

EL DIODO DE UNIÓN

3.1.- Ecuación y curva característica del diodo.

En la figura 3.1 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.

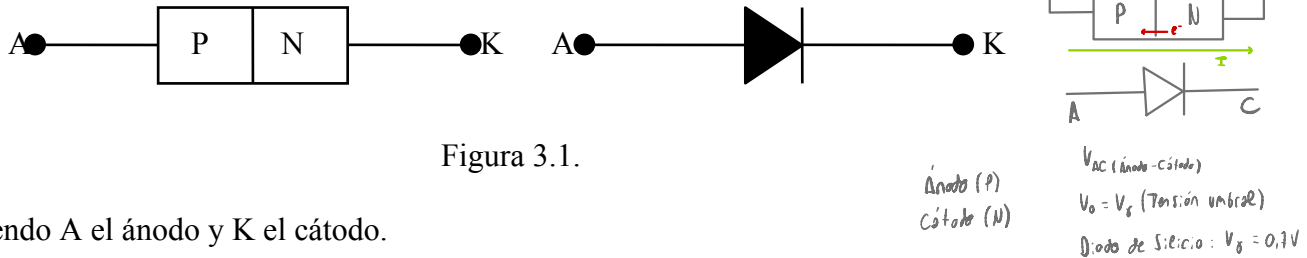


Figura 3.1.

siendo A el ánodo y K el cátodo.

Vamos a obtener una expresión matemática que determina la curva característica del diodo partiendo de la ecuación [4.9], de tal forma que las densidades en equilibrio de electrones en la banda de conducción de la zona P es:

$$n_{p0} = n_{n0} \cdot e^{-qV_0/K \cdot T}$$

ecuación válida para los dos lados de la unión, exceptuando la zona de transición. Al igual ocurrirá con los huecos de un lado y otro en la zona de valencia.

$$p_{p0} = p_{n0} \cdot e^{-qV_0/K \cdot T}$$

Ahora bien, si polarizamos el diodo, el número de electrones y el número de huecos que circulan en una dirección no es igual al número que circulan en la otra, en un mismo espacio de tiempo. Las densidades de electrones y huecos variarán por tanto en los bordes de la zona de transición.

Si llamamos x_p la distancia de la zona de transición en la zona P, donde existe una densidad de electrones igual a n_{xp} , respondiendo a la expresión:

$$n_{xp} = n_{n0} \cdot e^{[q \cdot (U - V_0)/K \cdot T]} = n_{p0} \cdot [e^{q \cdot U/K \cdot T} - 1]$$

expresión que nos indica el incremento de electrones en el borde de la zona de transición con respecto a la de equilibrio n_{p0} .

Igualmente, la de huecos será:

$$\Delta p_{xp} = p_{n0} \cdot [e^{q \cdot U/K \cdot T} - 1]$$

El exceso de electrones en la zona P como el de huecos en la zona N, se difunden por el material, recombinándose con los huecos y electrones, respectivamente, en función de la distancia. El incremento de densidad de electrones en un punto de la zona P situado a una distancia x_p de la unión, cuya longitud de difusión de electrones es L_n en la misma zona P, será:

$$\Delta p_{xp} = p_{n0} \cdot [e^{q \cdot U / K \cdot T} - 1]$$

Debido a la diferencia de concentración entre electrones y huecos a uno y otro lado, podemos hallar la pendiente de la curva de densidad de huecos en la zona N, en el punto x_n y la de electrones en el punto x_p .

$$\left[\frac{dp}{dx} \right]_{x_n} = \frac{\Delta p_{x_n}}{L_p}$$

$$\left[\frac{dn}{dx} \right]_{x_p} = \frac{\Delta n_{x_p}}{L_n}$$

Las corrientes de difusión, tanto debidas a los electrones como a los huecos, son:

$$I_n = -qD_n \left(\frac{dn}{dx} \right)_{x_p}$$

$$I_p = -qD_p \left(\frac{dp}{dx} \right)_{x_n}$$

La corriente total es la suma de los dos:

$$I_T = I_n + I_p = q \left[\frac{D_p p_{n0}}{L_p} + \frac{D_n n_{p0}}{L_n} \right] \cdot (e^{q \cdot V / K T} - 1) \quad (3.1)$$

Al polarizar inversamente se crea una corriente inversa I_s de valor:

$$I_s = q \cdot \left[\frac{D_p p_n}{L_p} + \frac{D_n n_{p0}}{L_n} \right] \quad (3.2.)$$

Que sustituyendo en la ecuación (3.1) se obtiene la ecuación del diodo.

$$I_T = I_s \cdot (e^{q \cdot V / K T} - 1) \quad (3.3.)$$

Partiendo de esta ecuación podemos representar la curva característica representada en la figura 3.2.

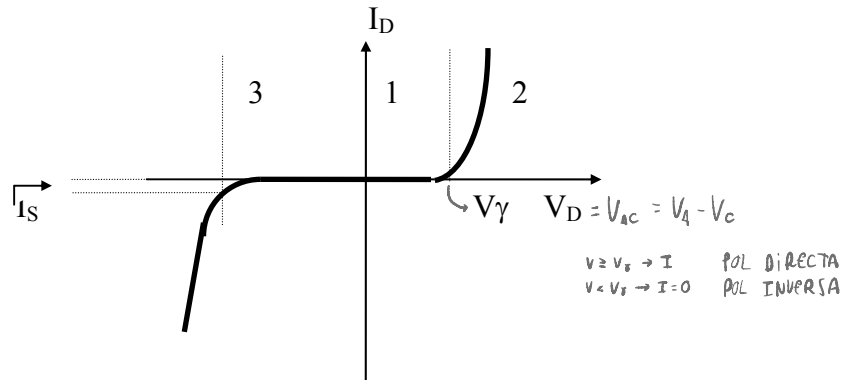


Figura 3.2.

Esta curva representa la característica tensión-corriente en el diodo, la cual se puede dividir en tres 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
- **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_S 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 brusco de intensidad es debido a dos fenómenos:

- A) **Disrupción zener.-** Para una tensión suficiente se rompen enlaces covalentes de la zona de transición, aumentando la corriente de minoritarios.
- B) **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.

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

$$I = I_0 \left(e^{V / \eta V_T} - 1 \right) \quad (3-3)$$

I_0 = inverso de saturación V = potencial V_{AC} η = cte material V_T = potencial térmico

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.

El símbolo V_T significa la tensión equivalente de la temperatura y viene dada por la Ec.:

$$V_T \equiv \frac{T}{11.600} \quad (3-4)$$

A temperatura ambiente ($T = 300^\circ \text{K}$), $V_T = 0,026 \text{ V} = 26 \text{ mV}$.

En la Fig. 3.3a, aparece la forma de la característica de tensión-corriente indicada por la Ec. (3-2). Cuando la tensión es positiva y varias veces superior a V_T , puede despreciarse el 1 del paréntesis de la Ec. (3-2).

Por lo tanto, excepto para un pequeño margen en la proximidad del origen, la corriente aumenta exponencialmente con la tensión. Cuando el diodo se polariza en sentido inverso y $|V|$ vale varias veces V_T , $I \approx -I_0$. En este caso, la corriente inversa es constante e independiente de la tensión inversa aplicada. En consecuencia, a I_0 se la conoce con el nombre de *corriente inversa de saturación*.

Para mayor claridad, en la Fig. 3.3 se ha exagerado el valor de la corriente I_0 . Normalmente, la gama de corriente directa en la que funciona el diodo es varios órdenes de mayor magnitud que la corriente de saturación inversa. Para mostrar convenientemente las características directa e inversa, será necesario, tal como se ha hecho en la Fig. 3.3b, emplear dos escalas de corriente diferentes. En el caso de la figura indicada, la escala de corriente directa está expresada en miliampere y la de corriente inversa en microampere.

La porción de trazos en la curva de la Fig.3.3b, indica que a la tensión de polarización inversa V_Z , la característica del diodo presenta un cambio brusco que se aparta extraordinariamente de la Ec.(3-2). A esta tensión crítica, circula una gran corriente inversa y se dice que el diodo está en la región de ruptura.

Tensión umbral V_γ

Los diodos disponibles en el mercado son de germanio o de silicio. Para el diseño, es importante tener en cuenta un determinado número de diferencias existentes entre ambos tipos. En la Fig. 3.5, aparece la diferencia entre las características tensión-

corriente. En este caso, están dibujadas las características en sentido directo y a la temperatura ambiente de un diodo de computación para los generales, de germanio, y un diodo de empleo generalizado en silicio. Ambos diodos son comparables respecto a sus corrientes. En la Fig.3.5. aparece clara la existencia de una tensión de *codo*, de *partida*, o *umbral* V_γ , por debajo de la cual la corriente es muy pequeña (por ejemplo, menos del 1% del máximo valor nominal). Por encima de V_γ es, aproximadamente, 0,2 V para el germanio y 0,6 V para el silicio.

Obsérvese que la tensión umbral en el diodo de silicio es aproximadamente 0,4 V superior a la del germanio. La razón estriba, en parte, en que la corriente de saturación inversa en el germanio es normalmente superior, unas 1.000 veces más, que la del diodo de silicio de características comparables. I_0 es del orden de microampere para el germanio y de nanoampere para el silicio a temperatura ambiente.

Puesto que $\eta = 2$ para el silicio, con pequeñas corrientes, la intensidad aumenta de la forma $E^{V/2V_T}$ para las primeras décimas de volt y sigue de la forma e^{V/V_T} para mayores tensiones. Esta pequeña dependencia inicial de la corriente con respecto a la tensión explica el ulterior retraso en la elevación de la característica del silicio.

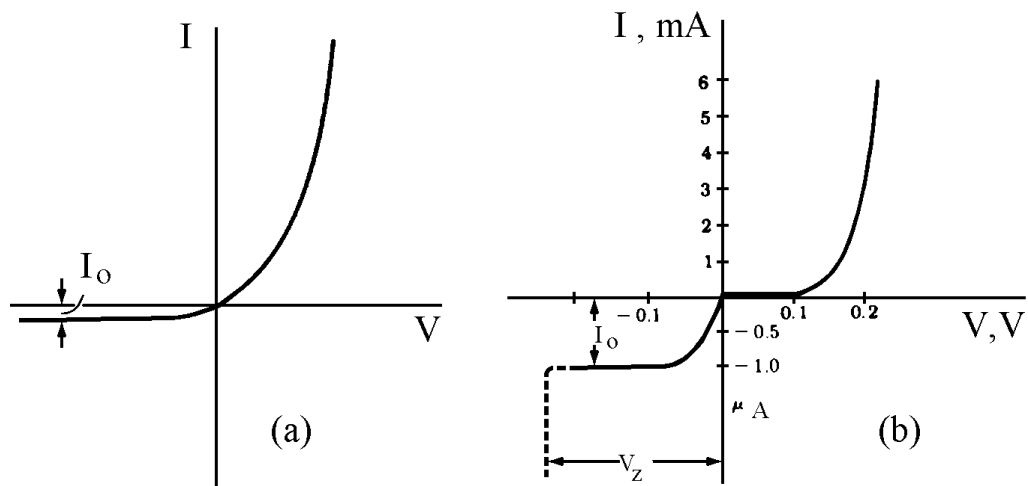


Fig. 3.3. (a) Característica tensión-corriente de un diodo ideal $p-n$. (b) Característica tensión-corriente de un diodo de germanio, mostrando el orden de magnitud de las corrientes. Obsérvese que la escala está ampliada para las corrientes inversas. La línea de trazos indica la región de ruptura en V_Z .

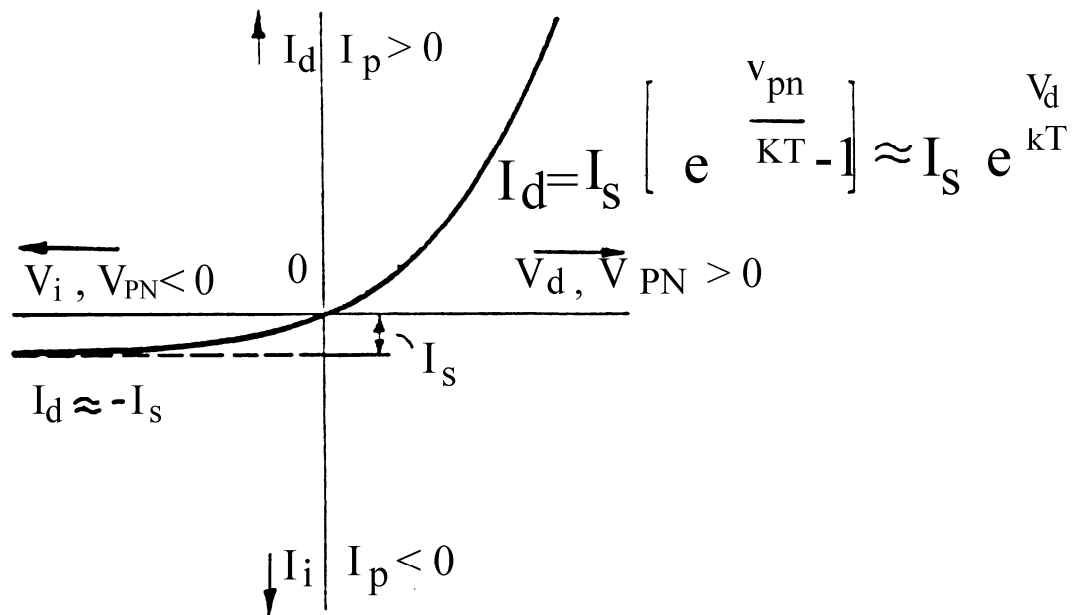


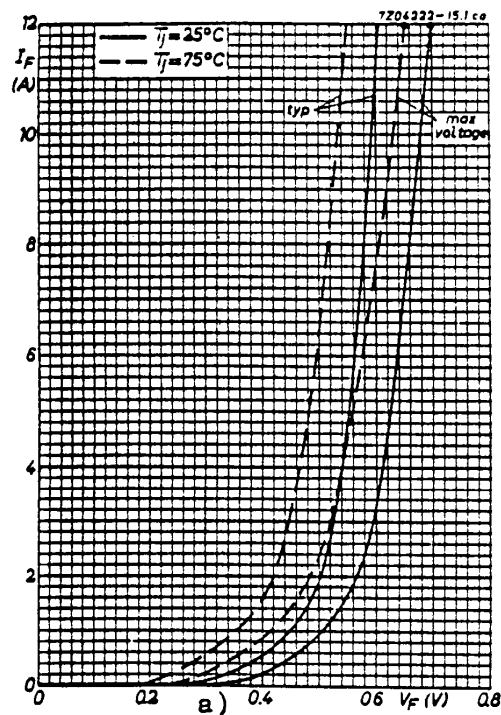
Fig. 3.4. Característica estática teórica de un diodo de unión P-N. Representación gráfica de la ecuación $I_p = f(V_{PN})$. Para valores de $V > 14 KT$ la rama directa responde a la ecuación $I_d = I_s e^{V_d / KT}$ y la rama inversa a $I_i = -I_s$.

Características logarítmicas

Es interesante examinar la familia de curvas de los diodos de silicio, indicadas en la Fig. 3.5b.

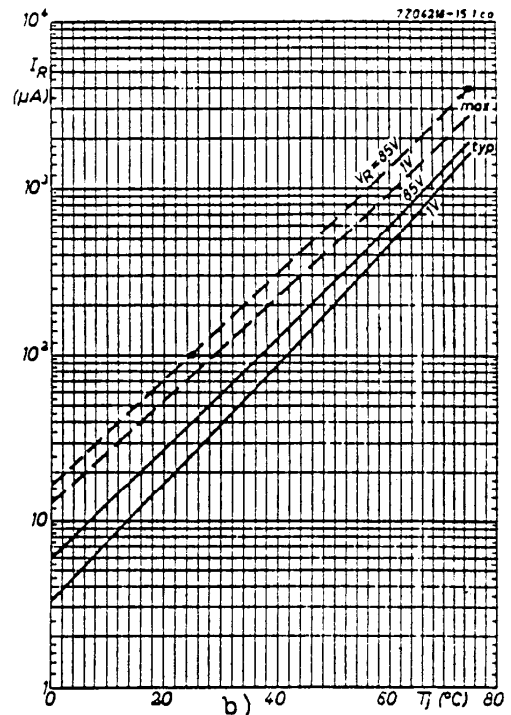
Suponiendo que en la Ec. (3-2) V es varias veces superior a V_T , de tal forma que podemos despreciar la unidad, tenemos $\log I = \log I_o + 0,434 V / \eta V_T$. Por otra parte, podríamos esperar de la Fig. 3.10b, en la que $\log I$ está en función de V , que las curvas fuesen líneas rectas. Verdaderamente, es así para corrientes bajas y que corresponden a $\eta = 2$. Para corrientes elevadas, un incremento de tensión no implica un incremento tan grande de intensidad como con corrientes bajas. La razón de este comportamiento la encontraremos en la resistencia óhmica del diodo. A intensidades bajas, la caída óhmica es despreciable y la acción de la tensión exterior actúa simplemente sobre la barrera de potencial de la unión $p-n$. Para corrientes elevadas, la tensión exterior se emplea principalmente en establecer un campo eléctrico para vencer la resistencia óhmica del material semiconductor. Además, para altas corrientes, el diodo se comporta más como una resistencia que como un diodo y la corriente aumenta linealmente, en lugar de exponencialmente, en función de la tensión aplicada.

En las especificaciones de los fabricantes figuran los valores absolutos máximos y las características eléctricas de los diodos.

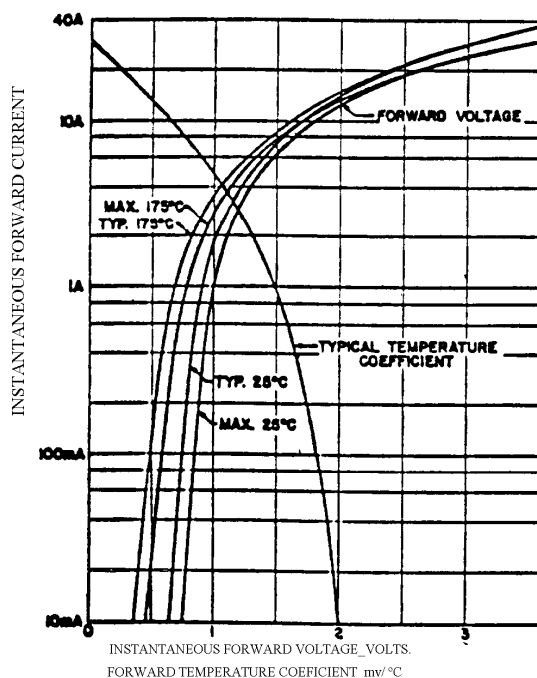


Característica directa.

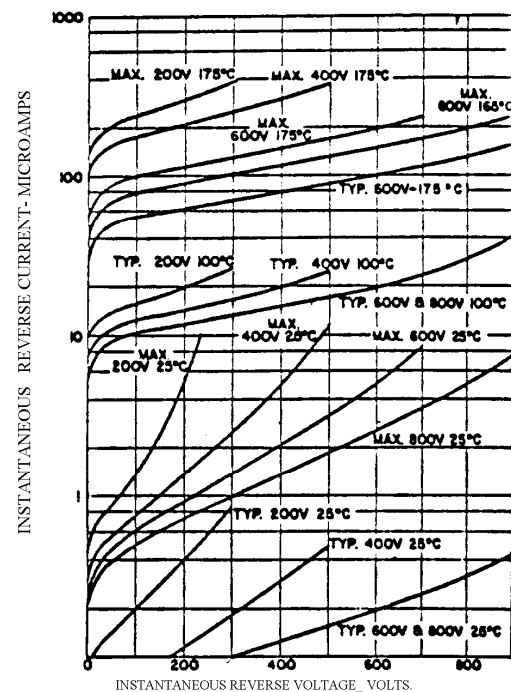
Fig. 3.5a. Diodo de germanio Tipo AYY 10 - 120.



Característica inversa.



Característica directa.



Característica inversa.

Fig. 3.5b. Diodo de silicio Tipo A 14 (1 N 5059-1N 5062)

Corriente de saturación inversa

Muchos diodos comerciales presentan un valor esencialmente constante de I_0 para valores negativos de V , tal como se indica en la Fig. 3.3. Por otra parte, algunos diodos presentan una variación muy pronunciada de la corriente inversa con el incremento de la tensión inversa. Esta variación de I_0 resulta de las fugas en la superficie del diodo, y también del hecho adicional de la creación de nuevos portadores por colisión en la región de transición de la unión.

DEPENDENCIA DE LA CARACTERÍSTICA V/I RESPECTO A LA TEMPERATURA

La función tensión-corriente (3-3) contiene implícita la temperatura en los símbolos V_T e I_0 . Teóricamente, la variación de I_0 respecto a T es de $8 \% / (^\circ \text{C})$ para el silicio y de $11 \% / (^\circ \text{C})$ para el germanio. En los diodos comerciales, estos valores son sólo aproximados. La razón de esta discrepancia es que, en un diodo físico, existen componentes de la corriente inversa de saturación que son debidas a las fugas por la superficie. Se ha observado experimentalmente que la corriente inversa de saturación crece aproximadamente un $7\% / ^\circ \text{C}$, tanto en el silicio como en el germanio. Ya que $1,07^{10} \approx 2,0$, deducimos que *la corriente inversa de saturación se duplica aproximadamente por cada 10°C de aumento de temperatura*. Si $I_0 = I_{01}$ a $T = T_1$, cuando la temperatura es T , I_0 viene dado por :

$$I_0 (T) = I_{01} \times 2^{(T - T_1) / 10} \quad (3-5)$$

Si la temperatura aumenta manteniéndose la tensión, la corriente aumenta, pero si ahora se reduce V , I puede volver a su valor primitivo. Tanto para el silicio como para el germanio (a la temperatura ambiente) tendremos:

$$\frac{dV}{dT} \approx - 2.5 \text{ mV} / ^\circ \text{C} \quad (3-6)$$

para mantener un valor constante de I . Debemos observar que dV / dT disminuye cuando aumenta la temperatura.

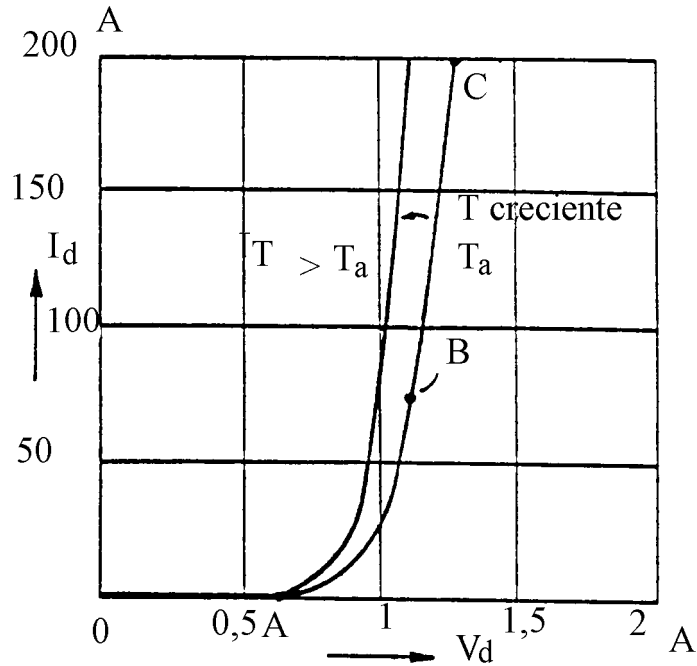


Fig.3.6. Característica directa típica de un diodo de unión P-N. Se observan las zonas de conducción nula (0A), exponencial (AB) y lineal (BC), así como la disminución de la c.d.t. directa al aumentar T.

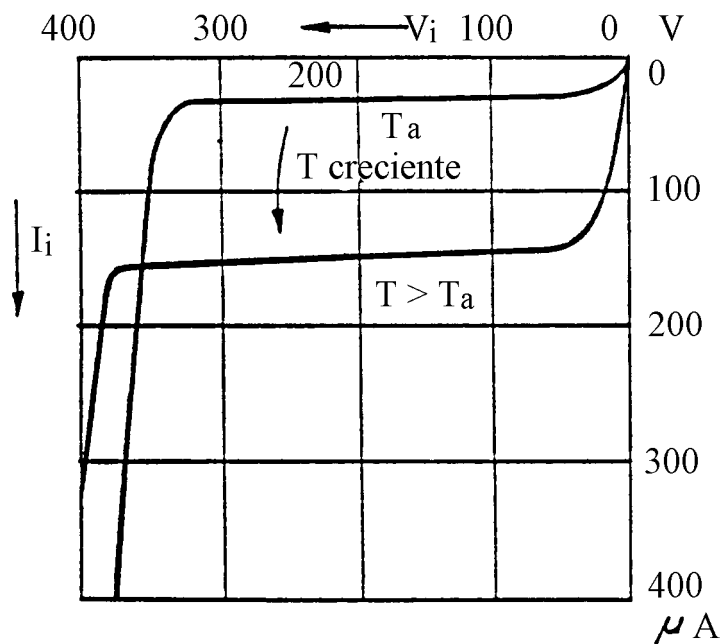


Fig. 3.7. Característica inversa típica de un diodo de unión P-N. Se aprecia la zona en que la corriente inversa es igual a la de saturación y su crecimiento por efecto de avalancha después del codo de la característica. Se observa el aumento de la corriente inversa con la temperatura.

RESISTENCIAS ESTÁTICA Y DINÁMICA DE UN DIODO

Supóngase un diodo que está funcionando en continua en un punto determinado de su característica (I_Q, V_Q). En la fig 3.8 se ha representado un posible punto de polarización, tanto en directo como en inverso, trazándose además dos rectas : una tangente a la característica en dicho punto y otra uniendo los puntos (0,0) y (I_Q, V_Q).

En dicho punto de polarización se define la resistencia estática del diodo, R_e ó R_d 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 evidente que dependerá de dicho punto). 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, $I_Q = I_s$).

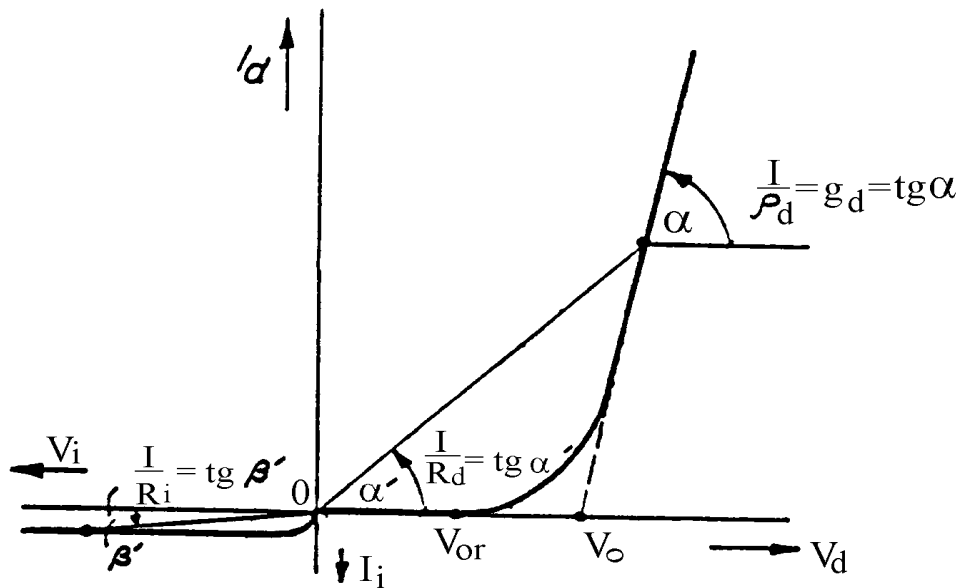


Figura 3.8

Por otro lado se define la resistencia dinámica ó incremental del diodo (r_d) en un punto de polarización (I_Q, V_Q) como :

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

El parámetro g_d representa la conductancia dinámica (inversa de la resistencia dinámica).

resistencia incremental $r_d \equiv 1/g_d$ siendo g_d la conductancia incremental dada por:

$$g_d \equiv \left. \frac{di_D}{dv_D} \right|_Q \quad \Omega^{-1} \quad (3-12)$$

Obsérvese que g_d es simplemente la pendiente de la característica del diodo calculada en el punto de trabajo Q y en consecuencia el valor de r_d es función de la corriente de reposo.

Para un diodo de unión, empleando la Ec. (3-3), la Ec. (3-12) se convierte en:

$$g_d = \frac{I_S e^{V_{DQ}/\eta V_T}}{\eta V_T} = \frac{I_{DQ} + I_S}{\eta V_T} \quad \Omega^{-1} \quad (3-13)$$

Lo más frecuente es que $I_{DQ} \gg I_S$ con lo que la Ec. (3-13) se reduce a

$$r_d = \frac{1}{g_d} \approx \frac{\eta V_T}{I_{DQ}} \quad \Omega \quad (3-14)$$

y podemos observar que la resistencia incremental varía en razón inversa con la corriente. A $T = 20^\circ\text{C}$, $V_T = 25\text{mV}$; por tanto, $r_d = 25\eta/I_{DQ}$ estando I_{DQ} en miliamperios y r_d en ohmios. Para un diodo de silicio ($\eta = 2$) e $I_{DQ} = 5\text{mA}$, $r_d = 10\Omega$

CAPACIDAD DE LA CARGA ESPACIAL DE TRANSICIÓN C_T

Como en el tema 2º , 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. Podemos definir como capacidad incrementa C_T a :

$$C_T = \left| \frac{dQ}{dV} \right| \quad (3-15)$$

donde dQ es el incremento en la carga provocado por el cambio de tensión dV . Se desprende de ello que un cambio de la tensión dV en un tiempo dt da como resultado una corriente $i = dQ / dt$, que viene dada por :

$$i = C_T \frac{dV}{dt} \quad (3-16)$$

Por tanto, es importante conocer C_T cuando se considera un diodo (o un transistor) 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*. A continuación determinaremos el valor de C_T . Esta capacidad no es constante, sino que depende de la tensión inversa, por cuya razón es preferible definir C_T por la Ec. (3-15) en lugar de Q / V .

La capacidad de la región de transición sigue la siguiente ecuación :

$$C_T = \frac{\epsilon A}{W} \quad (3-17)$$

donde A es el área de unión y W la anchura total de la zona de carga espacial.

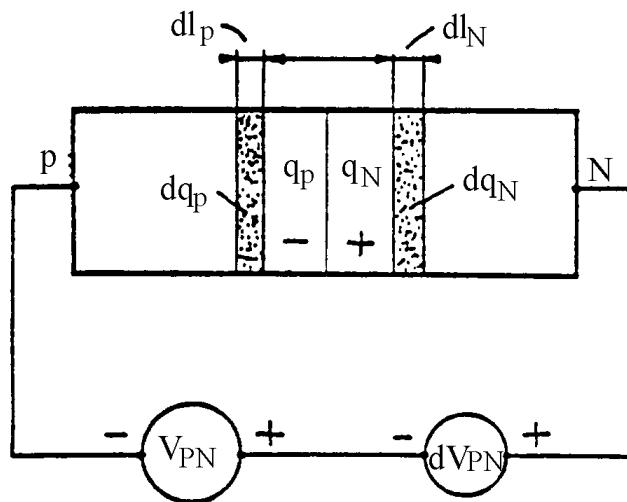


Fig. 3.9. Efecto de capacidad de transición. La presencia de esta capacidad es la única a tener en cuenta en polarización inversa.

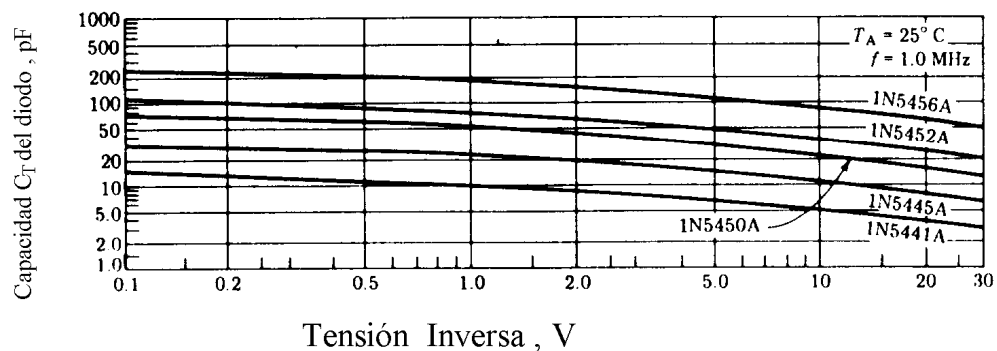


Fig. 3.10. Capacidad de transición C_T en función de la tensión inversa de los diodos tipos del 1N 5441 A al 1N 5446 A.

Diodos de capacidad variable (Varicaps).

De las anteriores ecuaciones se deduce que 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 . Esta variación en algunos diodos típicos está representada en la Fig. 3.10. Estos diodos tienen una relación de capacidad mayor que 3 cuando la tensión inversa varía entre 2 y 30 V. En los diodos de la Fig. 3.10 se pueden tener capacidades C_T comprendidas entre 7 y 100 pF, con una polarización inversa de 5 V. Los diodos construidos especialmente para aplicaciones basadas en la variación de capacidad con la tensión se denominan *varicap* o *varactores*.

Esta propiedad de la unión $p-n$ polariza en sentido inverso cuya capacidad es variable con la tensión, se emplea en numerosos circuitos. Una de estas aplicaciones es la sintonización por tensión por tensión de un circuito resonante LC. Otra aplicación que podríamos citar es en circuitos puente autoequilibrados y en tipos especiales de amplificadores, denominados *amplificadores paramétricos*.

En circuitos construidos para ondas rápidas o de elevada frecuencia, es necesario que la capacidad de transición sea lo más pequeña posible, y ello por la siguiente razón: cuando se desea evitar el paso de señal, el diodo se ha de polarizar en sentido inverso. Sin embargo, si la capacidad C_T de la barrera es demasiado elevada, la corriente que debería restringirse por la baja conductancia del diodo en inversa circulará a través del condensador.

ALMACENAMIENTO DE PORTADORES MINORITARIOS EN UN DIODO.

Si se aplica a un diodo una tensión directa, la barrera de potencial de la unión disminuye y pasan huecos del lado p a la región n . De igual forma electrones tipo n pasan al lado p . Representaremos p_n a la *concentración de huecos en el semiconductor de tipo n* . Si llamamos p_{no} a la pequeña concentración de huecos generados térmicamente, tendremos que la concentración *inyectada* o en *exceso* p_n será $p_n' = p_n -$

p_{no} . Al difundirse los huecos en el lado n encontrarán abundancia de electrones y se recombinarán con ellos. Por tanto, $p_n(x)$ decrece con la distancia x en el material n . Se ha hallado que la densidad de huecos en exceso cae exponencialmente con x .

$$p_n'(x) = p_n'(0) e^{-x/L_p} = p_n(x) - p_{no} \quad (3-18)$$

siendo $p_n'(0)$ el valor de la concentración minoritaria inyectada en la unión $x=0$.

El parámetro L_p se denomina *longitud o distancia* de difusión de los huecos, y está relacionado con la constante de difusión D_p y con la vida media τ_p por :

$$L_p = (D_p \tau_p)^{1/2} \quad (3-19)$$

como puede verse, L_p representa la distancia desde la unión en la cual la concentración inyectada ha bajado hasta $1/e$ de su valor en $x=0$. Se puede demostrar que L_p es también igual a la distancia media que recorre un hueco inyectado antes de recombinarse con un electrón. Por tanto L_p es el recorrido medio libre de los huecos.

La Fig. 3.11a. muestra la relación exponencial de la densidad de portadores minoritarios en exceso en función de la distancia hacia ambos lados de la unión. El área sombreada bajo la curva bajo la curva del tipo n (o tipo p) es proporcional a la carga inyectiva de huecos (o de electrones). Obsérvese que n_p representa la concentración de electrones en un material tipo p a la distancia x desde la unión , siendo $n_p(0)$ el valor de la densidad en $x = 0$.

Ley de la unión.

En la sección 3-2 hemos puntualizado que la polarización en sentido directo disminuirá la altura de la barrera de potencial y llevaba más portadores por la unión. Por lo tanto , $p_n(0)$ deberá ser en función de V . Considerando la relación de Boltzmann, parece razonable suponer que $p_n(0)$ dependa exponencialmente de V . Efectivamente:

$$p_n(0) = p_{no} e^{V/V_T} \quad (3-20)$$

Esta relación se denomina *ley de la unión* y da la concentración de los huecos en el borde de la región n (en $x = 0$, o justamente fuera de la región de transición) en función de la concentración de portadores minoritarios p_{no} en el equilibrio térmico (lejos de la unión), y de la tensión aplicada, V . Una ecuación similar pero con p y n

intercambiados nos dará la concentración de electrones en el borde de la región p en función de V .

Carga almacenada en la polarización inversa.

Cuando una tensión externa polariza la unión inversamente, la densidad de equilibrio de portadores minoritarios aparece indicada en el tema 2°. Lejos de la unión, los portadores minoritarios son iguales a los valores de su equilibrio térmico p_{no} y n_{po} . A medida que los portadores minoritarios se aproximan a la unión son barridos rápidamente y su densidad disminuye a cero en la unión. Este resultado está de acuerdo con la ley de la unión, Ec. (3-20), en que la concentración $p_n(x)$ se reduce a cero para un potencial negativo de la unión V .

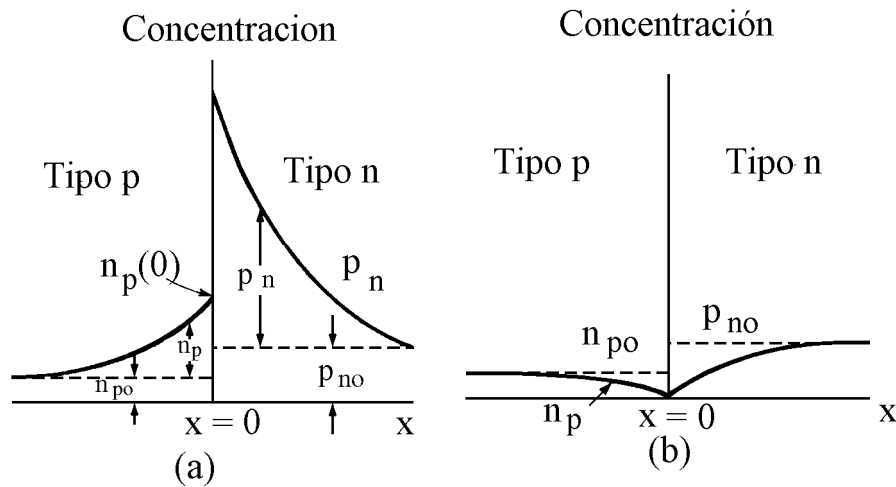


Fig. 3.11 . En las Figuras (a) y (b) se puede ver la distribución de la densidad de portadores minoritarios en función de la distancia x a la unión. (a) Unión polarizada en directo; (b) Unión polarizada en inverso. La densidad en exceso de huecos (electrones)

$$p'_n = p_n - p_{no} \quad (n'_p = n_p - n_{po})$$

es positiva en (a) y negativa en (b). (La región de transición es tan pequeña en relación a la longitud de difusión, que no se señala en la figura). Obsérvese que los gráficos no están a escala, ya que $p_n(0) \gg p_{no}$.

La carga inyectada en la polarización inversa viene dada por el área sombreada de la Figura (b). Esta carga es negativa ya que representa menos carga de la posible en condiciones de equilibrio térmico sin tensión aplicada.

Corrientes de difusión

Del tema 1º se deduce que la corriente de difusión de huecos $I_p(0)$ que cruza la unión bajo polarización directa es proporcional a la pendiente en el origen de la curva p_n de la Figura (a). La correspondiente corriente de difusión de electrones $I_n(0)$ es proporcional a la pendiente en el origen de la curva n_p de la misma figura. Teóricamente se puede demostrar que la corriente de desplazamiento de portadores minoritarios que atraviesa la unión es despreciable frente a la corriente de difusión de portadores minoritarios. Por tanto $I_p(0)$ representa la corriente total de huecos que pasan la unión de izquierda a derecha, mientras que $I_n(0)$ es la corriente total de electrones que la cruzan de derecha a izquierda, por lo que la corriente total I en el diodo es la suma de ambas

$$I_p(0) + I_n(0) \quad (3-21)$$

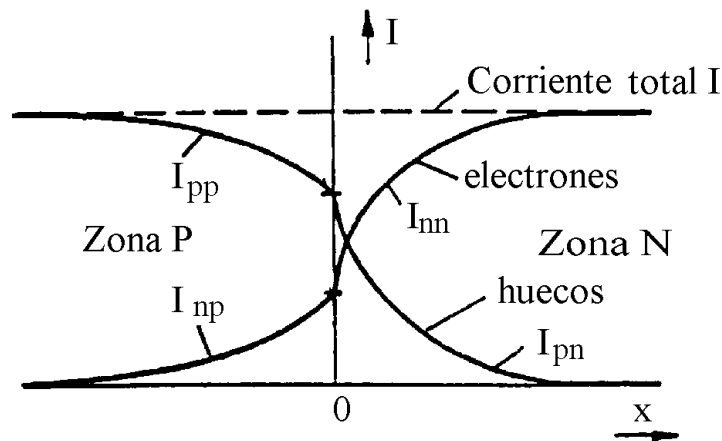


Fig. 3.12. La corriente total de un diodo es la suma de la corriente de huecos (preponderante en zona P) y de la corriente de electrones (preponderante en zona N).

La corriente inversa de saturación de los huecos (o electrones) es proporcional a la pendiente en $x = 0$ de las curvas p_n (o n_p) de la Figura (b). La corriente inversa de saturación total es la suma de ambas y es negativa.

Descripción del control de carga de un diodo

Para simplificar el razonamiento supondremos que uno de los lados del diodo, por ejemplo el material p, está tanto más dopado que el n que toda la corriente I que atraviesa la unión sea debida a los huecos que pasan del lado p al n, o sea que $I = I_p(0)$. Según el tema 1º

$$J_p = -q D_p \frac{dp}{dx} = \frac{I}{A}$$

$$I_p = -A q D_p \frac{dp_n}{dx} \quad (1)$$

$$p'_n(x) = p'_n(0)e^{-x/L_p} = p_n - p_{n0} \Rightarrow p_n = p'_n(0)e^{-x/L_p} + p_{n0}$$

$$\frac{dp_n}{dx} = -\frac{p'_n(0)e^{-x/L_p}}{L_p} \quad \text{sustituyendo en (1)}$$

$$I_p(x) = \frac{AqD_p p'_n(0)e^{-x/L_p}}{L_p} \quad \text{y en } x=0 \text{ queda}$$

$$I_p(0) = \frac{AqD_p p'_n(0)}{L_p} = I(0) \quad (2)$$

$$Q = \int_0^\infty Aq p'_n(x) dx = \int_0^\infty Aq p'_n(0) e^{-x/L_p} dx = \left[-Aq p'_n(0) L_p e^{-x/L_p} \right]_0^\infty = Aq p'_n(0) L_p$$

Sustituyendo en (2) queda

$$(2) * \frac{L_p}{L_p} \Rightarrow I = \frac{AqD_p p_{n(0)} L_p}{L_p^2} = \frac{QD_p}{L_p^2} = \frac{Q}{\tau_p} = I$$

$$I = \frac{Q}{\tau_p} = \frac{Q}{\tau} \quad (3-22)$$

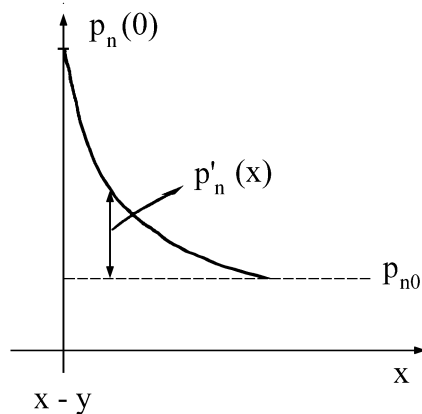


Fig 3.13

La Ec(3-22) es una relación importante conocida como *descripción de control de la carga de un diodo*, y puntualiza que la corriente de un diodo (consistente en huecos que cruzan la unión desde el lado *p* al *n*) es proporcional a la carga *Q* de exceso de portadores minoritarios almacenada. El factor de proporcionalidad es la inversa de la constante de tiempo (tiempo de vida media τ) de los portadores minoritarios. En consecuencia en estado de equilibrio, la *corriente I* suministra portadores minoritarios al mismo ritmo en que desaparecen debido al proceso de recombinación.

La representación de un diodo por su control de carga lo describe en función de la corriente *I* y de la carga almacenada *Q*, mientras que la representación del circuito equivalente emplea la corriente *I* y la tensión en la unión *V*. Una ventaja de la representación por el control de la carga es la de sustituir la relación exponencial entre *I* y *V* por la relación lineal entre *I* y *Q*. La carga *Q* constituye un parámetro cuyo signo determina cuándo el diodo tiene polarización directa o inversa: será directa si *Q* es positiva e inversa si es negativa.

CAPACIDAD DE DIFUSION.

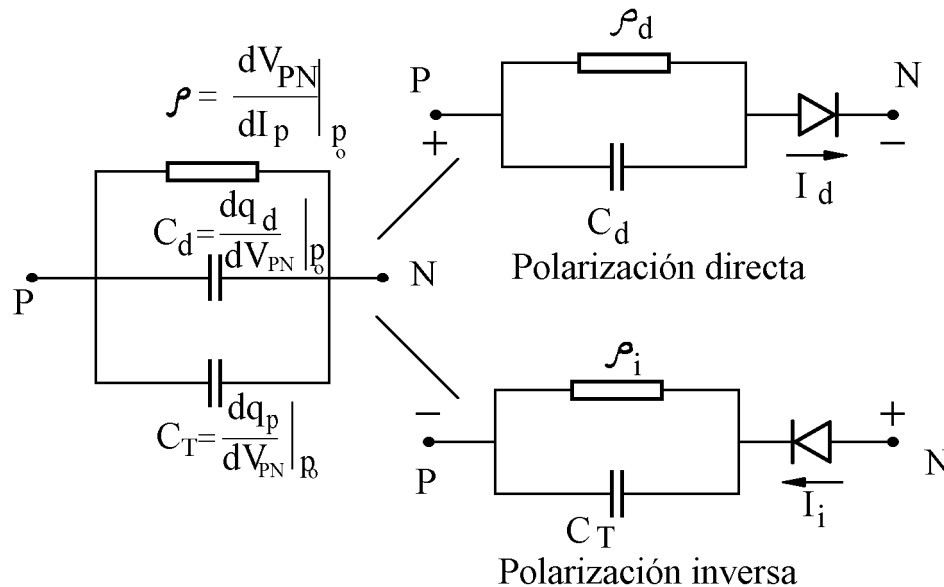


Fig. 3.14a. El esquema equivalente de un diodo comprende una resistencia representativa de su resistencia diferencial y en paralelo con la misma, las capacidades de difusión y transición. En polarización directa la resistencia es d y la capacidad de transición despreciable. En polarización inversa la 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. Es conveniente introducir una capacidad incremental, definida como la relación entre la variación de la carga inyectada y la tensión aplicada, denominada capacidad de la difusión, o almacenamiento C_D .

Obtención estática de C_D

Vamos a hacer un estudio cuantitativo de C_D . De la Ec. (3-22):

$$C_D \equiv \frac{dQ}{dV} = \tau \frac{dI}{dV} = \tau g = \frac{\tau}{r} \quad (3-23)$$

en que $g \equiv dI/dV$ es la conductancia incremental del diodo. Sustituyendo la expresión de la resistencia incremental del diodo $r = 1/g$ de la Ec. (3-23), tenemos:

$$C_D = \frac{\tau I}{\eta V_T} \quad (3-24)$$

Vemos que la capacidad de la difusión es proporcional a la corriente I . En la deducción anterior hemos supuesto que la corriente del diodo I sólo es debida a los huecos. Si no se cumple esta suposición la Ec. (3-23) dará la capacidad de difusión C_{Dp} debida únicamente a los huecos, y se puede obtener una expresión similar para la capacidad de difusión C_{Dp} y C_{Dn}

Con polarización inversa, g es muy pequeña y C_D puede despreciarse comparada con C_T . Para una corriente directa, en cambio C_D es mucho mayor que C_T . Por ejemplo, para el silicio ($\eta = 2$) con $I = 26\text{mA}$, y $C_D = \tau/2$. Si, por ejemplo, $\tau = 20\mu\text{s}$, entonces $C_D = 10\mu\text{F}$, valor que es cerca de un millón de veces mayor que la capacidad de transición.

A pesar del elevado valor de C_D la constante de tiempo rC_D (que es la importante en los circuitos de aplicación) puede no ser excesiva, ya que la resistencia dinámica directa $r = 1/g$ es pequeña. De la Ec. (3-23)

$$rC_D = \tau \quad (3-25)$$

Por lo tanto, la constante del tiempo del diodo es igual a la vida media de los portadores minoritarios, que suele variar desde los nanosegundos a cientos de microsegundos.

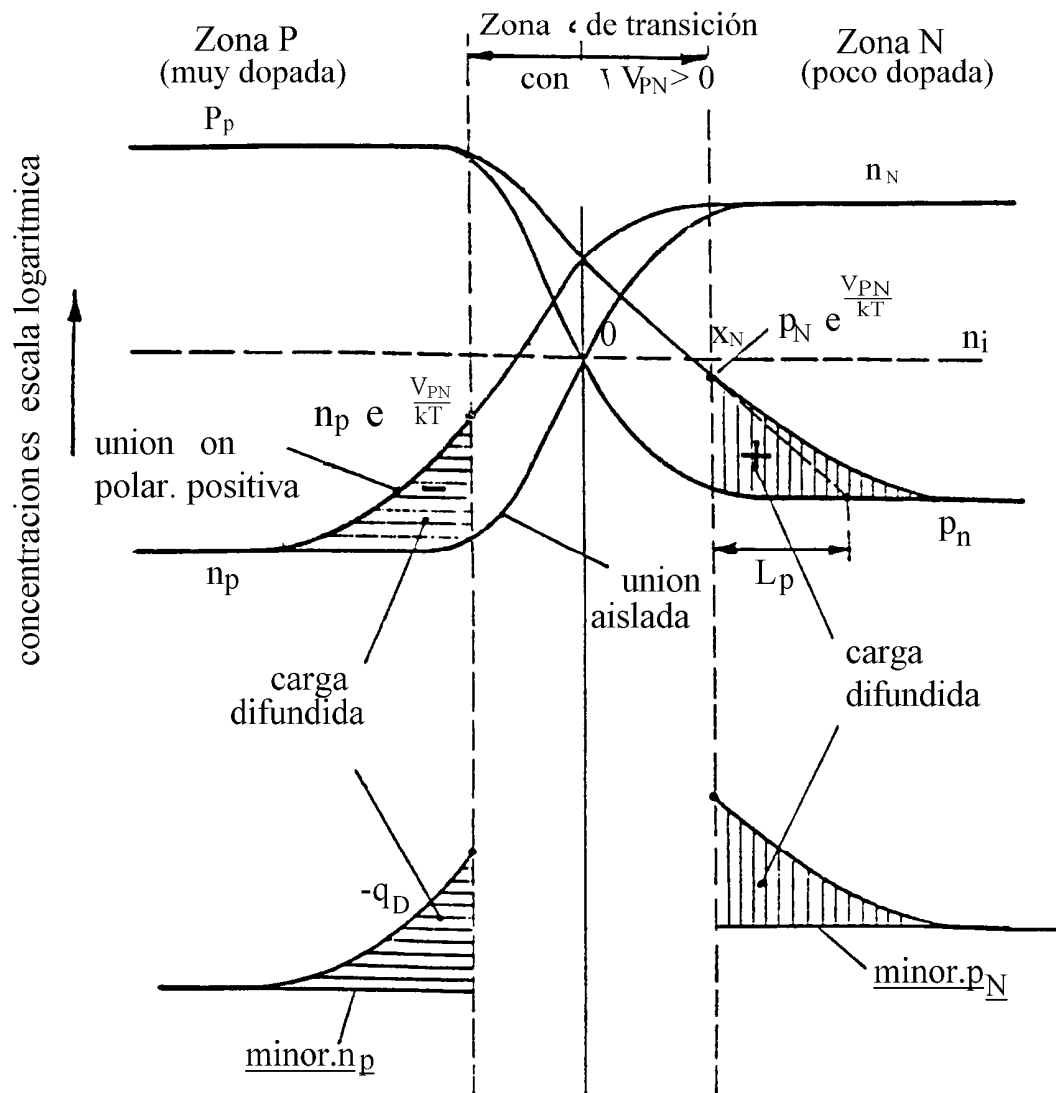


Fig. 3.14b. La polarización directa de la unión P-N da lugar a la inyección de portadores mayoritarios (huecos hacia la zona N y electrones hacia la zona P). Esto produce un incremento de concentración de minoritarios en ambas regiones. Las zonas sombreadas corresponden a la "carga difundida" ($-q_D$ en zona P y $+q_D$ en la zona N). Admitiendo un dopado importante de la zona P, la corriente de huecos es preponderante y por consiguiente la carga difundida en la zona menos dopada es la de mayor importancia. La capacidad de difusión se escribe $C_D = dq_D$ (región menos dopada) / dV_{PN} para una polarización directa V_{PN} .

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:

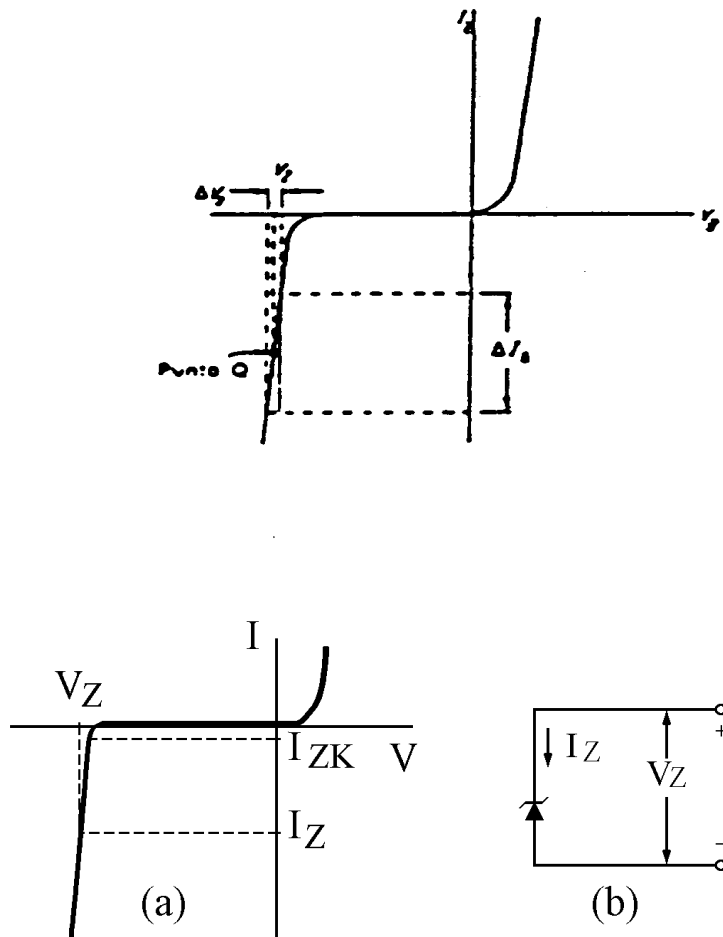


Fig. 3.15. (a) Característica tensión-corriente de un diodo Zener o de avalancha. (b) Símbolo empleado para este diodo. determine que la corriente del diodo caiga por debajo de I_{ZK} en las proximidades del codo de la curva tensión-intensidad. El límite superior de la corriente viene determinado por la disipación de potencia máxima del diodo.

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

FENÓMENOS DE RUPTURA EN LA UNIÓN

Hemos indicado anteriormente que, en inverso, la unión va a estar limitada por la tensión de ruptura. Se define la misma como aquella tensión en inverso para la cual aparece, en la práctica, un gran aumento de corriente por la unión (recuérdese que la corriente en inverso tiende a I_S). Este aumento brusco de la intensidad (véase la figura F-5.48) puede deberse a varias causas que no se excluyan entre sí, sino que se presentan entremezcladas. Dependiendo del tipo, dopado y material de la unión esta tensión de ruptura tomará un determinado valor. A continuación se analizan las tres causas principales de ruptura:

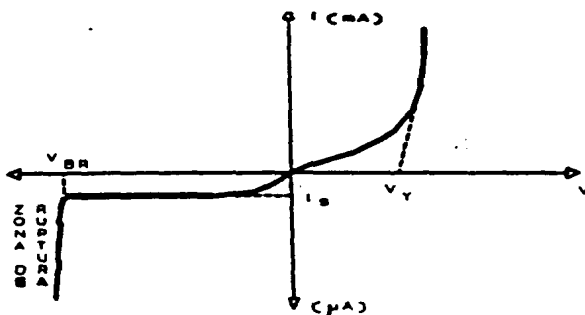


Figura 3.16.- Representación de la ruptura de la unión.

a) Inestabilidad térmica: Se produce puesto que la intensidad inversa de saturación depende de la temperatura (ver expresión <5.60>). La disipación de calor, con tensiones relativamente altas en inverso, es apreciable, provocando un aumento de la temperatura en la unión. Esto, a su vez, hace que aumente I_S y con ello el calor disipado (con lo que sigue aumentando la temperatura, también I_S , etc.). Como se observa se entra en un proceso acumulativo que puede destruir la unión.

b) Multipliación por avalancha: En una unión poco dopada existe una zona de transición relativamente ancha. Al aplicar tensiones “altas” en inverso, el campo que se origina en dicha zona es muy intenso. Los portadores de carga que atraviesan dicha zona pueden adquirir energía suficiente como para chocar con los átomos de la red y hacer saltar los electrones de los enlaces covalentes generando pares electrón-hueco, que a su vez son arrastrados produciendo nuevos choques (efecto multiplicativo), liberando una gran cantidad de portadores que dan origen al aumento brusco de la corriente.

La tensión de ruptura, en el caso de avalancha, aumenta con la temperatura. Esto se explica porque al aumentar la agitación térmica de la red con la temperatura, disminuye la portabilidad de los portadores (disminuye el camino medio entre choques).

Lo anterior conduce a que tenga que existir un campo más intenso (mayores tensiones) para conseguir el mismo efecto multiplicativo que a una temperatura menor.

c) Efecto túnel o Zener: Cuando ambos lados de la unión están muy dopados la zona dipolar es muy estrecha. En este caso, aunque el campo sea muy intenso, los portadores que atraviesan la unión no tienen mucha oportunidad de chocar con los átomos de la red ni de adquirir energía suficiente como para producir el fenómeno de multiplicación por avalancha. Sin embargo, en estos casos también se produce el fenómeno de ruptura, que ahora se explica debido al llamado efecto túnel.

Debido al intenso campo eléctrico (aunque no se produzcan choques) algunos electrones de valencia son arrancados del enlace covalente generándose los pares electrón-hueco que provocan el brusco aumento de corriente. Lo curioso del fenómeno es que el campo eléctrico no es capaz de proporcionar a los electrones una fuerza superior a la que ejercen los enlaces sobre ellos. Desde el punto de vista clásico, bajo esta perspectiva, los electrones no podrían ser arrancados del enlace.

Si $V_Z < 5 \text{ V}$ es el efecto Zener (túnel), y si $V_Z > 6 \text{ V}$ es la multiplicación por impacto, el proceso causante de la disrupción. La dependencia de V_Z con la temperatura es positiva para el proceso de la ionización por impacto y tiene signo negativo en el efecto túnel.

ESTABILIZADORES DE TENSION. DIODOS ZENER.

Se dice que una tensión está estabilizada cuando apenas sufre variaciones ante cambios en la intensidad (dentro de un determinado rango).

Obsérvese por ejemplo el circuito de la figura 3.17a). Se sabe que la tensión de entrada sufre variaciones con el tiempo debido a diversos factores. Si la característica del diodo tiende a la característica ideal representada en la figura 3.17.b) se observa que la tensión de salida, siempre que consigamos que el diodo trabaje en la zona de conducción, es fija y de valor la tensión umbral del diodo. Si agrupamos varios diodos en serie podemos conseguir estabilizar tensiones superiores a la tensión umbral.

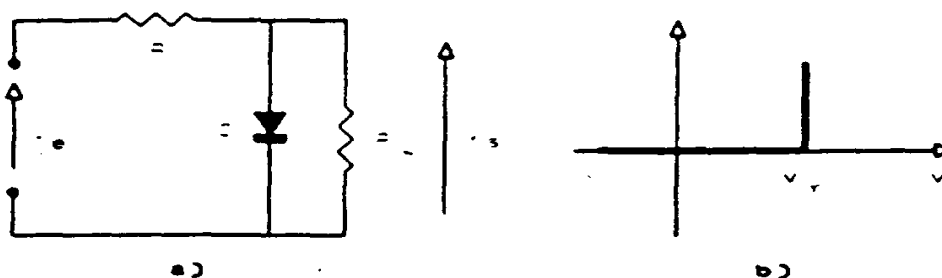


Figura 3.17a).- Circuito para estabilización de una tensión.

b).- Característica ideal de un diodo.

Sin embargo, ni la característica del diodo es tan vertical ni es práctico asociar muchos diodos en serie para estabilizar tensiones grandes (aparte de que no se puede conseguir más que determinadas tensiones -múltiplos de la tensión umbral-).

Existe un tipo de diodos que aprovechan el efecto de ruptura de la unión. Para ello se sigue un proceso de fabricación controlado de forma que al llegar a la tensión de ruptura la corriente circule de manera homogénea y, entre unos determinados límites, no destruya la unión. En la figura 3.18a) se ha representado la característica que resultaría para un diodo de este tipo, junto con el símbolo empleado. La misma característica idealizada se ha representado en la figura 3.18b).

Los diodos así fabricados son denominados diodos Zener. Para ellos no se habla de tensión de ruptura sino que habitualmente se referencia como tensión Zener. Dicha tensión Zener tendrá un coeficiente de temperatura positivo o negativo según sea su valor y dicho valor es controlable en función del grado de dopado). De todos modos el fabricante da un valor de tolerancia sobre la tensión Zener nominal o esperada. La pendiente de la recta en la zona de ruptura es dada en forma de resistencia dinámica. Son importantes también dos valores de intensidad: intensidad en inverso a la que comienza el codo (I_{Zk}) e intensidad máxima permitida (I_{ZM}).

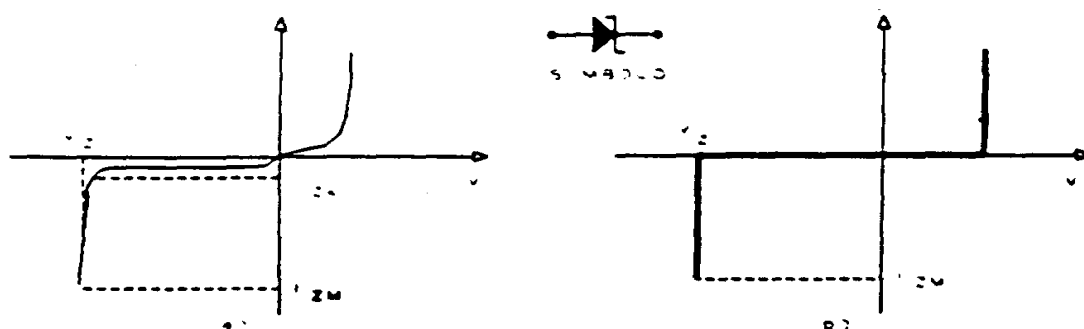


Figura 3.18a).- Característica de un diodo Zener. b).- Idem ideal.

A la vista de la característica del diodo puede observarse que la zona de conducción en inverso nos permite estabilizar una tensión para un amplio margen de intensidades a través del diodo.

Sea, por ejemplo, el circuito genérico representado en la figura F-3.19.a). Suponiendo que el diodo tiene una característica ideal como la de la figura F-3.19.b), veamos entre qué margen puede variar la tensión de entrada garantizando que la de salida no varía (es decir, está estabilizada).

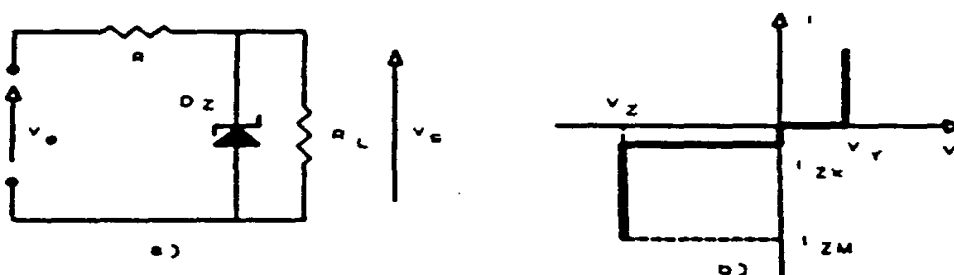


Figura 3.19a).- Circuito para estabilización de tensión con diodo Zener.
b).- Característica ideal del diodo.

Suponer que el diodo es ideal simplifica los cálculos. En las características reales podrá observarse el grado de aproximación que se está efectuando.

En el circuito de la figura F-5.101.a) el objetivo a alcanzar es que V_s sea igual a V_Z para un determinado margen de tensiones de entrada. Para ello debe lograrse que:

$$I_{Zk} \leq I_Z \leq I_{ZM} \quad (3.25)$$

Analizando dicho circuito, suponiendo que el diodo está fijando la tensión Zener (V_Z), es inmediato poner:

$$I_R = I_Z + I_L$$

$$I_L = V_Z / R_L \quad (3.26)$$

$$I_R = (V_e - V_Z) / R$$

Combinando estas relaciones con la condición (3.25) obtendremos:

$$I_Z \geq I_{Zk} \Rightarrow I_R - I_L \geq I_{Zk} \Rightarrow \frac{V_e - V_Z}{R} - \frac{V_Z}{R_L} \geq I_{Zk}$$

Es decir:

$$V_e \geq \left[I_{Zk} + \frac{V_Z}{R_L} \right] \cdot R + V_Z \quad (3.27a)$$

Además:

$$I_Z \leq I_{ZM} \Rightarrow I_R - I_L \leq I_{ZM} \Rightarrow \frac{V_e - V_Z}{R} - \frac{V_Z}{R_L} \leq I_{ZM}$$

Esto es:

$$V_e \leq \left[I_{ZM} + \frac{V_Z}{R_L} \right] \cdot R + V_Z \quad (3.27b)$$

Si la tensión de entrada está en el margen definido por (3.27a y b) se garantiza que la salida está estabilizada a la tensión Zener del diodo.

TIPOS DE DIODOS

Esta sección presenta brevemente los siguientes tipos de diodos:

- Schottky
- Varactor ó Varicap
- Túnel
- Emisor de luz
- Fotodiodo
- PIN

Diodos 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. Su símbolo y su construcción se muestran en la figura 3.20. 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_γ , es 0,3 V en vez de 0,7 V. Cuando el diodo Schottky se opera en modo directo, se induce corriente por el movimiento de electrones del silicio de tipo n a lo largo de la unión y a través del metal. Como los electrones se mueven casi sin resistencia a través de los metales, el tiempo de recombinación es pequeño, del orden de 10 ps. Esto es más rápido que un diodo ordinario de unión pn . Por tanto, el diodo Schottky es de gran valor en aplicaciones de conmutación de alta velocidad. La capacitancia asociada con el diodo es pequeña.

El material metálico en el contacto 1 y la región n poco contaminada forman una unión rectificadora, mientras que la región n muy contaminada y el contacto 2 forman un contacto óhmico. Los electrones en dirección directa del silicio 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.

Los diodos Schottky son útiles en la tecnología de CI porque resultan fáciles de fabricar y pueden construirse al mismo tiempo que los otros componentes del circuito integrado (chip). La fabricación de un diodo Schottky en un circuito integrado requiere de un paso menos que la fabricación de un diodo de unión pn , ya que éste necesita la difusión adicional del tipo p . Las características de bajo ruido del diodo Schottky lo hacen ideal para aplicaciones en supervisión de potencia de radiofrecuencias de bajo nivel, en detectores de alta frecuencia y en mezcladores de radar Doppler.

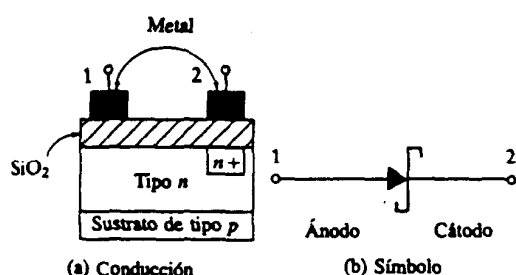


Figura 3.20 Diodo Schottky

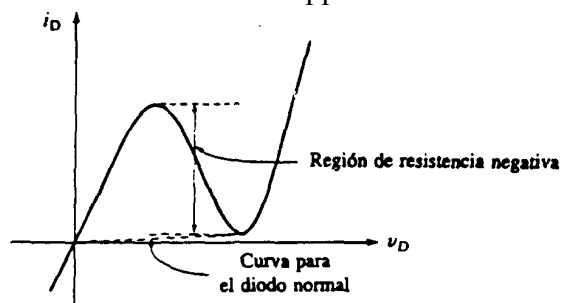


Figura 3.21 Características del diodo túnel.

Diodos Varactor ó 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.

El hecho de que la capacidad de transición de una unión o de una barrera Schottky sea función de la tensión aplicada (fig.2.6), puede ser utilizado en ciertos circuitos. Concretamente, al realizar un circuito resonante paralelo LC, el colocar en paralelo un diodo polarizado inversamente permitirá variar la frecuencia de sintonía electrónicamente, al cambiar la tensión V_R aplicada. Las uniones fabricadas para hacer uso de sus propiedades como capacidad variable se denominan varactores, y se utilizan en amplificadores paramétricos, filtros activos controlados por tensión, generadores de armónicos, etc.

Un uso común de este diodo es en el *oscilador controlado por tensión* (VCO, *voltage controlled oscillator*). El VCO es un generador senoidal cuya frecuencia de salida depende de la tensión de entrada.

Diodos Emisores de Luz y Fotodiodos

Ciertos tipos de diodos son capaces de cambiar la fuente de energía eléctrica en fuente de energía lumínica. El *diodo emisor de luz* (LED, *light emitting diode*) transforma la corriente eléctrica en luz. Es útil para diversas formas de despliegues, y a veces se puede utilizar como fuente de luz para aplicaciones de comunicaciones por fibra óptica.

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. Sin embargo, en un cristal de arseniuro de galio, el electrón produce un fotón 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. El diodo de arseniuro de galio emite ondas de luz en una longitud de onda cercana a la banda infrarroja. Para producir luz en el intervalo visible, se debe mezclar fosforo de galio con el arseniuro de galio.

Resumimos en la Introducción que los excesos de huecos y electrones se pueden recombinar bien a través de niveles de recombinación en la banda prohibida (mecanismo dominante en general), ó bien directamente por transición desde la BC a la BV. Normalmente, en el primer caso, la energía liberada en el salto se entrega al cristal

como calor. Sin embargo, en el segundo caso, eligiendo adecuadamente el material, se puede emitir 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, y conseguir que al recombinarse los excesos de minoritarios inyectados se pueda emitir luz. Tenemos así un diodo emisor de radiación, ó de luz en un sentido amplio, LED (light emitting diode). La clave está en la elección del material adecuado donde la recombinación radiante (que siempre estará en competencia y coexistencia con la no-radiante) sea apreciable. Ge y Si no son aptos, y son ciertos semiconductores compuestos por un elemento del grupo III y otro del V de la tabla periódica los que reúnen las condiciones adecuadas (AsGa, PGa, AsPGa). La energía o longitud de onda de la radiación emitida depende del ancho de la banda prohibida E_g . Las uniones p-n de AsGa emiten el IR infrarrojo ($\lambda=0,9 \mu\text{m}$), AsPGa y AsGa, lo pueden hacer desde el IR cercano al rojo, y el PGa puede emitir en el rojo, amarillo y verde, como expresa la fig. 3.22. Según la composición exacta e impurezas introducidas.

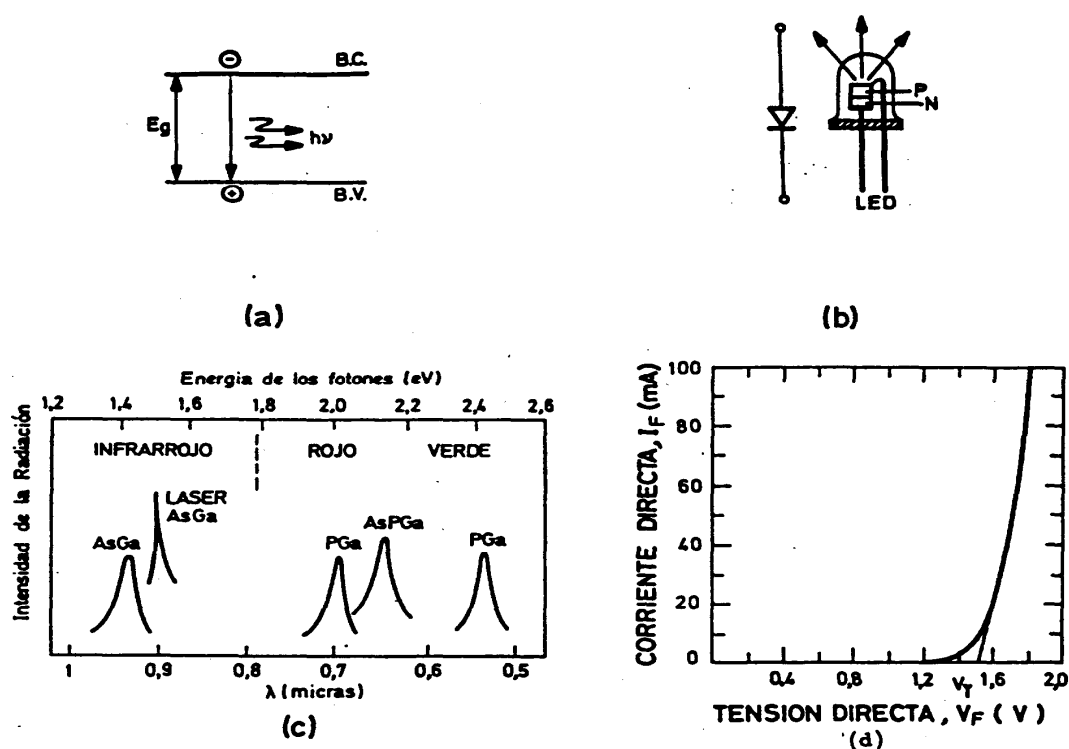


Fig. 3.22.- (a) La recombinación radiante por transición banda a banda puede utilizarse para construir diodos electroluminiscentes, como el indicado en (b). (c) la longitud de onda emitida se indica para ciertos ejemplos de LEDs. (d) Característica I_F - V_F para un LED rojo de AsPGa.

Unas características típicas I_F - V_F aparecen en la figura 3.22d. Notemos como la tensión V_γ , en que comienza marcadamente la conducción, se encuentra en el rango de 1,2-1,4 V. En efecto, aunque la ecuación del diodo (3.3) sigue siendo válida, la corriente de saturación I_s es inversamente proporcional al valor de E_g del material constituyente. El AsGa, AsPGa y PGa tienen valores del salto de energía prohibida de 1,43 eV, 2 y 2,24 eV respectivamente. Las corrientes de saturación de sus uniones p-n son, por tanto, cada vez menores y sus tensiones de arranque V_γ serán crecientes en ese mismo orden.

Señalemos, por último, que bajo ciertas condiciones y materiales la unión p-n emisora de luz puede llegar a convertirse en un láser (emisión monocromática y coherente), siendo el AsGa el material más adecuado para estos láseres de inyección.

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. Éste se comporta como generador de corriente constante mientras la tensión no exceda la tensión de avalancha. Los tiempos de respuesta son inferiores a 1 μ s. La sensibilidad del diodo se puede aumentar si el área de la unión se hace mayor, ya que se pueden coleccionar más fotones, pero esto también aumenta el tiempo de respuesta pues la capacitancia de unión se vuelve mayor.

En la figura 2.23 se muestra un fotodiodo. La corriente inversa, $-I_p$, aumenta conforme lo hace la intensidad de la luz, H . Se puede utilizar la ecuación (1.18) para estimar la corriente del fotodiodo, I_p :

$$I_p = \eta q H \quad (3.29)$$

donde:

- η = eficiencia cuántica
- q = carga del electrón: $1,6 \times 10^{-19}$ C
- H = $\phi \times A$ = intensidad de luz en fotones/s
- ϕ = densidad de flujo de fotones en fotones/s-cm²
- A = área de la unión en cm²

Muchos detectores de luz de silicio consisten en un fotodiodo de unión y un amplificador, casi siempre en un circuito integrado.

Figura 1.42
El fotodiodo.

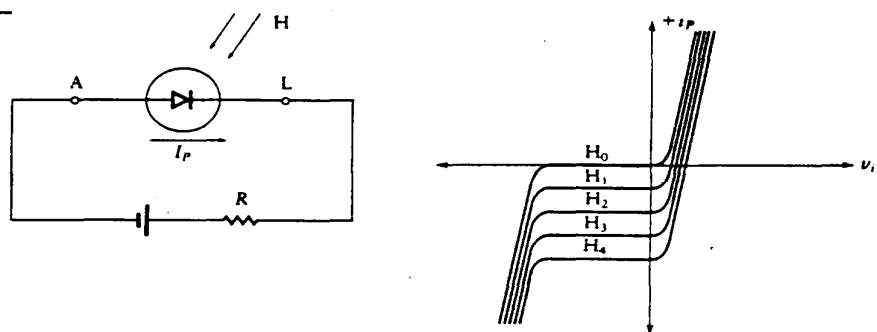


Figura 3.23 El fotodiodo.

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, por tanto,

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. La estimación máxima de tensión del diodo se determina por la intensidad del campo crítico para la avalancha y el espesor de la región i .

Los diodos PIN se utilizan en conmutadores de radiofrecuencia, alternadores y desplazadores de fase en radiofrecuencia. Con una corriente de control variable, los diodos PIN se utilizan en modulación de amplitud.

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. Esta característica se muestra en la figura 1.41. La región de pendiente negativa de la característica se puede modelar como resistencia negativa en serie con una fuente de cd. El diodo túnel es útil debido a esta región de resistencia negativa. Como ejemplo, se puede utilizar en conjunción con un circuito sintonizado para producir un oscilador de alta frecuencia y alta Q .

La región de resistencia negativa de un diodo túnel se desarrolla de manera característica en el intervalo de 50 mV a 250 mV. Esta tensión relativamente baja limita sus aplicaciones.

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 cual 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.

Su símbolo es:



y su curva característica es:

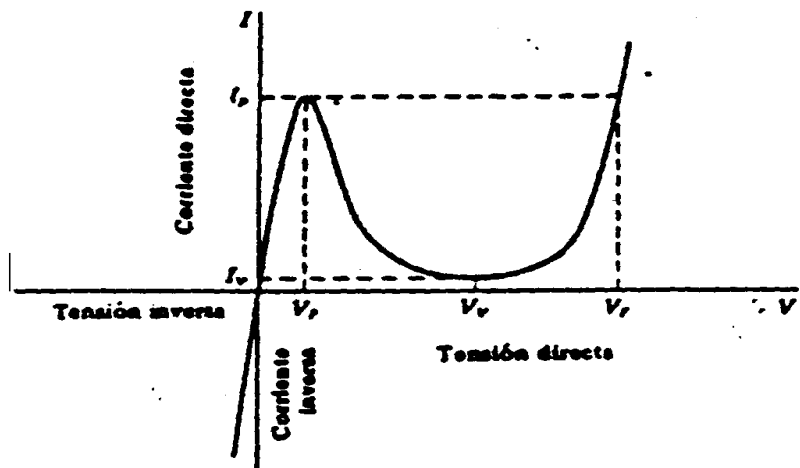


Figura 3.24

Donde I_v y V_v son la corriente y la tensión de valle, respectivamente; I_p y V_p son la corriente y tensión negativa de pico, respectivamente; y V_F es la tensión de pico negativa. La corriente de pico es al menos diez veces mayor que la de valle.

Como se refleja en la gráfica, al aumentar la tensión entre V_p y V_v existe una región de resistencia negativa, donde disminuye la corriente. A partir de que la tensión aumenta a un valor superior a V_v la corriente aumenta progresivamente.

Este dispositivo se utiliza normalmente como elemento de disparo.

FOTODIODOS Y CÉLULAS SOLARES

Iluminando una unión p-n o una barrera Schottky con luz, cuyos fotones tengan una energía igual o superior a la magnitud E_g del semiconductor, se crean pares electrón-hueco. Este exceso de portadores puede producir efectos fotovoltaicos (sin tensión externa aplicada se ha generado una f.e.m. en bornas de la unión) o efectos fotoconductores (estando polarizada la unión en inversa la corriente que circula aumenta considerablemente). Tenemos, pues, dispositivos sensibles a la luz incidente, verdaderos transductores óptico-electrónicos. 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, obteniendo de ellas unos 0,6 V (caso del silicio) al ser iluminadas y una potencia aproximada de unos 14 mW por cm^2 iluminado.

Bajo el punto de vista de los materiales, los fotodiodos y células solares de Si son los más desarrollados. Si se quiere detectar una cierta radiación (λ) la condición básica es utilizar una unión p-n o barrera Schottky con un material en que $E_g \text{ (eV)} < 1,24 / \lambda \text{ (}\mu\text{m)}$.

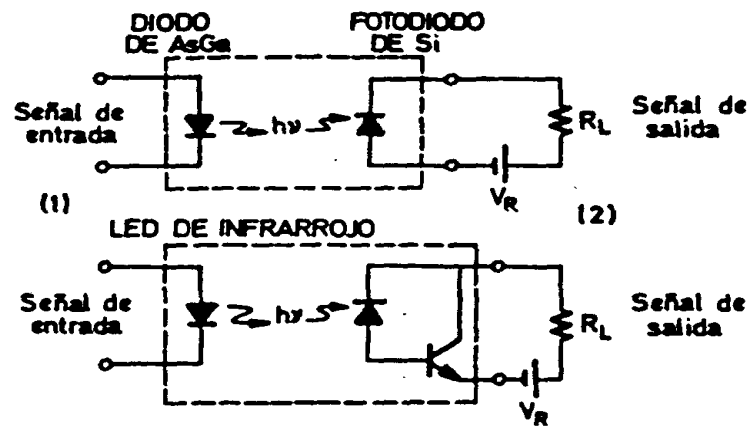


Fig.3.25.- Ejemplos de circuitos aisladores por acoplamiento electro-óptico.

La construcción de un módulo que contiene un diodo LED de AsGa acoplado ópticamente a un fotodiodo de Si, constituye un acoplador optoelectrónico y a la vez un aislador eléctrico, pues permite separar eléctricamente el circuito conectado a la puerta 1 del conectado a la puerta 2 (fig 3.25).

PROBLEMAS RESUELTOS

1.- Dado un diodo p-n de Germanio de unión abrupta con $N_D = 10^3 N_A$ y N_A igual a un átomo por cada 10^8 átomos de Germanio, a) Calcular la altura de la barrera de potencial V_0 a temperatura ambiente. b) Repetir para un diodo de Silicio. Datos: Ge $4,41 \cdot 10^{22}$ át/cm³ y $n_i = 2,5 \cdot 10^{13}$ cm⁻³. Si $5 \cdot 10^{22}$ át/cm³ y $n_i = 1,5 \cdot 10^{10}$ cm⁻³.

Establecemos la proporción:

$$\frac{1 \text{ át } N_A}{N_A} \text{ es a } \frac{10^8 \text{ át de Ge}}{4,41 \cdot 10^{22} \text{ át de Ge}} \text{ como } y \text{ obtenemos } N_A = 4,41 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

Con N_A obtenemos $N_D = 10^3 N_A = 4,41 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

$$V_0 = V_T \cdot \ln \frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2} \quad V_0 = 0,020 \cdot \ln \frac{4,41 \cdot 10^{14} \cdot 4,41 \cdot 10^{17}}{(2,5 \cdot 10^{13})^2}$$

Obtenemos por ello para el Germanio $V_0 = 0,33$ V. Para el Silicio el planteamiento es idéntico, cambiando el valor de n_i y los át/cm³. Repitiendo esto obtendremos $V_0 = 0,72$ V.

2.- Las resistividades de los dos lados de un diodo de Ge de unión abrupta son 2 Ωcm (P) y 1 Ωcm (N). Calcular la altura de la barrera de potencia. b) Repetir con Si. Datos: los n_i del problema 1 y $\mu_p = 1800$ cm²/Vseg $\mu_n = 3800$ cm²/Vseg para el Ge, y $\mu_p = 1300$ cm²/Vseg $\mu_n = 500$ cm²/Vseg para el Si.

La resistividad es la inversa de la conductividad. Esta es:

$$\sigma = q(\mu_n n + \mu_p p) \quad \begin{array}{l} \text{En el lado P, } p \gg n, \mu_p p \gg \mu_n n, \sigma = \mu_p p \\ \text{En el lado N, } n \gg p, \mu_n n \gg \mu_p p, \sigma = \mu_n n \end{array}$$

$$N_A = N_A \quad N_D = N_D^+ \quad N_A + n = N_D^+ + p$$

$$\text{En el lado P, } p \gg n \quad N_A^- \cong p$$

$$\text{En el lado N, } n \gg p \quad N_D^+ \cong n$$

$$\ell_p = \frac{1}{\sigma_p} = \frac{1}{q \mu_p N_A} \quad N_A = 1,74 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

$$\ell_n = \frac{1}{\sigma_n} = \frac{1}{q \mu_n N_D} \quad N_D = 1,65 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

$$V_0 = V_T \cdot \ln \frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2} \quad V_0 = 0,22 \text{ V (Ge)}$$

b) Igual pero cambiando n_i , μ_p , μ_n con lo que queda $V_0 = 0,667$ V (Si)

3.- ¿Para qué tensión de corriente inversa en un diodo de Ge valdrá el 90% de su valor de saturación a la temperatura ambiente? b) ¿Cuál es la relación de corriente para una polarización directa de 0,05 V y una polarización inversa de la misma magnitud? c) Si la corriente inversa de saturación es de 10 μ A calcular las corrientes directas para 0,1 V 0,2 V y 0,3 V.

$$I = I_0 \left(e^{\frac{V}{\eta V_T}} - 1 \right) \quad \eta=1 \text{ en el Ge y } V_T = 0,026.$$

Como la corriente es el 90% de la de saturación, $I=0,9 \cdot I_0$ y sustituyendo en la fórmula todos los datos, despejando V que es la única incógnita (tomando \ln) nos queda $V=0,026 \cdot \ln 0,1 = -0,06 \text{ V}$

b) Tomaremos I_1 como directa e I_2 como inversa:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{I_0 \left(e^{\frac{0,05}{0,026}} - 1 \right)}{I_0 \left(e^{\frac{-0,05}{0,026}} - 1 \right)} = -6,83$$

$$\text{c) } V = 0,1 \Rightarrow I = I_0 \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) = 0,455 \text{ mA}$$

De manera idéntica se van sustituyendo los diversos valores de V para obtener la I correspondiente.

4.- Se polariza directamente un diodo de silicio con una tensión de 0,4V. Calcular el factor por el que se multiplica la corriente cuando la temperatura cambia de 25°C a 150°C.

A la hora de calcular I mediante $I = I_0 \left(e^{\frac{V}{\eta V_T}} - 1 \right)$ lo que varía con la temperatura es V_T que viene dada por $V_T = \frac{\text{Temp}^\circ \text{K}}{11600}$. A 25°C obtenemos 0,026. A 150°C serán 0,0364.

Sustituyendo esos valores de V_T en la fórmula obtenemos:

$$I_{25^\circ\text{C}} = 2396 \cdot I_0$$

$$I_{150^\circ\text{C}} = 242 \cdot I_0$$

También tenemos que aplicar a I_{150} el ajuste de temperatura:

$$I' = I \cdot 1,07^{(150-25)} = 4709 I_0$$

Y la relación entre una y otra será:

$$\frac{I'}{I} = \frac{242 \cdot 4709 \cdot I_0}{2396 \cdot I_0} = 476 \quad \text{ya que } I_0 \text{ se simplifica.}$$

5.- Dos diodos de Si se conectan en oposición y este conjunto en serie se alimenta con una batería de 5V. Hállese la tensión a través de cada diodo a la temperatura ambiente.

Aunque D_1 permita pasar directamente un valor cualquiera de corriente, D_2 al estar en oposición no dejará pasar más de I_0 así que la corriente del circuito es I_0 .

A temperatura ambiente V_T vale 0,026. Los diodos de silicio tienen $\eta=2$. Por ello podemos despejar V teniendo en cuenta todo lo dicho anteriormente, de la ecuación:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{V}{\eta V_T}} - 1 \right) \quad e^{\frac{V}{2 \cdot 0,026}} = 2 \quad V = 0,036V$$