J es:

$$J = n \cdot e \cdot v = n \cdot e \cdot \mu \cdot E = \sigma E$$

Siendo $\sigma = n \cdot e \cdot \mu$ la conductividad del material en siemens/metro. La inversa de σ , es la resistividad ρ en ohmios-metro. La ecuación expresa la ley de Ohm en forma puntual que dice que la densidad de corriente es directamente proporcional al gradiente de tensión. Para un conductor de área $A(\text{m}^2)$ y longitud l (m) se tiene:

$$I = J \cdot A = \sigma \cdot A \cdot E = \sigma \cdot A \cdot \frac{V}{l} = \sigma \cdot \frac{A}{l} \cdot V$$

Donde $\sigma \cdot A/l$ es la conductancia G en siemens y la resistencia $R = 1/G$.

Cuando aumenta la temperatura, se incrementa el movimiento térmico, disminuyendo el tiempo entre colisiones, la movilidad se reduce y en consecuencia también disminuye la conductividad. Es una característica de los conductores metálicos el que la resistencia se eleve con la temperatura.

5. SEMICONDUCTORES INTRÍNSECOS O PUROS

Los semiconductores intrínsecos, como el germanio y el silicio, son materiales fundamentales en electrónica debido a su baja presencia de impurezas. Estos elementos, pertenecientes al grupo IV de la tabla periódica, presentan una estructura cristalina tetraédrica, donde cada átomo comparte electrones con cuatro vecinos equidistantes. En condiciones de temperatura cercana al cero absoluto (0 °K), todos los electrones están confinados en la banda de valencia, sin ninguno en la banda de conducción.

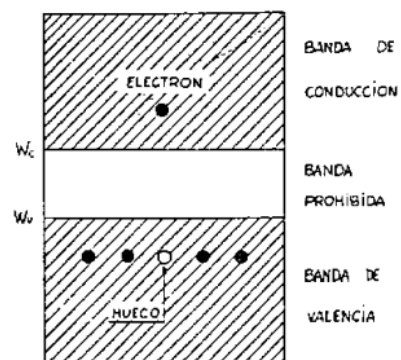
Sin embargo, al aplicar calor al sistema, parte de los electrones de valencia adquieren suficiente energía térmica para superar la energía de la banda prohibida y se convierten en electrones de conducción. Este fenómeno hace que la resistividad del semiconductor disminuya, ya que la movilidad de los portadores de carga aumenta con la temperatura.

A medida que la temperatura continúa aumentando, más electrones pueden saltar la banda prohibida, incrementando aún más la conductividad del material. Esta característica de disminución de la resistencia con el aumento de la temperatura es opuesta al comportamiento de los conductores, donde la resistencia suele aumentar con la temperatura.

Por lo tanto, los dispositivos semiconductores deben funcionar dentro de rangos de temperatura específicos para controlar las características de conductividad.

Por otro lado, en un semiconductor, uno de los cuatro electrones de valencia está incompleto, lo que crea una vacante en el enlace. Esta falta de electrón deja una carga positiva neta en el átomo ionizado y define lo que llamamos un hueco.

Cuando se aplica un campo eléctrico externo, los electrones pueden moverse a través de la banda de conducción. Del mismo modo, si un electrón en la banda de valencia se desplaza para llenar un hueco, crea otro hueco en su posición anterior.



Así, no solo puede haber corriente en la banda de conducción, sino también dentro de la banda de valencia, donde los huecos "saltan" de un átomo a otro.

Un electrón en la banda de conducción tiene un nivel de energía mayor que un electrón (o hueco) en la banda de valencia. Si un electrón necesita una energía de un campo externo para moverse, el electrón de la banda de conducción requiere menos energía adicional que otro en la banda de valencia.

La densidad de corriente en un semiconductor intrínseco en función del campo eléctrico es:

$$J = (n \cdot \mu_n \cdot e \cdot E + p \cdot \mu_p \cdot e \cdot E) = (n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p) \cdot e \cdot E = \sigma \cdot E$$

Donde la conductividad σ es ahora:

$$\sigma = (n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p) \cdot e$$

En un semiconductor puro o intrínseco los huecos y electrones se crean simultáneamente, se tendrá $n=p=n_i$ donde n_i expresa la concentración intrínseca. En Física de semiconductores se demuestra que la concentración intrínseca n_i varía con la temperatura según la relación:

$$n_i^2 = n \cdot p$$

En un semiconductor, los portadores libres, como los huecos y los electrones, se generan continuamente, lo que llevaría a un aumento constante de su densidad si no ocurriera la recombinación. La recombinación es el proceso en el que un hueco se une a un electrón, eliminándose ambos. La tasa de recombinación es proporcional al producto del número de electrones libres y el número de huecos. A una temperatura dada, la velocidad de recombinación debe equilibrarse con la velocidad de generación para que la densidad de portadores libres se mantenga esencialmente constante.

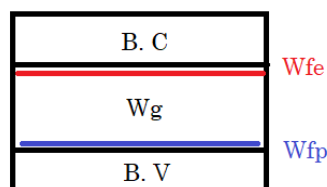
6. DENSIDAD DE NIVELES EN LAS BANDAS DE ENERGÍA

La representación por bandas de energía muestra que existen niveles energéticos posibles para los electrones tanto en la banda de conducción como en la de valencia, separadas por una banda prohibida.

El paso de un electrón desde el borde superior de la banda de valencia al borde inferior de la de conducción requiere una cantidad mínima de energía, conocida como la energía de banda prohibida, necesaria para que cualquier electrón se desplace de una banda a otra.

7. EL NIVEL DE FERMÍ

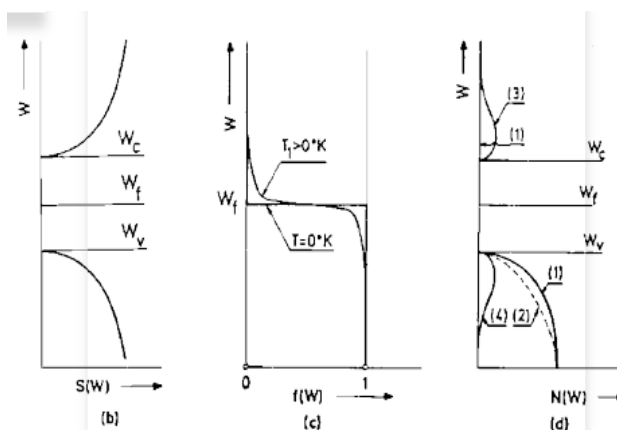
La forma en que se reparte la energía térmica entre los diferentes átomos de un metal o un semiconductor, a una temperatura determinada se realiza mediante la función de Fermi-Dirac, que da la probabilidad de que un determinado estado de energía esté ocupado por un electrón.



8. DISTRIBUCIÓN DE PORTADORES EN LAS BANDAS DE ENERGÍA

En consecuencia, de los dos apartados anteriores podemos decir que el producto de la densidad de niveles disponibles $S(W)$ por la probabilidad de que estén ocupados $f(W)$ da el número de niveles ocupados $N(W)$, en el pequeño intervalo energético considerado dW ; esto es, el número de electrones que, por unidad de volumen, existe en dicho intervalo.

Las curvas marcadas muestran las distribuciones de electrones y huecos en las bandas de conducción y valencia, para un semiconductor intrínseco, a una temperatura superior 0 °K. Puede observarse cómo ambas curvas son simétricas respecto al nivel de Fermi W_f . Su integración daría la cantidad total de electrones y de huecos por unidad de volumen.



La expresión muestra que el nivel de Fermi, para un semiconductor intrínseco, está situado en el centro de la banda prohibida, en consecuencia, el valor de n , de p , o de la concentración intrínseca será:

$$n = p = n_i$$

Es decir:

$$n_i^2 = n \cdot p$$

9. SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS Y SUS DENSIDADES DE CARGA

El material extrínseco tipo N (Silicio) se ha dopado con elementos del grupo 5 y se llama Impureza donadora (N_D). Al formarse la estructura cristalina, el quinto electrón no estará ligado a ningún enlace covalente. Con poca energía el 5º electrón se separa del átomo y pasa a la banda de conducción. La impureza fija en el espacio quedará ionizada (cargada positivamente). En un S/C tipo n, los dopantes contribuyen a la existencia “extra de electrones”, lo cual aumenta “enormemente” la conductividad debida a electrones. ($n \gg p$)

$$n = N_D + n_i$$

Donde $N_D \gg n_i$, por tanto:

$$n \approx N_D$$

$$p = p_i \approx \frac{n_i^2}{N_D}$$

Donde este valor es despreciable.

Por tanto, podemos concluir que:

$$n \cdot p = n_i^2$$

La densidad de corriente es:

$$J = n \cdot q \cdot \mu_e \cdot E \rightarrow \ln(+)$$

El material extrínseco tipo P (Silicio) se ha dopado con elementos del grupo 3 y se llama Impureza Aceptadora (N_A). Al formarse la estructura cristalina, los tres electrones forman el enlace covalente con los átomos de Si, pero queda un hueco (un enlace vacante). A ese hueco se pueden mover otros electrones que dejarán a su vez otros huecos en la Banda de Valencia. La impureza fija en el espacio quedará cargada negativamente. En un semiconductor tipo p, los dopantes contribuyen a la existencia “extra de huecos”, sin haber electrones en la banda de conducción. ($p \gg n$)

$$n = N_A + n_i$$

Donde $N_A \gg n_i$, por tanto:

$$n \approx N_A$$

$$p = p_i \approx \frac{n_i^2}{N_A}$$

Donde este valor es despreciable.

Por tanto, podemos concluir que:

$$n \cdot p = n_i^2$$

La densidad de corriente es:

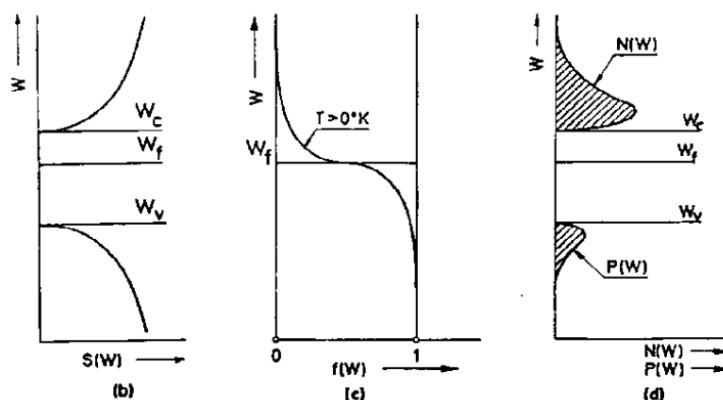
$$J = n \cdot q \cdot \mu_e \cdot E \rightarrow \ln(-)$$

11. POSICIÓN DEL NIVEL DE FERMÍ EN UN S/C EXTRÍNSICO

La situación de este nivel depende de la intensidad del dopado y de la temperatura. Un incremento del dopado donador origina un acercamiento del nivel de Fermi hacia la banda de conducción; un incremento en el dopado aceptador produce un acercamiento del nivel hacia la banda de valencia y un incremento en la temperatura hacia el centro de la banda prohibida.

12. DIFUSIÓN DE PORTADORES

Puede conseguirse también un desplazamiento de portadores por difusión entre una zona de alta densidad de carga y otra de baja; la corriente resultante se llama corriente por difusión.



Si se considera un cristal homogéneo, en el que la repartición de partículas portadoras de cargas es uniforme, no se produce desplazamiento alguno de las mismas.

Si se aumenta en un punto del cristal la concentración de portadores, de modo que exista un gradiente de concentración a lo largo de aquel, las partículas tenderán a moverse desde la zona de mayor concentración hacia la de menor, dando lugar a una corriente eléctrica de difusión proporcional, en cada instante, al gradiente de concentraciones. Pasado un cierto tiempo se habrá

llegado a un equilibrio y la concentración de portadores en todo el cristal volverá a ser uniforme.

En el tipo P, la densidad de corriente es:

$$i_p = -q \cdot D_p \cdot \frac{dp}{dx}$$

Siendo D_p la constante de difusión para los huecos, q la carga del electrón y $\frac{dp}{dx}$ el gradiente de concentración de huecos a lo largo del eje x del cristal.

En el tipo N, la densidad de corriente es:

$$i_p = q \cdot D_n \cdot \frac{dn}{dx}$$

Siendo D_n la constante de difusión para los huecos, q la carga del electrón y $\frac{dn}{dx}$ el gradiente de concentración de electrones a lo largo del eje x del cristal.

Las constantes de difusión están ligadas con las movilidades por la relación:

$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{D_n}{\mu_n} = \frac{KT}{q}$$

denominada ecuación de Einstein; en ella K es la constante de Boltzmann y T la temperatura absoluta.

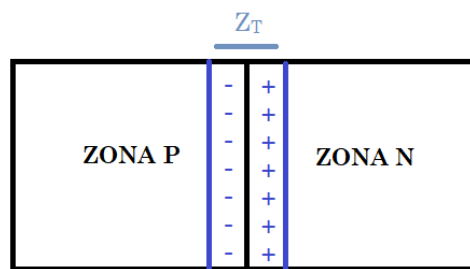
TEMA 2: UNIÓN P-N

1. INTRODUCCIÓN

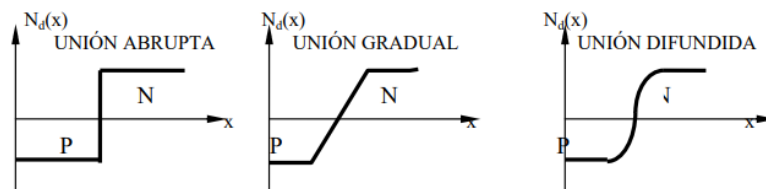
Se dice que en una pastilla semiconductor existe una unión P-N cuando la concentración neta de impurezas, definida como:

$$N(x) = N_D(x) - N_A(x)$$

Es positiva en una parte de la pastilla (zona n) y negativa en la otra (zona p). Se aprecia un perfil de impurezas donadoras y aceptoras, $N_D(x)$ y $N_A(x)$.

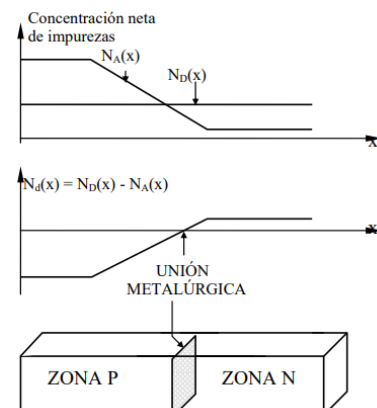


Donde Z_T es la zona de transición o la región de carga espacial. En esta zona se genera el potencial de contacto de la unión P-N. Los tipos de unión son los siguientes:



Puesto que el comportamiento de todos los tipos de uniones es similar, en aras de facilitar el análisis, nos vamos a centrar en el estudio de la unión p-n abrupta ideal.

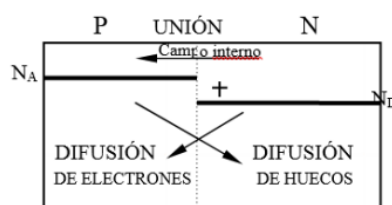
La representación de un cristal conteniendo una unión P-N es la mostrada en la imagen lateral.



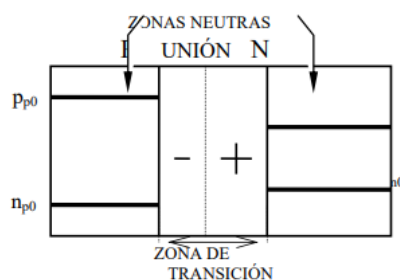
2. DISTRIBUCIÓN DE PORTADORES EN EQUILIBRIO

Una unión p-n está en equilibrio cuando no está sometida a ninguna perturbación externa.

En la figura posterior se representan unos perfiles de impurezas donadoras y aceptoras que dan lugar a una unión abrupta ideal. Dichas impurezas, al ionizarse, liberan electrones y huecos, quedando iones positivos y negativos estáticos, según el caso. Estos se difundirán desde la zona en que están en mayor concentración hacia donde dicha concentración es menor. Debido a que los iones estáticos no se moverán se generará un exceso de carga positiva (iones N_D) a un lado de la unión y, en el otro, de carga negativa (iones N_A). Estos excesos de carga provocan la aparición de un campo eléctrico interno que tiende a llevar a los electrones y huecos en sentido contrario a como se difundían. Cuando el arrastre debido al campo interno se iguala a la difusión se llega a una situación de equilibrio dinámico.



En la figura posterior puede verse como, debido al proceso anterior, se llega a una situación en que aparecen tres zonas en la pastilla semiconductora: dos zonas neutras en ambos extremos (semiconductores homogéneos) y una zona de transición (dipolar, de vaciamiento, despoblada o de carga espacial) a un lado y otro de la unión. Vamos a considerar, que en dicha zona de transición no existen portadores de carga y que no se producen fenómenos de generación-recombinación.



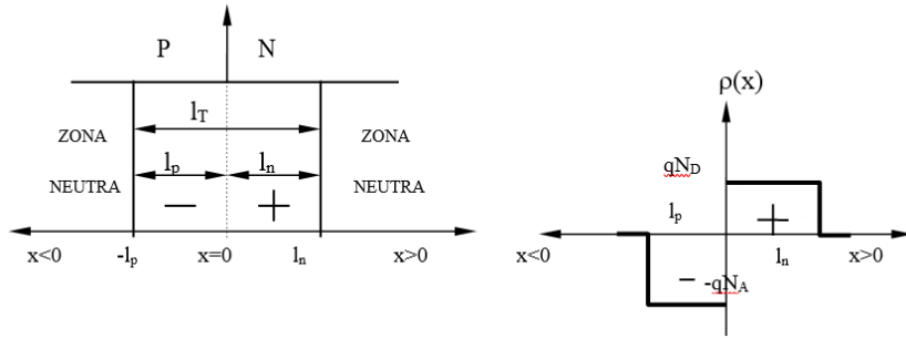
Si suponemos que en la zona n se ha introducido una concentración neta de impurezas, N_D , y en la zona p una concentración neta, N_A , y a la temperatura de estudio (se supone intermedia) se cumple que $N_D \gg n_i$ y $N_A \gg n_i$, entonces:

$n_{n0} = N_D$	y	$p_{n0} = n_i^2 / N_D$
$p_{p0} = N_A$	y	$n_{p0} = n_i^2 / N_A$

Donde la primera fila es para la primera figura y la segunda para la siguiente.

3. DISTRIBUCIÓN DE CAMPO Y POTENCIAL ELÉCTRICOS EN EQUILIBRIO

En la zona de transición es donde aparecen puntos con una carga neta (positiva en la zona n y negativa en la zona p) debida a los iones estáticos. Luego solamente en esta zona aparecerá un campo eléctrico interno, siendo nulo en las zonas neutras. En la figura se ha representado dicha zona dipolar sobre un sistema de referencia con $x=0$ en la unión metalúrgica. La anchura de esta zona se ha representado como l_n por la parte tipo n y como l_p por la parte tipo p. La anchura total de la zona de transición será, evidentemente, $l_T = l_n + l_p$.



Donde la primera imagen es la representación de la zona dipolar y la segunda es la función densidad de carga en dicha zona dipolar.

Suponiendo que en la zona dipolar sólo existen impurezas ionizadas y que, además, éstas están distribuidas homogéneamente, podemos representar la función densidad de carga, $\rho(x)$, tal y como se hace en la figura anterior. Dicha densidad de carga será positiva en la parte correspondiente de la zona n y negativa en la de la zona p:

$$\rho(x) = -q \cdot N_A \quad \text{si} \quad -l_p \leq x \leq 0$$

$$\rho(x) = q \cdot N_D \quad \text{si} \quad 0 \leq x \leq l_n$$

Sabiendo esto y que la distribución del campo eléctrico es:

$$E(x) = \int \frac{\rho(x)}{\epsilon} dx$$

Donde el parámetro ϵ representa la constante dieléctrica absoluta del semiconductor. Por tanto, dependiendo de $\rho(x)$ tenemos:

$$E(x) = -\left(\frac{1}{\epsilon}\right) \cdot q \cdot N_A \cdot x + K_1 \quad \text{si} \quad -l_p \leq x \leq 0$$

$$E(x) = \left(\frac{1}{\epsilon}\right) \cdot q \cdot N_D \cdot x + K_2 \quad \text{si} \quad 0 \leq x \leq l_n$$

Tanto K_1 como K_2 representan constantes de integración que podremos obtener sabiendo que el campo eléctrico debe de ser continuo. De esta forma, al ser el campo nulo en las zonas neutras, también debe serlo en los puntos $x = -l_p$ y $x = l_n$, luego podemos poner:

$$E(x = -l_p) = -\left(\frac{1}{\varepsilon}\right) \cdot q \cdot N_A \cdot (-l_p) + K_1 = 0 \rightarrow K_1 = -\left(\frac{1}{\varepsilon}\right) \cdot q \cdot N_A \cdot l_p$$

$$E(x = l_n) = \left(\frac{1}{\varepsilon}\right) \cdot q \cdot N_D \cdot (l_n) + K_2 = 0 \rightarrow K_2 = -\left(\frac{1}{\varepsilon}\right) \cdot q \cdot N_D \cdot l_n$$

Por tanto, para $x=0$:

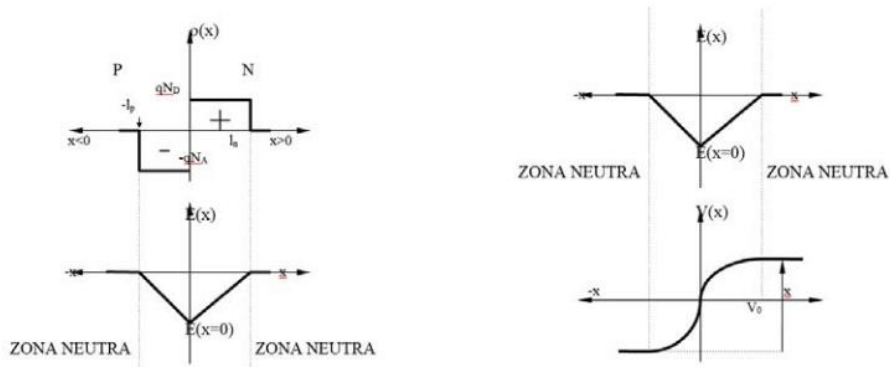
$$E(x = 0) = -\left(\frac{1}{\varepsilon}\right) \cdot q \cdot N_A \cdot (0 + l_p) = \left(\frac{1}{\varepsilon}\right) \cdot q \cdot N_D \cdot (0 - l_n)$$

De donde obtenemos:

$$N_A \cdot l_p = N_D \cdot l_n$$

De esto se deduce que la anchura de la zona de transición es más pequeña en la zona que más se haya dopado.

Representación de las funciones densidad de carga, campo eléctrico y potencial eléctrico en una unión abrupta ideal son:



Como sabemos, el campo eléctrico lleva asociado un potencial E , que se puede ver como:

$$V(x) = - \int E(x) dx$$

Sustituyendo las expresiones anteriores en esta integral:

$$V(x) = \left(\frac{1}{\varepsilon}\right) \cdot q \cdot N_A \cdot (x^2/2 + l_p \cdot x) + K_3 \quad \text{si} \quad -l_p \leq x \leq 0$$

$$V(x) = -\left(\frac{1}{\varepsilon}\right) \cdot q \cdot N_D \cdot (x^2/2 - l_n \cdot x) + K_4 \quad \text{si} \quad 0 \leq x \leq l_n$$

Para determinar las constantes de integración, K_3 y K_4 , podemos fijar el punto $x=0$ como referencia de potencial, hacer $V(x=0)$. De esta forma $K_3 = K_4 = 0$. En la figura anterior se puede apreciar que en las zonas neutras el potencial permanece constante (consecuencia directa de la neutralidad de estas y de que el campo sea nulo en ellas). La diferencia de potencial entre ambas zonas neutras se denomina potencial de contacto o termodinámico (V_0).

4. POTENCIAL DE CONTACTO DE UNA UNIÓN P-N EN EQUILIBRIO

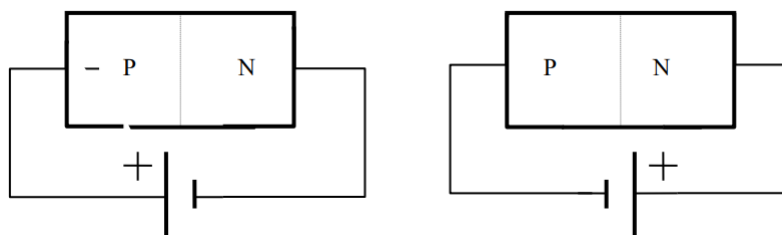
Es la diferencia de potencial entre las dos zonas neutras de la estructura de la unión p-n. Puede calcularse a partir de las concentraciones de portadores. Sea un punto cualquiera de la zona neutra correspondiente al lado n de la unión y otro de la zona neutra del lado p . Entonces, obviamente, el potencial de contacto, V_0 , valdrá:

$$V_0 = V(l_p) - V(l_n)$$

De esta forma si en una unión p-n, en circuito abierto (en equilibrio), medimos la diferencia de potencial entre sus extremos con un voltímetro, obtendremos un resultado nulo. Esto se debe a que, aparte de la unión p-n, aparecen como mínimo otras dos uniones: las de las puntas de prueba del voltímetro con la pastilla semiconductor.

5. LA UNIÓN P-N POLARIZADA

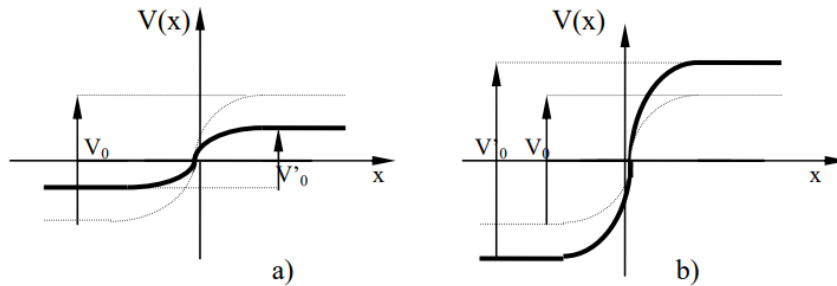
Polarizar la unión es aplicar una diferencia de potencial externa entre sus extremos. Si la zona p queda a más potencial que la zona n se habla de polarización directa, en caso contrario la polarización es inversa.



Como hemos visto, en equilibrio, entre la zona neutra de la parte n y la de la parte p existe una barrera o diferencia de potencial dada por el potencial de contacto (V_0). Cuando polarizamos con una tensión externa (V) en directo se va a contrarrestar dicha barrera de potencial, tal y como se refleja en la figura siguiente (a). La nueva barrera de potencial (V'_0) vendrá dada por:

$$V'_0 = V_0 - V$$

Si la polarización es en inverso la expresión anterior sigue siendo válida, pero sustituyendo $-V$, lo que conduce a un aumento de la barrera de potencial. Esto se refleja en la figura siguiente (b).



Bajo polarización directa, al reducirse la anchura de la zona de transición, aumenta el gradiente de portadores (mayoritarios en una zona y minoritarios en la otra). Esto provoca una gran difusión de estos de un lado a otro de la unión (los electrones se difundirán de la zona n a la p , y los huecos en sentido contrario). Sin embargo, el campo interno, ha sido ahora contrarrestado con la polarización. Esto provoca una ruptura del equilibrio en favor de la difusión dando lugar a corrientes bastante apreciables.

Bajo polarización inversa, el gradiente de portadores se reduce, con lo que disminuye el efecto de difusión. El campo, por contra, se ve reforzado, siendo ahora mayor que en equilibrio.

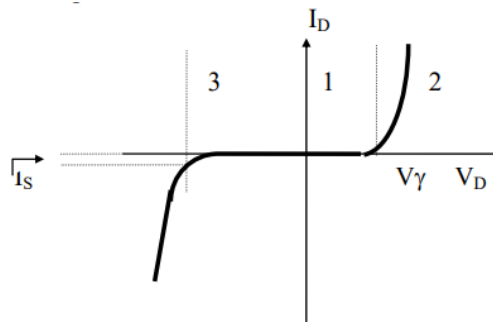
TEMA 3: EL DIODO SEMICONDUCTOR

1. EL DIODO DE UNIÓN

En la figura se representa el símbolo del diodo de unión o diodo semiconductor, que no es más que lo que hasta estos momentos hemos llamada unión PN.



Siendo A el ánodo y C el cátodo. La curva característica tensión-corriente de este diodo es:



Además, se puede dividir en 3 regiones distintas:

- **Zona 1:** Desde 0 V. Vamos incrementando la tensión en sentido directo, la corriente permanece nula hasta un valor determinado, denominado tensión umbral, V_γ , característica de cada tipo de material (para el Si es 0,7).
- **Zona 2:** Si sobrepasamos la tensión umbral, donde el diodo comienza a conducir, es decir, circula corriente por él, en forma creciente y obedeciendo a una función exponencial.
- **Zona 3:** Es la zona inversa, donde se puede llegar a una corriente I_0 de valor aproximado entre 10^{-6} y 10^{-9} A, la cual depende de la temperatura y es poco sensible a la tensión. En un instante determinado, se llega a una tensión V_r , llamada de ruptura, donde la intensidad crece bruscamente con una pequeña variación de tensión, llevando al diodo a su destrucción.

Este aumento de la intensidad se puede deber a dos fenómenos:

- **Disrupción Zener:** Para una tensión suficiente se rompen enlaces covalentes de la zona de transición, aumentando la corriente de minoritarios.
- **Disrupción por avalancha:** Cuando la barrera de potencial es alta, los minoritarios son acelerados, pudiendo extraer pares electrón-hueco por choque contra la red, que a su vez generan nuevos pares.

2. CARACTERÍSTICA DE TENSIÓN-CORRIENTE REAL

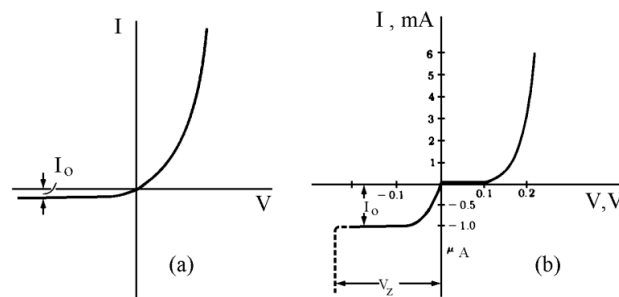
La teoría indica que, para una unión $p-n$, la corriente I se relaciona con la tensión V por medio de la ecuación:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{V}{\eta V_T}} - 1 \right)$$

Un valor positivo de I significa que la corriente circula del lado p al lado n . El diodo está polarizado en sentido directo si V es positivo, indicando que el lado p de la unión es positivo con respecto al n . El símbolo η vale la unidad para el germanio y aproximadamente 2 para el silicio. En consecuencia, a I_0 se la conoce con el nombre de corriente inversa de saturación.

2.1 TENSIÓN UMBRAL V_Y

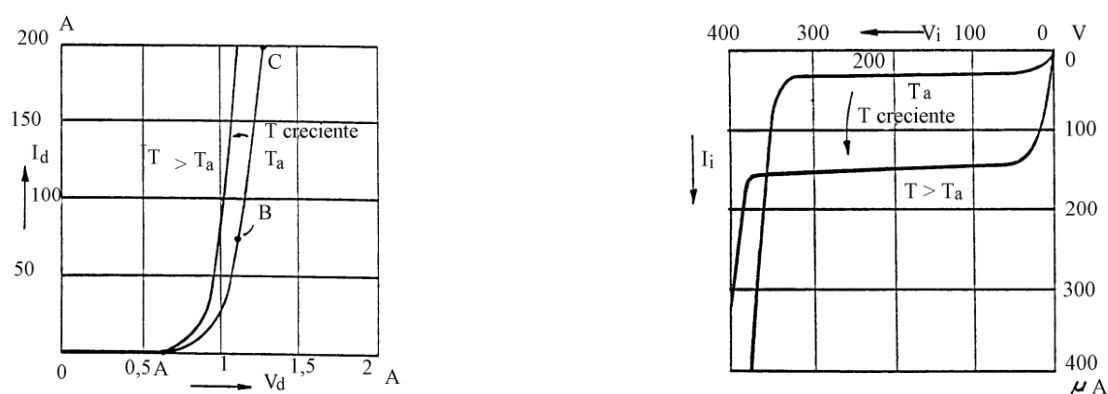
También llamado tensión de codo o de partida, es una tensión por debajo de la cual la corriente es muy pequeña. Por encima de V_Y es, aproximadamente, 0,2 V para el germanio y 0,6 V para el silicio.



En la primera gráfica apreciamos la característica tensión-corriente de un diodo ideal $p-n$ y en la de la derecha la característica tensión-corriente de un diodo de germanio, mostrando el orden de magnitud de las corrientes. La línea de trazos indica la región de ruptura en V_Z .

3. DEPENDENCIA DE LA CARACTERÍSTICA V/I RESPECTO A LA TEMPERATURA

La corriente inversa de saturación se duplica aproximadamente por cada 10° C de aumento de temperatura. Si la temperatura aumenta manteniéndose la tensión, la corriente aumenta, pero si ahora se reduce V, I puede volver a su valor primitivo. Para mantener un valor constante de I. Debemos observar que dV / dT disminuye cuando aumenta la temperatura.



En la primera gráfica podemos apreciar la característica directa típica de un diodo de unión P-N. Se observan las zonas de conducción nula (0A), exponencial (AB) y lineal (BC), así como la disminución de la c.d.t. directa al aumentar T.

En la segunda gráfica podemos apreciar la característica inversa típica de un diodo de unión P-N. Se aprecia la zona en que la corriente inversa es igual a la de saturación y su crecimiento por efecto de avalancha después del codo de la característica. Se observa el aumento de la corriente inversa con la temperatura.

4. RESISTENCIAS ESTÁTICA Y DINÁMICA DE UN DIODO

La resistencia estática del diodo, R_e como:

$$R_e = \frac{V_Q}{I_Q} = \frac{1}{\tan \alpha'}$$

En realidad, R_e representa la resistencia que el diodo está presentando a la corriente continua en el punto de polarización en que se ha calculado. Es fácil deducir que en directo dicha resistencia toma valores bajos (V_Q es relativamente pequeña) mientras que en inverso adopta valores muy elevados (en inverso la corriente es muy baja, $I_Q = I_s$). Por otro lado, se define la resistencia dinámica o incremental del diodo r_d en un punto de polarización (I_Q, V_Q) como:

$$r_d = \left. \frac{dV}{dI} \right|_Q = \frac{1}{\tan \alpha}$$

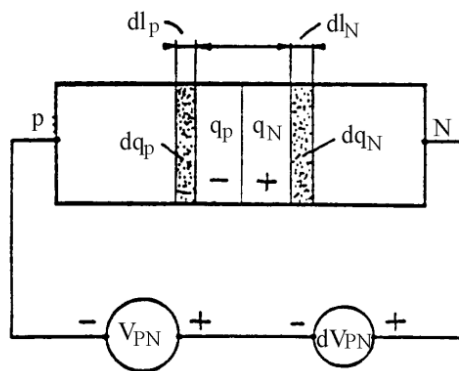
5. CAPACIDAD DE LA CARGA ESPACIAL DE TRANSICIÓN C_T

La polarización inversa provoca que los portadores mayoritarios se alejen de la unión, dejando descubiertas más cargas inmóviles. De ahí que el grueso de la capa espacial aumente con la tensión inversa. Este aumento de carga con la tensión aplicada puede considerarse como un efecto de capacidad.

Se desprende de ello que un cambio de la tensión dV en un tiempo dt da como resultado una corriente $i=dQ / dt$.

Por tanto, es importante conocer C_T cuando se considera un diodo como elemento de un circuito. El valor de C_T se conoce con el nombre de capacidad de la región de transición, de la carga espacial o de la barrera.

La presencia de esta capacidad es la única a tener en cuenta en polarización inversa.



La capacidad de transición no es constante, sino que varía con la tensión aplicada. Cuanto mayor es la tensión inversa, mayor es la anchura de la carga espacial W , y por tanto menor su capacidad C_T . Los diodos contruidos especialmente para aplicaciones basadas en la variación de capacidad con la tensión se denominan varicap o varactores.

6. CAPACIDAD DE DIFUSIÓN

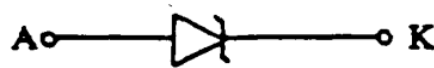
El esquema equivalente de un diodo comprende una resistencia representativa de su resistencia diferencial y en paralelo con la misma, las capacidades de difusión y transición. En polarización directa la resistencia es d y la capacidad de transición despreciable. En polarización inversa la resistencia es i y solo aparece el efecto de capacidad de transición.

En caso de una polarización directa, aparece una capacidad mucho mayor que la capacidad de transición C_T . El origen de esta gran capacidad reside en el almacenamiento de cargas inyectadas cerca de la unión, fuera de la región de transición.

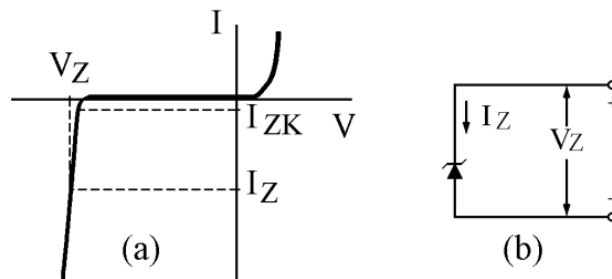
La polarización directa de la unión P-N da lugar a la inyección de portadores mayoritarios (huecos hacia la zona N y electrones hacia la zona P). Esto produce un incremento de concentración de minoritarios en ambas regiones.

7. EL DIODO ZENER

Es un diodo fabricado para trabajar en la zona de ruptura, es decir, en polarización inversa. Su símbolo es:



Y su curva característica es:



El apartado b es el símbolo empleado para este diodo. El límite superior de la corriente viene determinado por la disipación de potencia máxima del diodo.

La tensión de ruptura es la que denominamos V_Z que puede variar desde 0,5V. hasta varias centenas de voltios para potencias de hasta 50W. Para una variación muy pequeña de V_Z podemos obtener una variación de la intensidad de un valor grande, variando esta bruscamente.

8. TIPOS DE DIODOS

8.1 SCHOTTKY

El diodo Schottky se forma al enlazar un metal, como aluminio o platino, a silicio de tipo n. Se utiliza a menudo en circuitos integrados para aplicaciones de conmutación de alta velocidad. El diodo Schottky tiene una característica de tensión contra corriente similar a la del diodo de unión pn de silicio, excepto porque la tensión en directo, V_Y , es 0,3 V en vez de 0,7 V. Cuando el diodo Schottky se opera en modo directo los electrones de tipo n cruzan la unión hacia el metal, donde existen muchos electrones disponibles. Esto produce un dispositivo de portadores mayoritarios que contrasta con los diodos estándar de unión pn , donde los portadores minoritarios determinan las características del diodo.

El diodo Schottky a veces se denomina diodo de barrera, ya que se forma una barrera a través de la unión debido al movimiento de electrones del semiconductor a la interfaz metálica.

8.2 DIODOS VARACTOR O VARICAP

Los diodos de unión pn normales exhiben capacitancia cuando se operan en modo de polarización inversa. El diodo varactor se fabrica específicamente para operar de este modo. La capacitancia es una función de la inversa de tensión. Por tanto, el diodo actúa como capacitador variable, donde el valor de la capacitancia es una función de la tensión de entrada.

8.3 DIODOS EMISORES DE LUZ Y FOTODIODOS

Ciertos tipos de diodos son capaces de cambiar la fuente de energía eléctrica en fuente de energía lumínica. Un electrón puede caer en la banda de conducción a un hueco y liberar energía en la forma de un fotón de luz. La relación entre momento y energía en el silicio y el germanio es tal que el electrón libera su energía como calor cuando regresa de la banda de conducción a la de valencia.

Aunque no existen suficientes electrones en un cristal intrínseco para producir luz visible, cuando se aplica una polarización directa, se inyecta un gran número de electrones del material n al p . Estos electrones se combinan con huecos en el material p en el nivel de energía de la banda de valencia, y se liberan fotones. La intensidad de la luz es proporcional a la velocidad de recombinación de electrones, y, por tanto, proporcional a la corriente del diodo.

Los excesos de huecos y electrones se pueden recombinar bien a través de niveles de recombinación en la banda prohibida (mecanismo dominante en general), o bien directamente por transición desde la BC a la BV. En el primer caso, la energía liberada se entrega como calor y en el segundo como un fotón de energía igual a E_g .

Según esto, uno de los posibles mecanismos para emitir fotones será polarizar fuertemente en directo una unión $p-n$. La clave está en la elección del material adecuado (Ge y Si no son aptos). La energía o longitud de onda de la radiación emitida depende del ancho de la banda prohibida E_g .

Un fotodiodo realiza la función inversa al LED. Esto es, transforma la fuente de energía lumínica en corriente eléctrica. Se aplica polarización inversa al fotodiodo y la corriente de saturación inversa se controla por la intensidad de luz que ilumina el diodo. La luz genera pares electrón-hueco, que inducen corriente. El resultado es una “fotocorriente” en el circuito externo, que es proporcional a la intensidad de luz efectiva en el dispositivo.

8.4 DIODOS PIN

Un diodo que tiene una región poco contaminada y casi intrínseca entre las regiones p y n se llama diodo PIN. El nombre se deriva del material intrínseco entre las capas p y n. Debido a su construcción, el diodo PIN tiene baja capacitancia y encuentra aplicación en frecuencias altas.

Cuando se polariza en directo, la inyección de portadores minoritarios aumenta la conductividad de la región intrínseca. Cuando se polariza en inverso, la región i se vacía totalmente de portadores y la intensidad del campo a través de la región es constante. Se utilizan en modulación de amplitud.

8.5 DIODO TÚNEL (DIODO ESAKI)

El diodo túnel está más contaminado que el diodo Zener, provocando que la zona desértica sea pequeña. Esto aumenta la velocidad de operación, por lo que el diodo túnel es útil en aplicaciones de alta velocidad. Conforme aumenta la polarización directa, la corriente aumenta con mucha rapidez hasta que se produce la ruptura. Entonces la corriente cae rápidamente.

Es un diodo que contiene gran cantidad de impurezas, es decir, está fuertemente dopado. Debido a esto el ancho de la zona de transición es muy pequeño provocando el efecto túnel, por el cuál una partícula sin energía suficiente para sobrepasar la barrera de potencial se desplaza de una zona a otra como si lo hiciese a través de un túnel.

8.6 FOTODIODOS Y CÉLULAS SOLARES

Si nuestra unión tiene el área suficiente, los fotodiodos pueden utilizarse para convertir energía solar en energía eléctrica por efecto fotovoltaico y constituyen las denominadas células solares.