

A.1. El diodo

A.1.1. Introducción

El diodo es la pieza básica en electrónica de estado sólido y está basado en una sola unión p-n. A partir de combinaciones de más capas p o n podremos obtener los demás componentes electrónicos conocidos, como son los transistores, tiristores, etc. Debido a su composición a partir de material semiconductor su comportamiento es no lineal y por tanto su utilización es más compleja que la de los componentes lineales más habituales (resistencias, condensadores e inductores). Recordemos asimismo que su característica esencial es la de ser un rectificador como veremos más adelante.

A.1.2. Caracterización del diodo

El diodo como acabamos de decir es la unión de dos materiales semiconductores dopados de tipo n y de tipo p, formando una unión p-n. Antes de la unión, y considerando cada uno de los materiales semiconductores por separado, el semiconductor de tipo p tiene una concentración de huecos mucho mayor que la de electrones y el de tipo n tiene una concentración de electrones mucho mayor que la de huecos. Además, cada uno de estos materiales permanece eléctricamente neutro. El hecho de unir ambos tipos de material provoca un elevado gradiente de concentración de portadores en las proximidades de la unión observándose por un lado, una corriente de difusión de huecos de la región p a la n y, por otro, una corriente de difusión de electrones de la región n a la p. Pero además, la marcha o difusión de estos portadores de su región inicial deja al descubierto algunos iones fijos en la red cristalina, dando lugar a una región que contiene átomos ionizados positivamente a un lado y átomos ionizados negativamente al otro lado llamada zona de agotamiento o región espacial de carga. Dicha zona de agotamiento es eléctricamente neutra de manera que, si una de las dos partes (positiva o negativa) tiene una concentración de iones mayor, ésta es más corta. La presencia de estas cargas fijas da lugar a la aparición de un fuerte campo eléctrico dirigido desde la zona n hacia la zona p, es decir, desde la zona de carga positiva a la zona de carga negativa. En ausencia de polarización, la presencia de este campo eléctrico provoca unas corrientes de arrastre (de electrones de la zona p a la n y de huecos de la n a la p que atraviesan la zona de agotamiento "arrastrados" por dicho intenso campo eléctrico) que se oponen a las de difusión siendo nulas las corrientes netas de electrones y de huecos y, por tanto, no circula corriente a través del dispositivo. La presencia del campo eléctrico provoca una diferencia de potencial o barrera de potencial cuyo valor es del orden de 0,3 V en compuestos de Ge, 0,7 V en compuestos de Si y de 1,2 V a 1,8 V en compuestos de Ga.

En polarización directa, la parte p se somete a un potencial positivo respecto de la n reduciéndose la barrera de potencial en dicha cantidad. Se reduce además la anchura de la zona de agotamiento, la cual depende de la diferencia de potencial a la que está sometida la

unión. La reducción de la barrera de potencial (y por tanto del campo eléctrico en la unión) permite que los portadores mayoritarios atraviesen la unión facilitando el proceso de difusión y dando lugar a una corriente mensurable. Se tiene, por tanto, una inyección de portadores minoritarios, es decir, de electrones en la zona p y de huecos en la n. Para, en condiciones de polarización directa, obtener una corriente significativa es necesaria una tensión mínima del orden de dicha barrera de potencial.

En polarización inversa la parte n tiene una tensión positiva aplicada con respecto de la p. La barrera de potencial se ve aumentada en dicha cantidad viéndose, por tanto, muy reducidas las corrientes de difusión. Por otra parte, la anchura de la zona de agotamiento aumenta. El resultado es que únicamente una pequeña corriente inversa o de pérdidas atraviesa el dispositivo. Se dice que el diodo está cortado.

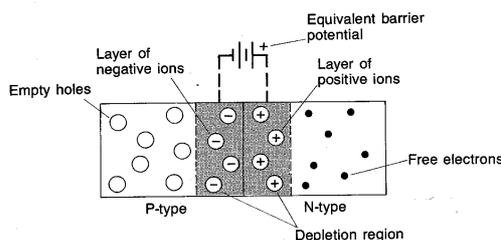


Fig. A.1.1: Unión p-n (diodo) con zona de agotamiento (para simplificar sólo se representan los portadores mayoritarios).

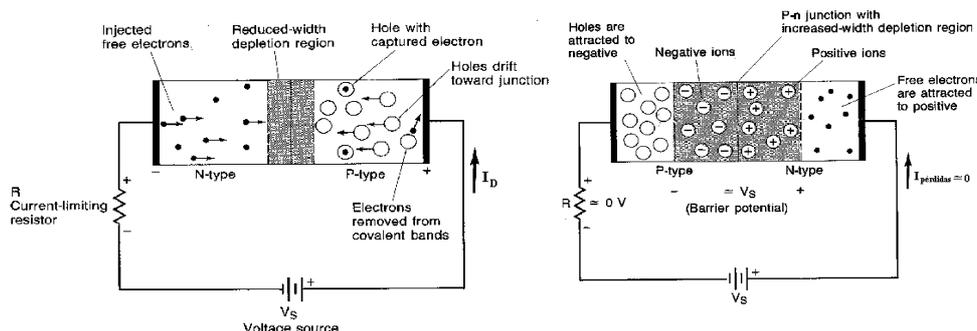


Fig. A.1.2: Diodo polarizado directa e inversamente (para simplificar sólo se representan los portadores mayoritarios).

Esta corriente inversa es despreciable en la mayoría de las ocasiones pero hay que conocerla para prevenir funcionamientos no deseados, por ejemplo en aplicaciones de precisión. La componen dos términos: la corriente inversa debido a portadores minoritarios y la corriente de pérdidas sobre la superficie del cristal. La corriente inversa debido a portadores minoritarios la producen los portadores minoritarios que son "arrastrados" por el fuerte campo eléctrico existente atravesando la zona de agotamiento. Esta corriente tiene una fuerte dependencia con la temperatura y se llama también corriente de saturación inversa. Por otro lado la corriente de pérdidas es debida a las imperfecciones de la estructura cristalina sobre la superficie del cristal. Dichas imperfecciones aparecen debido a la discontinuidad que supone el hecho de que al "otro lado" no haya cristal. Si, por ejemplo, estas imperfecciones provocan la aparición de huecos, se podrá desplazar por ellas un electrón dando lugar a una corriente. Esta corriente no depende de la temperatura.

Por último introducir el esquema eléctrico del diodo de unión, que se muestra en la siguiente figura.

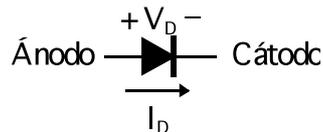


Fig. A.1.3: Esquema eléctrico del diodo.

A.1.2.1. Efectos de la temperatura en el diodo

Ya hemos visto que la corriente de saturación depende de la temperatura y también de los niveles de dopado y del área de la unión. La dependencia con la temperatura es el efecto que más nos interesa al variar normalmente la temperatura en nuestro entorno. Se puede demostrar que la corriente de saturación inversa se duplica cada incremento de 10°C y que aproximadamente sigue la siguiente expresión:

$$I_s(T) = I_s(25^\circ C) 2^{\frac{T-25}{10}} \quad (\text{A.1.1})$$

La característica directa del diodo también se ve afectada por la temperatura, siendo el efecto más importante la influencia sobre la barrera de potencial. Conforme aumenta la temperatura, la tensión directa necesaria para polarizar el diodo disminuye y por tanto decimos que tiene un coeficiente de temperatura negativo (en inglés "tempco" negativo). El valor de esta variación en diodos de señal tanto de silicio como de germanio es de 2mV por grado centígrado. Matemáticamente podemos decir:

$$\frac{\Delta V_D}{\Delta T} \approx -2 \frac{mV}{^\circ C} \quad (\text{A.1.2})$$

A.1.2.2. Capacidades parásitas del diodo

La zona de agotamiento del diodo también afecta a su comportamiento de forma capacitiva. Cuando el diodo está polarizado directamente, conduce por difusión y existe una concentración de portadores minoritarios en las zonas neutras próximas a la zona de agotamiento. Cuando se corta el diodo, aplicándole una tensión inversa, se deben extraer estas cargas de la zona de agotamiento para que el diodo bloquee la tensión inversa. La presencia de estas cargas almacenadas equivale a un comportamiento capacitivo y se llama en el diodo, capacidad de difusión. Esta capacidad depende de la corriente directa que está circulando por él y de la vida media de los portadores minoritarios inyectados y, por tanto, del tipo de dopado. Su expresión es:

$$C_D = \frac{q}{kT} \tau I_D \quad (\text{A.1.3})$$

donde τ : tiempo de vida media de los portadores minoritarios inyectados.

Por otra parte, cuando le aplicamos una tensión inversa al diodo la zona de agotamiento ajusta su anchura a esta tensión. En este caso la zona de agotamiento hace de dieléctrico que bloquea la tensión inversa. Tendremos un comportamiento capacitivo que se denomina capacidad de unión del diodo, asociado a la carga almacenada en la zona de agotamiento. Esta capacidad de unión dependerá de la tensión inversa aplicada pues al variar ésta, varía la anchura de la zona de agotamiento. Este es el principio de funcionamiento del diodo varactor. La capacidad de unión viene dada por la siguiente expresión:

$$C_j = \frac{C_{j0}}{\left(1 + \frac{V_R}{V_K}\right)^m} \quad (\text{A.1.4})$$

donde C_{j0} : capacidad de unión con $V_R=0$; V_R : tensión inversa aplicada; V_K : barrera de potencial de la unión del diodo; m : coeficiente de gradación del dopado.

La capacidad de difusión aparece únicamente en el caso de polarización directa y la de unión en polarización inversa y polarizaciones directas inferiores a V_K (pero, en este último caso, es mucho menor que la capacidad de difusión).

A.1.3. Curvas características

Habiendo visto de forma cualitativa el funcionamiento del diodo nos queda por conocer sus curvas características. Las curvas características representan la relación entre la tensión y la corriente del diodo durante su funcionamiento. De ellas se puede determinar fácilmente la no-linealidad del diodo y de hecho su comportamiento se describe matemáticamente por la ecuación de Shockley:

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right) \quad (\text{A.1.5})$$

con

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (\text{A.1.6})$$

donde I_D : corriente por el diodo, I_S : corriente de saturación inversa, V_D : tensión aplicada al diodo, V_T : tensión de temperatura, k : cte. de Boltzmann, q : carga elemental del electrón, T : temperatura en Kelvin, n : cte. de difusión ($Ge = 1$, $Si = 2$)

Esta expresión no tiene en cuenta todos los fenómenos adicionales como son la ruptura y la resistencia serie propia del diodo, entre otros. Si obtenemos prácticamente la curva v-i del diodo midiendo la corriente que circula por él para diferentes tensiones aplicadas en sus bornes podemos observar que la ecuación de Shockley no coincide con la curva real del diodo. Esto se aprecia en la figura A.1.4 de la característica v-i del diodo de silicio 1N914B comparada con la ecuación de Shockley.

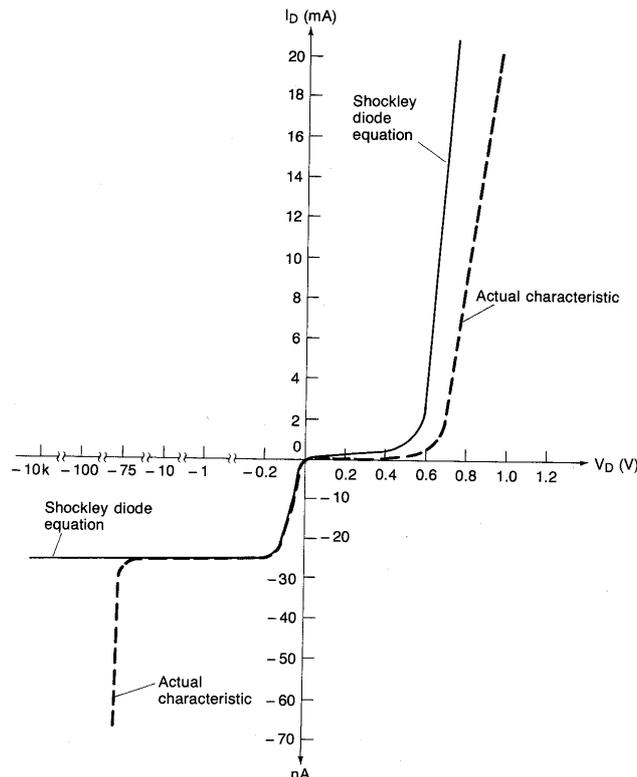


Fig. A.1.4: Curva v - i del diodo 1N914B y comparación con la ecuación de Shockley.

No se ha de olvidar añadir una resistencia en serie con el diodo en la práctica al realizar estas medidas para limitar la corriente, si no tenemos una fuente de alimentación de precisión, ya que la corriente crece de forma exponencial con la tensión y por tanto tomará rápidamente valores que destruirán el diodo.

A.1.4. Tipos de diodos

Una vez introducido el diodo de unión p-n vamos a describir otros tipos de diodos que también están basados en principio en una unión p-n aunque en algunos casos su comportamiento o su composición no se parece mucho a la del diodo original. El más conocido y utilizado de todos ellos es el diodo zener que vamos a explicar a continuación.

A.1.4.1. El diodo zener

El diodo zener es un diodo basado también en una única unión p-n, pero sus niveles de dopado son completamente diferentes de los normalmente encontrados en un diodo normal. Su comportamiento es igual que el del diodo de señal descrito hasta ahora pero generalmente se le hace funcionar en lo que se denomina zona de ruptura (tercer cuadrante de la curva característica), es decir, aplicándole una tensión inversa superior a la tensión de ruptura. Si nos fijamos en la figura A.1.4 observamos que el diodo tiene un codo muy abrupto cuando se le aplica una tensión inversa por encima de un cierto valor llamado tensión de ruptura o

tensión de zener. Es en esta región donde se utiliza el diodo zener y básicamente se hace como tensión de referencia. Su símbolo electrónico es diferente del diodo normal.

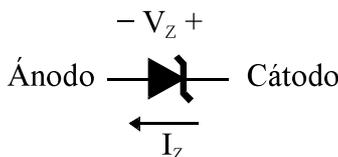


Fig. A.1.5: Símbolo electrónico del diodo zener.

Hay dos efectos que producen la ruptura de un diodo de unión p-n: el efecto túnel o zener y la ruptura por efecto avalancha. Cuando la ruptura se produce en uniones con tensiones por encima de los 8 V están causadas por el efecto avalancha, mientras que para tensiones de ruptura por debajo de los 5 V la ruptura se produce por efecto zener. Para tensiones de ruptura entre 5 V y 8 V ambos mecanismos operan al mismo tiempo.

La ruptura zener se produce cuando se tiene un dopado moderado de la zona p y fuerte en el de tipo n. En ese caso, la zona de agotamiento se extiende fundamentalmente en la zona p. La ruptura zener sobreviene cuando se aplica una tensión inversa al diodo suficientemente alta como para que el campo eléctrico resultante rompa los enlaces covalentes de los átomos de la zona de agotamiento. Entonces se liberan electrones que pasan de la banda de valencia a la de conducción (efecto túnel) y que convierten la zona de agotamiento de aislante en conductora. La intensidad de campo eléctrico requerida para que tenga lugar el efecto zener es de aproximadamente 3×10^7 V/cm. Dado que tanto la anchura de la zona de agotamiento como el campo eléctrico en la unión vienen fijados por el dopado de la zona p, ajustando dicho dopado es posible crear campos eléctricos suficientemente grandes como para que se produzca el efecto zener.

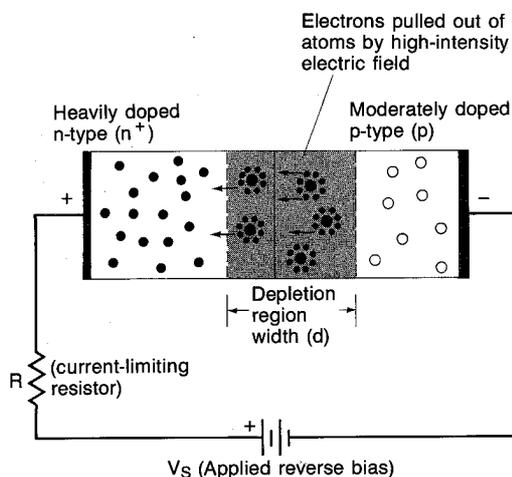


Fig. A.1.6: Efecto zener producido durante la polarización inversa de un diodo.

Por el contrario si la zona p no está suficientemente dopada, entonces el campo eléctrico no es lo suficientemente intenso como para romper los enlaces covalentes. Pero los portadores minoritarios que constituyen la corriente de saturación inversa sí que sentirán el campo eléctrico y se acelerarán. Si recorren una distancia suficiente, adquirirán la energía cinética necesaria como para romper un enlace covalente si chocan con un átomo. Este fenómeno se denomina "ionización por impacto". De nuevo el resultado es que si aparecen suficientes electrones "suelos" la zona de agotamiento pasa a ser conductora. Este efecto se produce con tensiones de ruptura a partir de los 5 V.

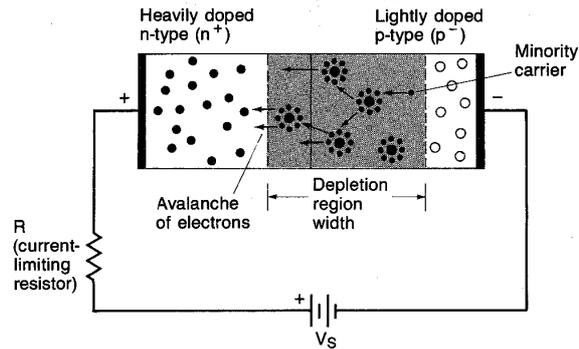


Fig. A.1.7: Efecto avalancha producido durante la polarización inversa de un diodo.

Los diodos zener son diodos realizados especialmente para operar en la zona de ruptura, como referencia de tensión. Históricamente se han venido a llamar diodos zener, aunque en muchos casos es el mecanismo de ruptura por avalancha el que predomina (tensiones de ruptura superiores a 8 V).

A.1.4.1.1. Efectos de la temperatura en los diodos zener

En el efecto túnel o zener se liberan electrones por la intensidad del campo eléctrico que deben pues saltar de la banda de valencia a la banda de conducción. Si aumenta la temperatura entonces la distancia entre la banda de valencia y la banda de conducción se reduce ya que los electrones de la banda de valencia tienen más energía térmica. El resultado es que hace falta un campo eléctrico menor para que salten de una banda a otra y por tanto menos tensión. Por tanto la tensión de zener disminuye con la temperatura y tiene un coeficiente de temperatura negativo.

En el efecto avalancha por el contrario la ionización se produce por choques de los portadores minoritarios con los átomos. Al subir la temperatura los átomos adquieren también más energía térmica y por tanto vibran más lo que da como resultado más colisiones. Pero como los electrones chocan con el átomo antes de haber recorrido la suficiente distancia y tener por tanto la suficiente energía cinética, no desprenden ningún electrón adicional y se ionizan menos átomos. Por tanto necesitamos más campo eléctrico (más tensión inversa) para ionizar la unión y la tensión de ruptura por efecto avalancha aumenta con la temperatura. El coeficiente de temperatura del efecto avalancha es positivo. Para tensiones de ruptura entre 5 V y 8 V, ambos mecanismos (ruptura por avalancha y zener) operan conjuntamente, dando lugar a un coeficiente de temperatura que es aproximadamente cero.

La característica de ruptura del diodo zener basado en el efecto túnel o zener es más gradual siendo la tensión más estable ante una variación en la temperatura que en el caso de ruptura por avalancha.

Una solución empleada para compensar el coeficiente de temperatura positivo en el caso de ruptura por avalancha es colocar dicho diodo zener en serie con un diodo directamente polarizado cuyo coeficiente de temperatura es negativo.

A.1.4.2. El diodo Schottky

El diodo Schottky se caracteriza por una unión metal semiconductor ligeramente dopado y como su nombre indica también produce un efecto rectificador (si el dopado es muy fuerte la unión es de tipo óhmica y la corriente circula en ambos sentidos). Al igual que en el diodo de unión se forma una zona de agotamiento en la que los electrones de la zona n buscan niveles de energía menores y, por tanto, pasan al metal. Cuando se forma la zona de agotamiento hay un paso de electrones del metal al semiconductor, forzado por el campo eléctrico presente, que iguala al anterior y, por tanto, no circula corriente a través del dispositivo. En el diodo Schottky la barrera de potencial es menor que en un diodo de unión y vale sólo 0,2 V.

Cuando un diodo de unión se polariza directamente, se inyectan huecos procedentes del semiconductor de tipo p en el semiconductor de tipo n y electrones desde el semiconductor de tipo n en el de tipo p. Estas cargas son momentáneamente almacenadas en las zonas neutras próximas a la unión hasta que se recombinan con las cargas opuestas.

Sin embargo, cuando se polariza directamente el diodo Schottky la altura de la barrera para los electrones del semiconductor disminuye y los electrones de la zona n pasan al metal. El resultado es que en el diodo Schottky la conducción la protagonizan sólo los electrones y por ello se dice también que es un dispositivo unipolar, que conduce por portadores mayoritarios. Esto también se traduce en un tiempo de recuperación inversa (se explicará más adelante) muy pequeño al no haber cargas almacenadas cuando se corta el diodo.

Con polarización inversa aumenta la altura de la barrera para los electrones del semiconductor por lo que disminuye el flujo de electrones del semiconductor al metal mientras el flujo de electrones del metal al semiconductor permanece inalterado en un valor muy pequeño, dando como resultado una pequeña corriente de pérdidas.

El diodo Schottky presenta por tanto una caída de tensión directa en conducción mucho menor que un diodo de unión p-n (sólo 0,2 V frente a los 0,7 V del diodo de Si) y además tiene un tiempo de recuperación inversa mucho menor. Sus desventajas por otra parte son una menor tensión de ruptura y corrientes de pérdidas mayores que un diodo de unión.

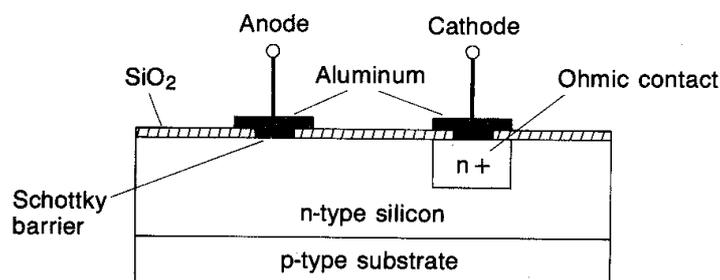


Fig. A.1.8: Diodo Schottky de estructura planar.

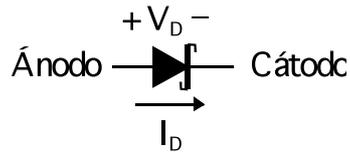


Fig. A.1.9: Símbolo electrónico del diodo Schottky.

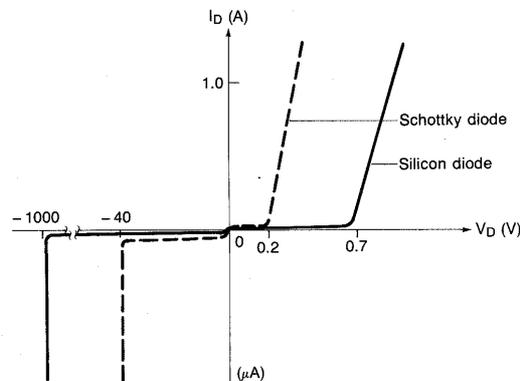


Fig. A.1.10: Curva característica de un diodo Schottky comparada con un diodo de unión p-n de Si.

A.1.4.3. El diodo túnel (diodo Esaki)

Como se ha comentado anteriormente, en un diodo de unión p-n con fuerte dopado puede producirse el efecto túnel o zener en condiciones de polarización inversa. En el caso que ambas regiones semiconductoras estén muy fuertemente dopadas (del orden de 1000 veces más que en un diodo zener), la zona de agotamiento es muy estrecha y el campo eléctrico en la zona de agotamiento es tan grande que el efecto túnel o zener deviene también importante para el caso de polarización directa. En estas condiciones, la característica corriente-tensión del diodo cambia drásticamente observándose una región en que la corriente disminuye cuando aumenta la tensión de polarización directa (zona de resistencia negativa, con $dV/dI < 0$). Un diodo operando de esta manera es llamado diodo túnel o también diodo degenerado. Generalmente se suele fabricar de AsGa en vez de Si o Ge.

Conforme aumenta la polarización directa, la corriente aumenta con mucha rapidez desde cero hasta el valor de pico de i_D (I_p) en que se produce la ruptura. Entonces la corriente cae hasta I_v (corriente de valle), dando lugar a la región de resistencia negativa. Dicha región se desarrolla de manera característica en el intervalo de 50 mV a 250 mV. A partir de la tensión de valle V_v , el diodo túnel se comporta prácticamente como un diodo normal. La tensión de ruptura inversa no existe y, por tanto, el diodo túnel no es capaz de bloquear tensiones inversas como otros diodos. Como, debido a su funcionamiento, no hay procesos de almacenamiento de portadores minoritarios, el diodo túnel es útil en aplicaciones de alta velocidad.

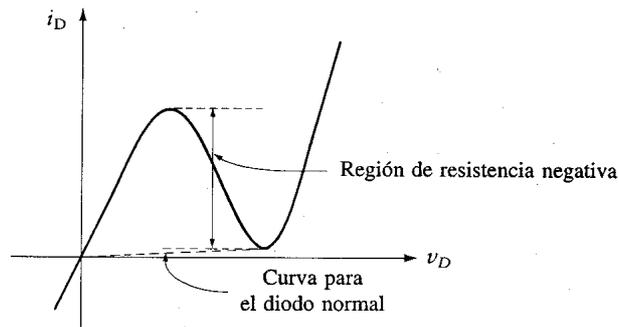


Fig. A.1.11: Curva característica de un diodo túnel en comparación con la de un diodo normal.

La principal utilidad del diodo túnel está en la zona de resistencia negativa. Esta se puede utilizar en conjunción con un circuito sintonizado para producir un oscilador de alta frecuencia y alta Q.

Modificando adecuadamente el dopado del diodo túnel es posible hacer que en condiciones de polarización directa el efecto túnel casi no se produzca haciendo desaparecer la zona de resistencia negativa. Si nos limitamos a bajos valores de la tensión de polarización (inferiores a 0,7 V) se tiene que, en ese caso, la corriente inversa sería mayor que la directa, de ahí que el dispositivo resultante reciba el nombre de **diodo unitúnel** o **diodo "backward"**. Empleando este diodo en el sentido inverso y para bajos niveles de la tensión de polarización, la caída de tensión en dicho diodo es muy pequeña. Es por ello que dicho diodo suele utilizarse para la detección de señales muy débiles. Otra aplicación es la rectificación de señales pequeñas. Como no hay almacenamiento de portadores minoritarios tiene una buena respuesta en frecuencia.

A.1.4.4. El diodo Gunn

El diodo Gunn es un diodo túnel muy especializado para su utilización en osciladores de alta frecuencia, en particular en el rango de las microondas. Su tramo de resistencia negativa se utiliza en osciladores pudiéndose alcanzar frecuencias de hasta 14 GHz.

A.1.4.5. El diodo PIN

El diodo PIN es un diodo de unión p-n al que se le ha insertado una tercera zona semiconductor sin dopado (intrínseca) entre la zona p y la zona n. Es pues un diodo p-i-n y de ahí su nombre. Gracias a esa zona i, este diodo tiene una baja capacidad por lo que se aplica en altas frecuencias. Cuando se polariza directamente la inyección de portadores minoritarios aumenta la conductividad de la zona intrínseca y cuando se le aplica tensión inversa la zona intrínseca se vacía totalmente de portadores y el campo eléctrico a través de dicha región permanece constante. Esto permite que el diodo PIN soporte altas tensiones inversas. Sus aplicaciones son en potencia y alta tensión y también en radiofrecuencia como modulador o conmutador.

El valor máximo de la tensión que es capaz de bloquear el diodo PIN se determina en función del valor del campo eléctrico crítico a partir del cual se produce el efecto avalancha y del espesor de la región intrínseca.

A.1.4.6. El diodo varactor (varicap)

En este diodo se ha modificado el perfil y el nivel de dopado de forma que se ha aumentado mucho su capacidad de unión. Además esta capacidad de unión se podrá modificar según la tensión aplicada inversamente al diodo. Así si aumentamos la tensión inversa aplicada:

1. La zona de agotamiento aumenta, lo que aumenta la distancia neta entre cargas.
2. Se producen más iones positivos y negativos (generamos más carga).

La capacidad de unión variará por tanto con la tensión inversa aplicada y cuanto más tensión se aplique menor capacidad tendremos. La expresión matemática ya se vio en el punto referente a las capacidades parásitas.

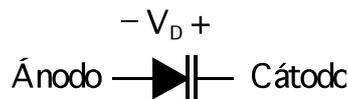


Fig. A.1.12: Símbolo electrónico del diodo varactor.

Su utilización es básicamente como elemento de sintonía en receptores de FM o televisión como parte del tanque resonante LC.

A.1.5. Análisis del funcionamiento en régimen estático

Como con cualquier otro componente no lineal el diseño de circuitos con el diodo se podrá hacer de forma gráfica. La utilización de la ecuación de Shockley se hace bastante difícil en un sistema de ecuaciones al ser una ecuación no lineal además de ser sólo aproximada.

Recordemos como aplicar el método gráfico para resolver un circuito. Debemos conocer la curva de funcionamiento del diodo y sobre ella dibujaremos la recta de carga. Para dibujarla sustituiremos primero el diodo por un cortocircuito y mediremos la corriente que pasa por él, y segundo sustituiremos el diodo por un circuito abierto y mediremos la tensión en sus bornes. Estos dos puntos definen la recta de carga que dibujaremos sobre la curva característica del diodo. El corte de ambas curvas es el punto Q de operación. Lo mismo se puede repetir si superponemos a la señal de continua una señal de alterna aplicando el teorema de superposición. Tendremos la recta de carga de continua y la de alterna.

En la figura se representa un circuito con un diodo, una capacidad, una fuente de alimentación y dos resistencias. Tomando como incógnitas a resolver la corriente y la tensión del diodo, se necesitan dos ecuaciones independientes que incluyan estas dos incógnitas para encontrar una solución única para el punto de operación. Una de las ecuaciones es la restricción proporcionada por los elementos conectados al diodo. La segunda es la relación real entre corriente y tensión para el diodo. Estas dos ecuaciones se deben resolver simultáneamente para determinar la tensión y la corriente en el diodo. Vamos a obtener esa solución simultánea de forma gráfica.

En primer lugar vamos a tomar la condición de continua, la fuente de tensión es simplemente V_S , y la capacidad es un circuito abierto (es decir, la impedancia de la capacidad se puede suponer infinita a frecuencia cero). Por tanto, podemos escribir que:

$$V_S = V_D + V_{R_1} = V_D + I_D \cdot R_1$$

$$\text{O bien: } V_D = V_S - I_D \cdot R_1$$

Esta es la primera de las ecuaciones que incluyen la corriente y la tensión del diodo. Es necesario combinarla con la característica del diodo y resolver para el punto de operación. La gráfica de esta ecuación se muestra en la figura etiquetada como "línea de carga en cd". La gráfica de la característica del diodo también se muestra representada conjuntamente con la anterior. La intersección de las dos gráficas da la solución simultánea de ambas ecuaciones y se etiqueta como "punto Q" en la figura. La Q (quiescente) denota condición de reposo.

Si ahora se aplica una señal variable en el tiempo además de la entrada de continua, cambia una de las dos ecuaciones simultáneas. Si se supone que la entrada variable es de una frecuencia suficientemente alta como para permitir la aproximación de la capacidad como un cortocircuito, la nueva ecuación vendrá dada por:

$$v_S = v_d + i_d \cdot (R_1 // R_L)$$

$$\text{O bien: } v_d = v_S - i_d \cdot (R_1 // R_L)$$

Solamente se han considerado las componentes variables en el tiempo (de ahí la utilización de letras minúsculas para las variables). El valor total de los parámetros viene dado por:

$$v_D = V_{DQ} + v_d$$

$$i_D = I_{DQ} + i_d$$

y, por tanto:

$$v_D - V_{DQ} = v_S - (R_1 // R_L) \cdot (i_D - I_{DQ})$$

Esta última ecuación se etiqueta como "línea de carga en ca" en la figura. La línea de carga en ca debe pasar a través del punto Q, ya que en los momentos en que la parte variable se hace cero, las dos condiciones de operación (cd y ca) deben coincidir. Por tanto, la línea de carga en ca se determina de manera única. La línea de carga en ca permite deducir cual es la máxima amplitud aplicable sin recortar. Los límites vienen fijados por el corte de esta recta de

carga con el eje de abscisas y ordenadas. En la figura se aprecia claramente que estos puntos son diferentes de los puntos donde la línea de carga en cd corta los ejes.

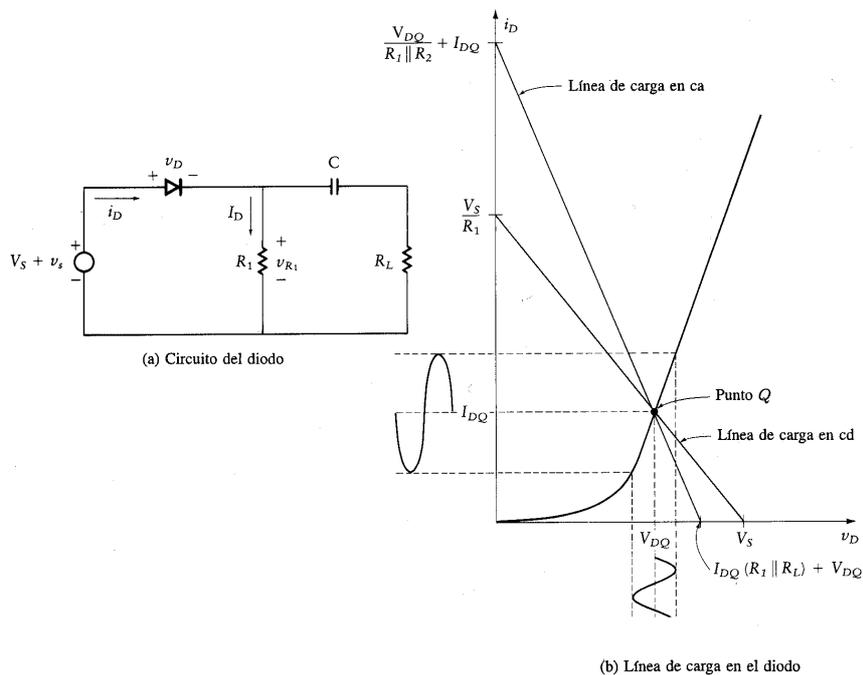


Fig. A.1.13: Circuito y recta de carga del diodo en continua y alterna.

Para el caso del diodo zener se repetirá el mismo proceso pero dibujando la recta de carga en el tercer cuadrante ya que le aplicamos tensión inversa al diodo.

No olvidemos que el diodo además tiene como característica principal que es rectificador, es decir, que sólo conduce en un sentido.

A.1.5.1. Modelo estático del diodo

A partir del comportamiento estático podemos establecer un modelo de funcionamiento para el diodo en régimen estático. Dicho modelo será una linealización del componente no lineal. El modelo más sencillo es el modelo de tensión de codo que desprecia la caída de tensión directa del diodo en conducción y tampoco tiene en cuenta la tensión de ruptura inversa. El diodo se sustituirá por un cortocircuito en caso de estar polarizado directamente y por un circuito abierto si está cortado.

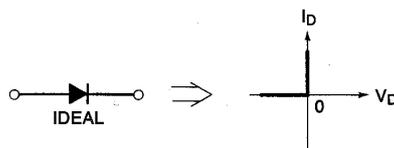


Fig. A.1.14: Modelo estático de tensión de codo del diodo.

Este modelo se puede mejorar sustituyendo el diodo por un modelo que incluya la caída de tensión directa (0,7 V para Si) o incluso y dependiendo de la precisión darle una pendiente que reproduzca la resistencia dinámica del diodo. Dicha resistencia dinámica representa la variación que experimenta la tensión en el diodo ante un cambio en la corriente

que lo atraviesa y está relacionada por tanto con la pendiente de la curva de funcionamiento directo. Esta resistencia sería una constante si la curva real en funcionamiento directo fuese una recta, sin embargo al tratarse de una exponencial varía en función de i_D , aunque se puede suponer fija en un intervalo de operación específico. También se puede definir una resistencia estática que será igual a la tensión del punto Q dividida por la corriente del punto Q y que, por tanto, también dependería del punto de operación Q.

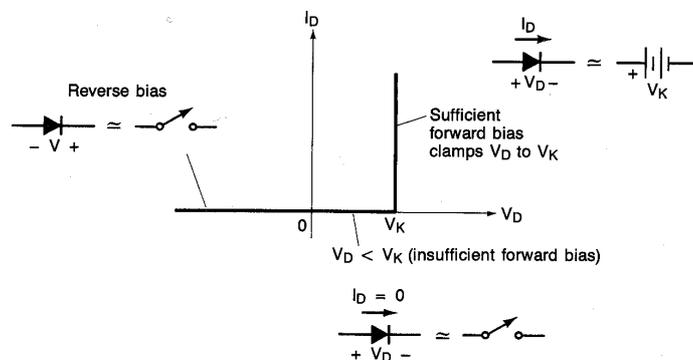


Fig. A.1.15: Modelo estático de tensión de codo del diodo teniendo en cuenta la caída de tensión directa.

Para el diodo zener el modelo es el mismo salvo que la tensión de codo equivaldrá a la tensión de zener del diodo siempre teniendo en cuenta que se le aplica una tensión inversa para su correcta polarización.

Si el diodo es polarizado inversamente por debajo de su tensión de ruptura hemos visto que su comportamiento se asemeja a una fuente de corriente ya que por él circula una corriente de muy baja intensidad pero que no depende de la tensión inversa aplicada (sólo de la temperatura). En ese caso podremos modelizar el diodo como una fuente de corriente constante y de valor igual a la corriente de saturación del diodo.

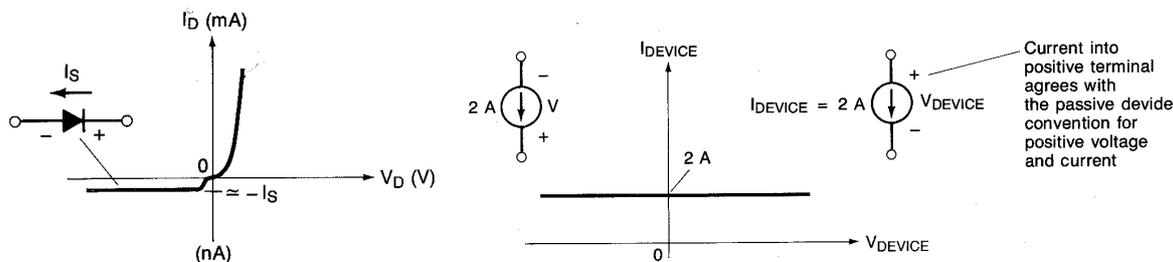


Fig. A.1.16: Modelo estático de fuente de corriente constante para la polarización inversa del diodo.

Un posible circuito equivalente que tiene en cuenta la resistencia de los contactos, la caída directa del diodo y la corriente inversa de pérdidas se muestra en la siguiente figura.

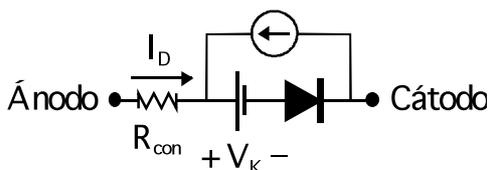


Fig. A.1.17: Modelo estático completo del diodo.

A.1.6. Análisis del funcionamiento en régimen dinámico

Para conocer el funcionamiento en régimen dinámico del diodo distinguiremos entre pequeña señal y gran señal. La señal se podrá interpretar como pequeña señal siempre que la amplitud de salida no esté distorsionada o dicho de otra forma que la amplitud sea lo suficientemente pequeña como para que la curva del diodo sea lineal en ese tramo. Siempre que el circuito sea lineal podremos aplicar el teorema de superposición.

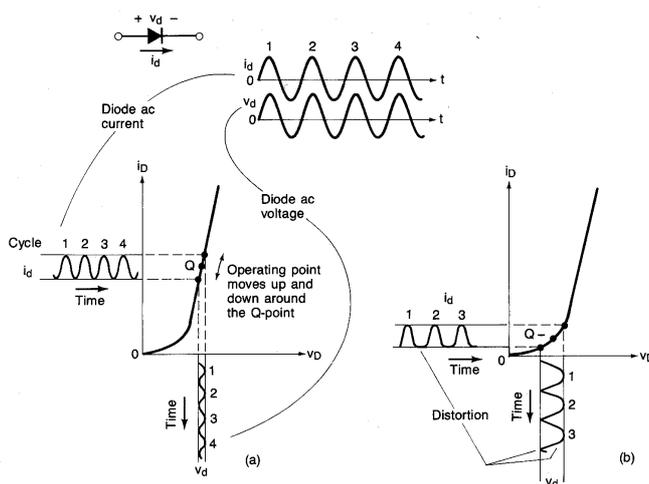


Fig. A.1.18: Aplicación de una señal (a) que no distorsiona (pequeña señal) y (b) que sí distorsiona la salida (gran señal).

A.1.6.1. El diodo en régimen de pequeña señal

Si aplicamos por tanto una pequeña señal al diodo debemos conocer no sólo el punto Q de polarización estático alrededor del cual se va a mover el punto Q dinámico, si no que además es conveniente saber la resistencia dinámica en esa región de funcionamiento. La resistencia dinámica es la resistencia que indica la pendiente del tramo lineal sobre el que se mueve el punto Q. La ecuación de Shockley nos permite calcularla:

$$r_d = \frac{\Delta v_D}{\Delta i_D} \tag{A.1.7}$$

de la ecuación de Shockley tenemos

$$\frac{di_D}{dv_D} = I_S \frac{e^{\frac{v_D}{nV_T}}}{nV_T} \tag{A.1.8}$$

como
$$e^{\frac{v_D}{nV_T}} = \frac{i_D}{I_S} + 1 \quad (\text{A.1.9})$$

entonces
$$\frac{di_D}{dv_D} = \frac{i_D + I_S}{nV_T} \equiv \frac{1}{r_d} \quad (\text{A.1.10})$$

por tanto
$$r_d = \frac{nV_T}{i_D + I_S} \approx \frac{nV_T}{i_D} = \frac{nkT}{i_D q} \quad (\text{A.1.11})$$

se observa claramente que la resistencia depende del punto de operación (i_D).

A esta resistencia dinámica se le suma la resistencia propia del diodo o del material que incluye la resistencia de la conexión metal-semiconductor. Su valor es de aproximadamente 1Ω para diodos de potencia y 10Ω para diodos de señal. Estos valores pueden ser o no ser importantes dependiendo del punto de operación del diodo ya que éste determina su resistencia dinámica.

A.1.6.2. El diodo en régimen de gran señal

En régimen de gran señal el error producido por la linealización de un tramo de la característica de un componente de característica no lineal es inaceptable y de ahí que pasemos a llamarlo gran señal. La forma más sencilla de estudiar un circuito con diodos en régimen de gran señal es con el modelo estático de tensión codo. Con este modelo podremos estudiar aproximadamente amplificadores, rectificadores y circuitos de potencia en general aunque despreciaremos efectos de segundo orden que se producen en la realidad. El efecto más acusado que se produce cuando estamos en régimen de gran señal es la recuperación inversa que se debe a la capacidad de difusión del diodo. Durante la recuperación inversa, el diodo, que estamos intentando cortar, conduce corriente inversa debido a la concentración de cargas almacenadas en lo que en su circuito equivalente sería su capacidad de difusión. En régimen de conmutación lo veremos con más detalle.

A.1.6.2.1. El diodo en régimen de conmutación

El régimen de conmutación es un caso particular del régimen de gran señal. El diodo es uno de los elementos más utilizados también en electrónica de potencia y su aplicación básica es como rectificador, tanto de ondas sinusoides como de ondas cuadradas. Su comportamiento en estas aplicaciones depende fuertemente de su estructura, que es de diodo PIN para poder bloquear altas tensiones inversas, y su comportamiento capacitivo. De hecho cuanto mayor es la anchura de la zona intrínseca i del diodo, mayor es la tensión que bloquea el diodo.

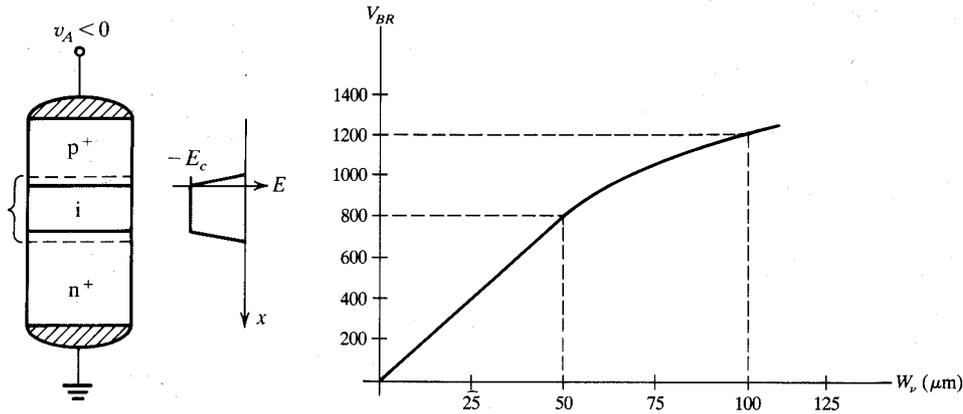


Fig. A.1.19: Esquema del diodo PIN de potencia y su curva de tensión de bloqueo (V_{BR}) en función de la anchura de la zona i (W_v).

Debido a su estructura se producen dos claros efectos durante la conmutación, tanto a ON como a OFF. Estos efectos se denominan recuperación directa e inversa.

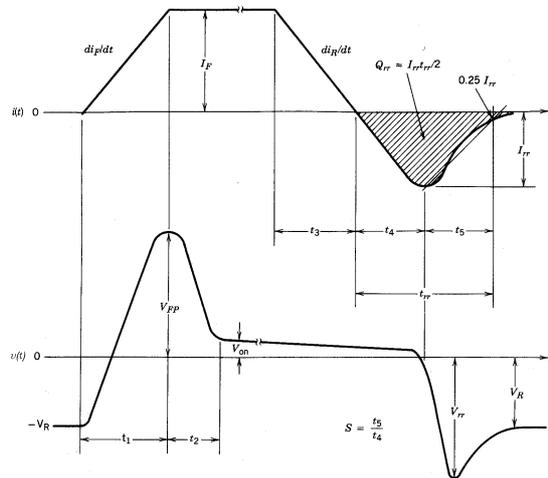


Fig. A.1.20: Curvas de tensión y corriente del diodo de potencia durante su conmutación a ON y a OFF.

Recuperación directa

Supongamos que el diodo está cortado y que pasa a ON. La corriente conmuta a su valor máximo con una cierta pendiente o di_F/dt y entonces se observa que la caída de tensión en bornes del diodo aumenta hasta alcanzar un valor máximo igual a V_{FP} . A partir de ese valor empieza a caer hasta alcanzar su valor estacionario. Este pico de tensión se llama de recuperación directa y es debido al tiempo que transcurre hasta que la zona intrínseca alcanza una conductividad alta. Inicialmente la zona intrínseca tiene una baja conductividad (alta resistencia) y conforme inyectamos portadores en ella se hace más conductora. Esta variación de conductividad o resistencia produce el pico de recuperación directa durante un tiempo de recuperación directa t_{fr} .

Recuperación inversa – tiempo de recuperación inversa, t_{rr}

Ahora queremos cortar el diodo que está conduciendo una gran cantidad de corriente. Para ello conmutamos la corriente para que caiga con una cierta pendiente o di_R/dt . Durante el proceso de caída de corriente vemos que el diodo sigue conduciendo, hasta que la corriente

alcanza un valor mínimo y por debajo de cero. Es a partir de ese instante que la tensión inversa empieza a aparecer en bornes del diodo. Dependiendo del tipo de carga, a continuación suele aparecer, conforme va volviendo la corriente de su valor mínimo hacia cero, un pico de tensión inversa de valor V_{tr} antes de que se alcance la tensión inversa estacionaria. La razón de este comportamiento es la capacidad parásita del diodo. Durante su conducción hay una gran concentración de cargas (capacidad de difusión) que hay que extraer cuando se quiere cortar el diodo. Mientras no se han extraído estas cargas el diodo sigue conduciendo primero directamente y luego inversamente. Además a continuación hay que seguir extrayendo cargas para ensanchar la zona de agotamiento para poder bloquear la tensión inversa aplicada (capacidad de unión). Durante este proceso ya empieza a bloquear tensión el diodo poco a poco hasta alcanzar su estado estacionario. El tiempo durante el cual la corriente es negativa, es decir el diodo conduce en sentido inverso, se llama el tiempo de recuperación inversa t_{tr} . El tiempo de recuperación inversa está directamente relacionado con la capacidad de difusión y es un dato que se da en todos los diodos y nos indica su velocidad de conmutación.

La carga Q_{tr} representa la porción de la carga total Q_F (carga almacenada en el diodo durante su conducción) que es extraída durante el paso a corte y no perdida en una recombinación interna. La mayor parte de Q_F corresponde a carga almacenada en la región intrínseca y viene dada por la expresión $Q_F = \tau \cdot I_F$. La diferencia entre Q_F y Q_{tr} es debida a los portadores minoritarios en exceso perdidos por recombinación interna en el diodo. Haciendo uso de la aproximación $Q_F = Q_{tr}$, la cual es válida para grandes valores de di_R/dt (pequeños valores de t_{tr}), podemos ver que cuanto menor es el tiempo de vida media de los portadores minoritarios (τ) menor es la carga almacenada en el diodo por lo que más rápido conmuta. Pero, sin embargo, cuanto menor es el tiempo de vida media de los portadores, τ , mayor es la caída directa del diodo:

$$v_D \cong V_j + \frac{W_V^2}{(\mu_n + \mu_p) \cdot \tau}, \text{ siendo } V_j \text{ la caída de tensión en la unión y } \mu_n \text{ y } \mu_p \text{ las}$$

movilidades del electrón y del hueco

Por eso los diodos rápidos tienen una mayor caída de tensión directa que los lentos.

A.1.6.3. Modelo dinámico del diodo

Conforme hemos descrito, el modelo más sencillo de aplicar en gran señal es el modelo estático de tensión de codo. Un circuito equivalente que distingue la polarización directa y la inversa se muestra a continuación.

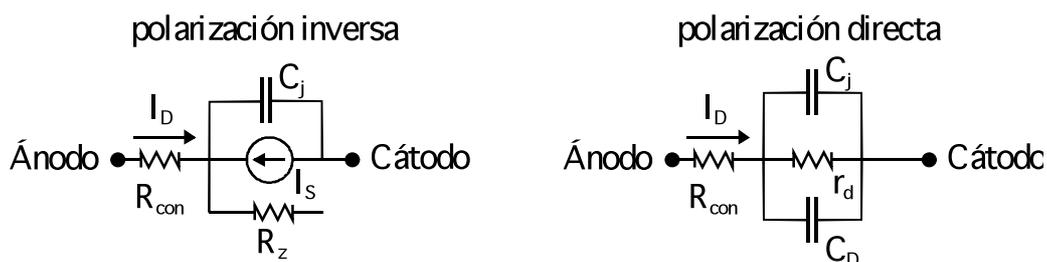


Fig. A.1.21: Modelos del diodo en polarización directa e inversa en régimen dinámico.

A.1.7. Circuitos no lineales

Vamos a describir unos circuitos prácticos con diodos en régimen de gran señal.

A.1.7.1. Circuitos recortadores (Clippers)

Los circuitos recortadores son circuitos en los que se utilizan los diodos para limitar y recortar señales entrantes al circuito a un nivel preestablecido. A continuación se muestra un ejemplo.

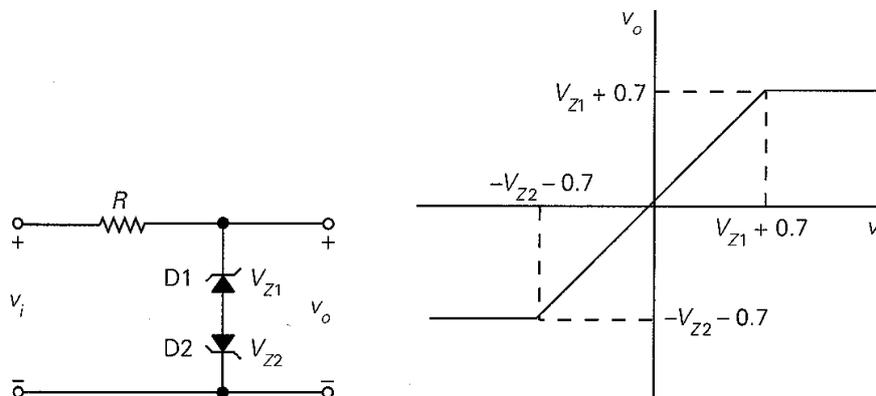


Fig. A.1.22: Recortador con dos diodos zener.

Los dos diodos zener están en serie y orientados en sentidos opuestos. Vamos a suponer que el diodo D1 tiene una tensión zener V_{Z1} y que el diodo D2 tiene una tensión zener V_{Z2} . Para señales simétricas, las dos tensiones zener son escogidas del mismo valor.

Un punto importante en el análisis del circuito es que cualquiera que sea la polaridad de la señal de entrada, uno de los diodos estará directamente polarizado y el otro inversamente polarizado. Por tanto, los valores críticos de transición serán $V_{Z1}+0,7$ V y $-(V_{Z2}+0,7)$ V).

Para $0 < v_i < V_{Z1}+0,7$, D1 está inversamente polarizado y actúa como un circuito abierto. De forma similar, para $-V_{Z2}-0,7 < v_i < 0$, D2 está inversamente polarizado. Para $v_i > V_{Z1}+0,7$, ocurre la ruptura inversa zener en D1, y la tensión de salida es la suma de V_{Z1} y la caída de tensión directa de D2 (es decir, $v_o = V_{Z1}+0,7$). De forma similar, para $v_i < -V_{Z2}-0,7$, ocurre la ruptura inversa zener de D2, y $v_o = -V_{Z2}-0,7$.

En consecuencia:

$$v_o = \begin{cases} -V_{Z2} - 0,7 & \text{para } v_i < -V_{Z2} - 0,7 \\ v_i & \text{para } V_{Z1} + 0,7 < v_i < -V_{Z2} - 0,7 \\ V_{Z1} + 0,7 & \text{para } v_i > V_{Z1} + 0,7 \end{cases}$$

A.1.7.2. Circuitos fijadores

Un circuito fijador fija la tensión en un punto determinado del circuito. También se llama desplazador de nivel ya que nos permite crear un nivel de tensión continua en un circuito de alterna.

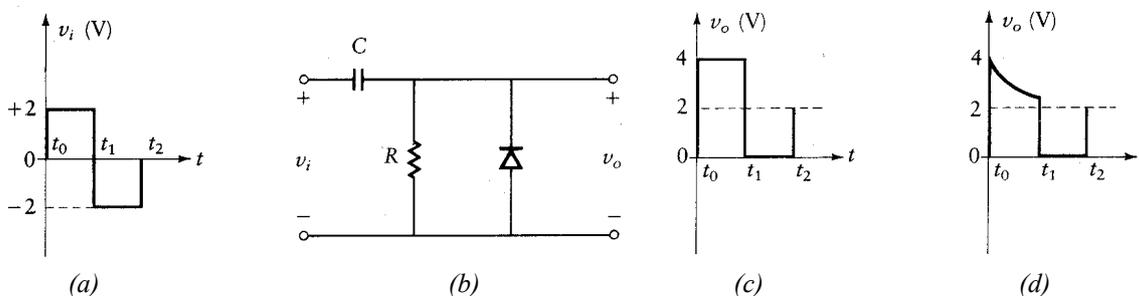


Fig. A.1.23: (a) Entrada. (b) Circuito fijador. (c) Salida con constante de tiempo grande. (d) Salida con constante de tiempo pequeña.

El funcionamiento es sencillo. Cuando la señal de entrada se hace negativa, el diodo se polariza directamente limitándose la salida a aproximadamente cero ($-v_D$). El condensador se carga a través del diodo a una tensión igual a la tensión mínima menos la caída de tensión del diodo. Por el contrario cuando la tensión es positiva el condensador se descarga a través de la resistencia en paralelo con el diodo o si no existe con la corriente inversa del diodo. Si se elige apropiadamente la constante de tiempo RC ($\tau = RC > 10 T$) el condensador apenas se descarga y por tanto el condensador permanecerá cargado y hará función de fuente de tensión en serie con la fuente de alterna que lo ha cargado.

A.1.7.3. Puertas lógicas

Se presentan a continuación dos circuitos muy útiles con diodos que representan una puerta lógica AND y una puerta lógica OR.

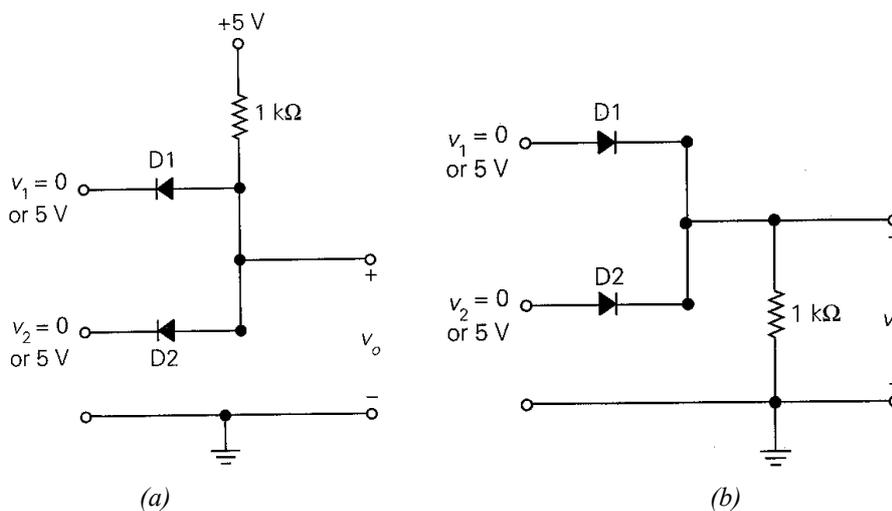


Fig. A.1.24: Puertas lógicas AND (a) y OR (b) con diodos.

En la puerta lógica OR, la salida v_o está a nivel alto si cualquiera de las entradas (v_1 o v_2) lo está, mientras que en la puerta AND la salida v_o está a nivel alto solamente si ambas entradas (v_1 o v_2) lo están.

v_2	v_1	v_o
Bajo	Bajo	Bajo
Bajo	Alto	Alto
Alto	Bajo	Alto
Alto	Alto	Alto

PUERTA OR

v_2	v_1	v_o
Bajo	Bajo	Bajo
Bajo	Alto	Bajo
Alto	Bajo	Bajo
Alto	Alto	Alto

PUERTA AND