

TEMA 5. Diodo de unión $p-n$.

Se le denomina diodo de unión $p-n$, al dispositivo constituido mediante una unión $p-n$ con dos terminales y cuyo objetivo en general, será conducir en un solo sentido.

5.1. Unión $p-n$ polarizada.

Se entiende como polarización de una unión $p-n$, la aplicación externa de una d.d.p. continua o con un determinado sentido a la unión.

5.1.1. Unión $p-n$, polarizada directamente.

La unión $p-n$ está polarizada directamente, cuando a la región p se le aplica un potencial superior al de la región n .

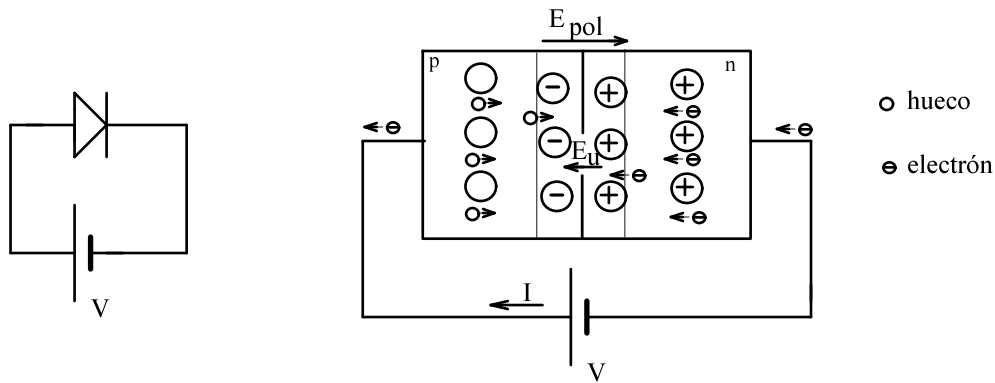


Fig. 5.1.

Los huecos de la región p y los electrones de la región n , son empujados hacia la unión, por el campo eléctrico a que da lugar la polarización, reduciendo la anchura de la zona de transición.

El campo eléctrico de la polarización se opone al de la unión reduciendo este, y también la barrera de potencial que sin polarización era V_0 y con polarización directa V_0-V .

La reducción del campo eléctrico de la unión reduce el efecto de arrastre.

Al ser la zona de transición mas estrecha, aumenta el gradiente de las concentraciones en ella y consecuentemente, aumenta el efecto de difusión.

No se alcanza el equilibrio, produciéndose una circulación neta de carga por el circuito, de forma que la corriente en la unión es por difusión y fuera de ella por arrastre.

5.1.2. La unión $p-n$, polarizada inversamente.

Una unión $p-n$ está polarizada inversamente, cuando a la región p se le aplica un potencial inferior al de la región n .

Los portadores mayoritarios (huecos de p y electrones de n) de ambas regiones tienden a separarse de la unión, empujados por el campo eléctrico a que da lugar la polarización, aumentando la anchura de la zona de transición.

El campo eléctrico en la unión aumenta reforzado por la el de la polarización del mismo sentido, y la barrera de potencial pasa a ser V_0+V .

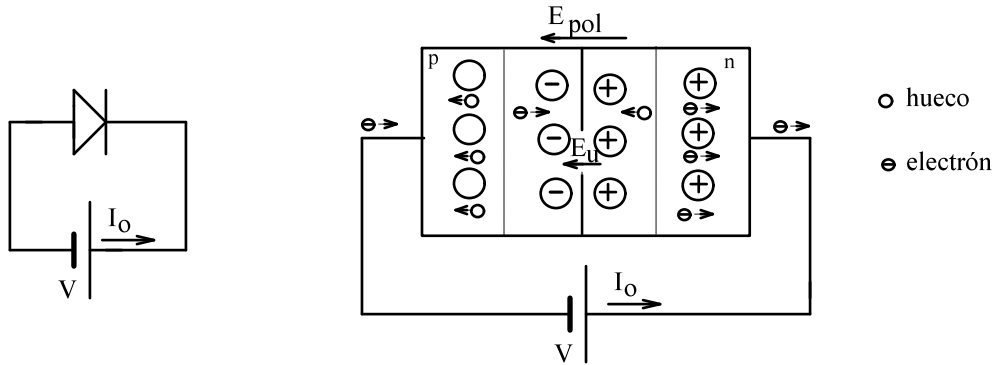


Fig. 5.2.

Solo los portadores minoritarios generados térmicamente en ambas regiones son empujados hacia la unión, así solo los pocos electrones de p , al pasar al lado n formarán con los mayoritarios de esta región una corriente de arrastre, y de similar manera los pocos huecos de n al pasar a p formarán otra débil corriente de arrastre que se sumará a la anterior. Esta pequeña corriente es la corriente inversa de saturación del diodo y su valor se distingue por I_0 , presentando una fuerte dependencia de la temperatura.

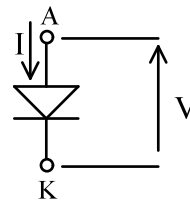
Tanto en el Silicio como en el Germanio se ha observado, que la corriente inversa de saturación crece aproximadamente un 7% por °C, con lo que podemos deducir, que la corriente inversa de saturación se duplica de forma aproximada cada 10 °C de aumento de temperatura. Si $I_0 = I_{01}$ para $T = T_1$, cuando la temperatura es T , I_0 viene dado por:

$$I_0(T) = I_{01} \times 2^{\frac{(T-T_1)}{10}}$$

5.2. Característica V-I del diodo.

Resulta de representar gráficamente la relación $I = f(V)$, teóricamente se aproxima por la ecuación de Shockley:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$



En donde:

I_0 = Corriente inversa de saturación.

$q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ culombios (carga del electrón).

T = Temperatura absoluta en °K.

k = Constante de Boltzman.

$\eta = 1$ para Ge y 2 para Si, en corrientes moderadas.

$V_T = KT/q = T/11.600$, para $T = 300 \text{ K} \Rightarrow V_T = 26 \text{ mV}$.

Para $V \gg V_T \Rightarrow I = I_o e^{\frac{V}{V_T}}$, I crece exponencialmente con V , y para $V \ll V_T \Rightarrow I \approx -I_o$.

Representada la ecuación $I = I_o \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right)$, aparecen algunas diferencias respecto a la práctica:

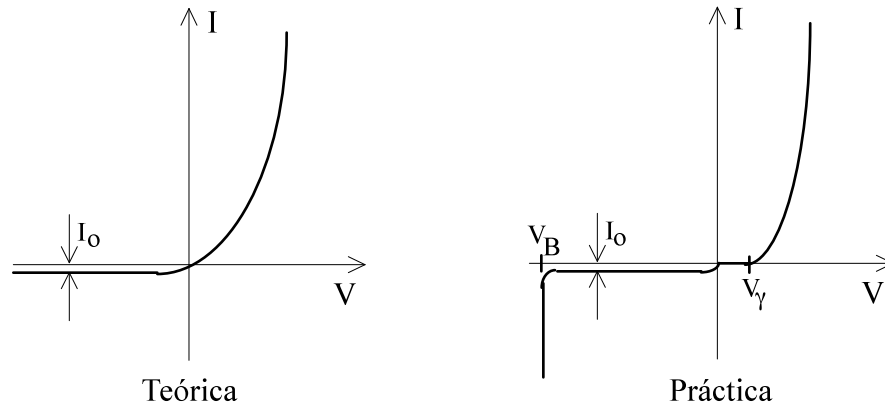


Fig. 5.3.

Se observa que en la práctica el diodo con polarización directa, no conduce a partir de $V = 0$ volt., sino que es necesario alcanzar el valor V_γ que se denomina **tensión umbral**.

Se define como V_γ , el potencial que hace conducir al diodo en directo al 1% de su corriente máxima, y es un dato del fabricante, aproximadamente:

$V_\gamma = 0,2$ volt. para el Ge.

$V_\gamma = 0,6$ volt. para el Si.

$V_\gamma = 0,3$ volt. para Schottky.

$V_\gamma = 1,2$ volt. para AsGa (LED).

Otra diferencia aparece cuando la V inversa aplicada aumenta fuertemente, hasta alcanzar la tensión de ruptura V_B , a partir de la cual la corriente aumenta bruscamente por causas que comentaremos más adelante.

Resistencia del diodo: Se consideran dos tipos de resistencia, la estática y la dinámica ambas dependen del punto de polarización, funcionamiento ó trabajo.

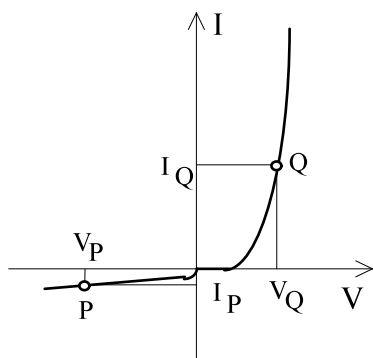


Fig. 5.4.

Resistencia estática: Depende de los valores de V e I , que determinan su punto de funcionamiento.

$$R_{EST} = \frac{V}{I}$$

En el punto Q, la polarización es directa y la **Resistencia estática directa**, es:

$$R_F = \frac{V_Q}{I_Q}$$

En el punto P, la polarización es inversa, y la *Resistencia estática inversa*, será:

$$R_R = \frac{V_P}{I_P}$$

Resistencia dinámica: Equivale a la inversa de la pendiente de la característica $I = f(V)$, en el punto de funcionamiento:

$$R_{diná.} = \left(\frac{\Delta V}{\Delta I} \right)_{\Delta I \rightarrow 0} = \frac{dV}{dI}$$

En el punto Q, con polarización directa:

$$R_f = \left(\frac{dV}{dI} \right)_{I=I_Q}$$

En el punto P, con polarización inversa:

$$R_r = \left(\frac{dV}{dI} \right)_{I=I_P}$$

Teóricamente, $I = I_o \left(e^{\frac{V}{\eta V_T}} - 1 \right)$:

$$\frac{dI}{dV} = \frac{I_o e^{\frac{V}{\eta V_T}}}{\eta V_T} = \frac{I + I_o}{\eta V_T}$$

de donde:

$$R_{diná.} = \frac{\eta V_T}{I + I_o}$$

Si en el punto Q, se cumple $I_Q \gg I_o$, resulta:

$$R_f = \frac{\eta V_T}{I_Q}$$

En el diodo se cumple, que la resistencia en directo es pequeña y en inverso grande.

5.3. Diodos zener.

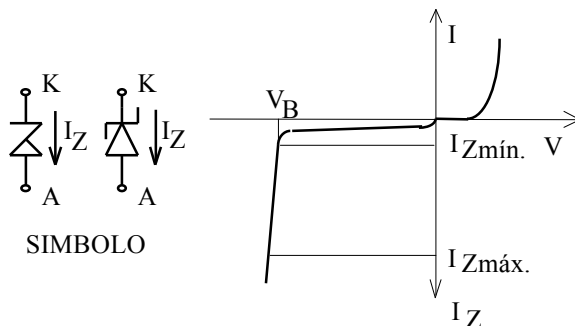


Fig.5.5

Son diodos diseñados para trabajar en la zona de ruptura, que se caracteriza porque la corriente puede variar ampliamente, permaneciendo la tensión constante. Para que esto suceda, es necesario que trabaje dentro del margen de corrientes:

$$I_{Zmín.} \leq I_Z \leq I_{Zmáx.}$$

Existen dos mecanismos para producir la ruptura de la unión del diodo:

Multiplicación por avalancha: Se produce por efecto de colisión, mediante electrones de elevada energía cinética en la banda de valencia, que arrancan por choque otros electrones de los enlaces de los átomos creando nuevos pares electrón-hueco, que a su vez pueden ionizar más átomos por choque en un proceso de colisión, ruptura y multiplicación.

Se favorece este efecto de avalancha, dopando más un lado de la unión que el otro, p^+ . En este caso la anchura de la zona de transición es grande, y un electrón tendrá mucho camino libre, para ser acelerado en dicha zona de transición y alcanzar energía suficiente.

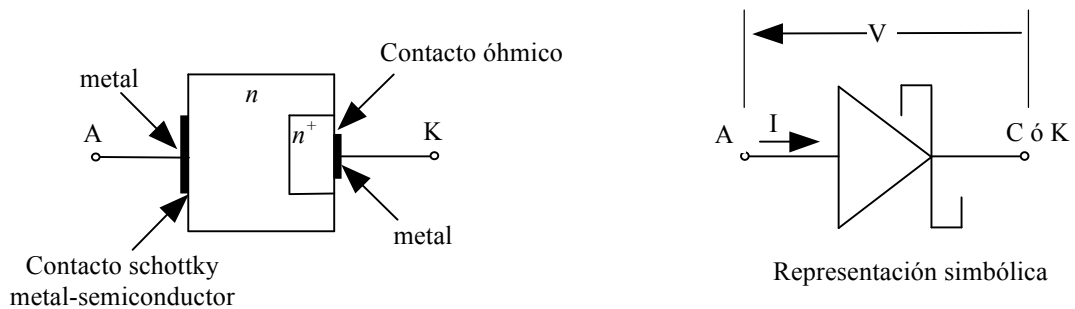
El efecto avalancha es mayoritario con polarización inversa por encima de seis voltios y presenta coeficiente de temperatura positivo.

Ruptura zener: Se produce por campo eléctrico muy intenso en la unión, que es capaz de originar suficiente fuerza sobre los electrones, como para que rompan directamente su enlace covalente, dando lugar a portadores de corriente.

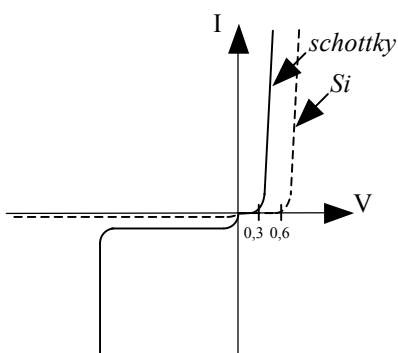
Este efecto se produce en diodos muy dopados, con polarización inversa, por debajo de seis voltios y presenta coeficiente de temperatura negativo.

5.4. Diodo SCHOTTKY (Diodo de Barrera Schottky SBD)

Un diodo **Schottky**, está formado por una unión metal-semiconductor. En donde el metal actúa como material aceptador ánodo del diodo (puede ser Al, Ag, Pt, Au ó Ti), y el semiconductor tipo n con dopaje medio/bajo ($N_D < 10^{17}$ át. Imp./cm³) puede ser Si ó GaAs.



La característica V-I de un diodo schottky es similar a la de un diodo de unión $p-n$ de silicio, con las diferencias a tener en cuenta de: Tensión umbral más baja 0,2-0,3V,



corriente inversa de saturación de la unión más alta a temperatura ambiente ($T=300^{\circ}\text{K}$) $I_{o(\text{schottky})} \approx 10^{-10} \text{A} \gg I_{o(\text{Si})} \approx 10^{-14} \text{A}$ y tensión de ruptura más baja.

El mecanismo físico que tiene lugar en una unión schottky es más complejo que en la unión $p-n$ semiconductor, está determinado por la interface metal-semiconductor en la que se produce una brusca discontinuidad de los estados permitidos de energía y

aparece una barrera de potencial por ionización de los átomos de impureza, que impide el paso de electrones del metal hacia el semiconductor, esta barrera de potencial se conoce como barrera schottky.

La corriente directa la constituyen los electrones que atraviesan la unión desde el silicio o arseniuro de galio tipo n hacia el metal, consecuentemente, está soportada por el mismo tipo de portadores mayoritarios a ambos lados de la unión.

En la comparativa de los diodos diodos schottky con los convencionales de silicio, podemos distinguir:

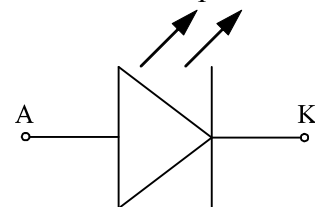
Ventajas: Tiempo de conmutación menor ($t_{schottky} \approx 1ps$, $t_{Si} \approx 1ns$) como consecuencia de carecer de capacidad de difusión en la unión causada por la recombinación electrón-hueco fundamentalmente con polarización directa en el diodo de unión $p-n$. Como el diodo schottky es un dispositivo con un único tipo de portadores mayoritarios, la recombinación es un efecto despreciable y la capacidad de difusión mínima, lo que hace que sus tiempos de retardo en conmutación sean menores y más rápida su respuesta. Especialmente útil en aplicaciones de conmutación de alta velocidad. Menor tensión umbral o de inicio de conducción con polarización directa (0,2V y 0,3V), apreciablemente menor que la del diodo de unión $p-n$ de silicio (0,6V – 0,7V).

Inconvenientes: Elevada corriente inversa de saturación $\approx 10^{-10}A$ y tensión de ruptura inversa baja $< 10V$ para diodos de pequeña señal, impiden que su uso se pueda generalizar.

Contacto óhmico: Contacto metal-semiconductor no rectificante, es una unión de baja resistencia que provee conducción en ambas direcciones con alta conductividad, esto se consigue aumentando el dopaje del semiconductor tipo n , con lo que se anula la barrera de potencial o se hace muy estrecha.

5.5. Diodo LED

Un diodo **LED**, acrónimo inglés de *Light Emitting Diode* (diodo emisor de luz), es un dispositivo semiconductor que emite luz monocromática cuando se polariza en directa y es atravesado por la corriente eléctrica. El color depende del material semiconductor empleado en la construcción del diodo pudiendo variar desde el ultravioleta, pasando por el espectro de luz visible, hasta el infrarrojo, recibiendo éstos últimos la denominación de **diodos IRED** (*Infra-Red Emitting Diode*).



Representación simbólica

En directa, todos los diodos emiten una cierta cantidad de radiación cuando los pares electrón-hueco se recombinan, es decir, cuando los electrones *caen* desde la banda de conducción (de mayor energía) a la banda de valencia (de menor energía). La frecuencia de la radiación emitida y como consecuencia su color, dependerá de la anchura/altura de la banda prohibida (diferencias de energía

entre las bandas de conducción y valencia), es decir, de los materiales empleados. Los diodos convencionales, de silicio o germanio, emiten radiación infrarroja muy alejada del espectro visible con bajo rendimiento, sin embargo con materiales especiales pueden conseguirse longitudes de onda visibles con rendimientos mejorados. Los diodos LED e IRED, además tienen geometrías especiales para evitar que la radiación emitida sea reabsorbida por el material circundante del propio diodo, lo que sucede en los convencionales.

Debe escogerse adecuadamente la corriente que atraviesa el LED para obtener una buena intensidad luminosa; el voltaje de operación va desde 1,5 a 2,2 voltios aproximadamente y la gama de intensidades que debe circular por él va de 10 a 20 mA en los diodos de color rojo y de 20 a 40 mA para los otros LEDs.

Los primeros diodos construidos fueron los diodos infrarrojos y de color rojo a mediados de los años 60, permitiendo el desarrollo tecnológico posterior la construcción de diodos para longitudes de onda cada vez menores. En particular, los diodos azules fueron desarrollados a finales de los 90, añadiéndose a los rojos y verdes desarrollados con anterioridad, lo que permitió, por combinación de los mismos, la obtención de luz blanca. La más reciente innovación en el ámbito de la tecnología LED son los diodos ultravioletas.

Compuestos empleados en la construcción de diodos LED	Color
Arseniuro de galio (GaAs)	Infrarrojo
Arseniuro de galio y aluminio (AlGaAs)	Rojo e infrarrojo
Arseniuro fosfuro de galio (GaAsP)	Rojo, naranja y amarillo
Nitruro de galio (GaN) y Fosfuro de galio (GaP)	Verde
Seleniuro de zinc (ZnSe), Nitruro de galio e indio (InGaN) y Carburo de silicio (SiC)	Azul
Diamante (C)	Ultravioleta

Los LED comerciales típicos están diseñados para potencias del orden de los 30 a 60 mW. En torno a 1999 se introdujeron en el mercado diodos capaces de trabajar con potencias de 1 W para uso continuo y en 2002 se comercializaron diodos para potencias de 5 W, con eficiencias en torno a 60 lm/W, es decir, el equivalente a una bombilla incandescente de 50 W. lo que está posibilitando el empleo de diodos LED en la iluminación.

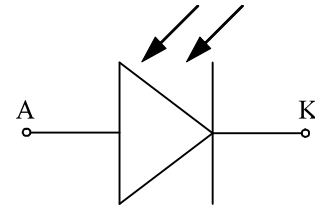
El comienzo del siglo XXI ha visto aparecer los diodos OLED (diodos LED orgánicos), fabricados con materiales polímeros orgánicos semiconductores. Aunque la eficiencia lograda con estos dispositivos está lejos de la de los diodos inorgánicos, su fabricación promete ser considerablemente más barata que la de aquellos, siendo además posible depositar gran cantidad de diodos sobre cualquier superficie empleando técnicas de pintado para crear pantallas a color.

Aplicaciones: Los diodos infrarrojos (IRED) se emplean en mandos a distancia, para aplicaciones de control remoto, así como en dispositivos detectores. Los diodos LED se emplean con profusión en todo tipo de indicadores de estado (encendido/apagado) en dispositivos de señalización (de tráfico, de emergencia, etc.) y en paneles informativos,

en el alumbrado de pantallas de cristal líquido, existen impresoras LED, el uso de lámparas LED en el ámbito de la iluminación (incluyendo la señalización de tráfico) es previsible que se incremente en el futuro, ya que aunque sus prestaciones son intermedias entre las lámpara incandescentes y los tubos fluorescentes, presenta indudables ventajas frente a ambos sistemas de iluminación particularmente su larga vida útil, y su menor fragilidad.

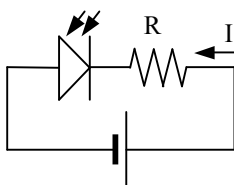
5.6. Fotodiodo

Es un detector de luz, un dispositivo basado en la tecnología de semiconductores de silicio, convierte las señales de luz en señales eléctricas, es una parte importante de la optoelectrónica del semiconductor.



Representación simbólica

El fotodiodo de unión pn polarizada en sentido inverso es un elemento básico para comprender los dispositivos fotosensibles de silicio. Cuando la luz de longitud de onda apropiada es dirigida hacia la unión, se crean pares hueco-electrón que se desplazan a través de la unión debido al campo generado en la región deprimida. El resultado es un flujo de corriente en el circuito externo, denominado fotocorriente, que es proporcional a la intensidad de la luz que incide en el dispositivo. El fotodiodo se comporta básicamente como un generador de corriente proporcional a la iluminación que permanece prácticamente constante hasta que se alcanza la tensión de avalancha.



El fotodiodo exhibe un pico de respuesta en una longitud de onda radiante determinada, en uno típico de Silicio se halla aproximadamente en 850 nm. Para esta longitud de onda, se produce la máxima cantidad de pares huecos-electrón en la proximidad de la unión.

La totalidad de los detectores de luz comunes consisten en una unión a fotodiodo y un amplificador. En la mayoría de dispositivos comerciales, la corriente del fotodiodo se halla en el margen comprendido entre las décimas de microamperio y las decenas de microamperios.

5.7. Optoacopladores

Existen muchas aplicaciones en las que la información debe ser transmitida entre dos circuitos eléctricamente aislados uno de otro. Este aislamiento puede ser conseguido de diferentes formas, siendo el optoacoplador una de las más efectivas donde el aislamiento de ruido y de alta tensión, y el tamaño son características determinantes

Un optoacoplador es un dispositivo que contiene una fuente de luz y un detector fotosensible separados una cierta distancia y sin contacto eléctrico entre ellos. La clave del funcionamiento de un optoacoplador está en el emisor, un LED, y en el detector

fotosensible a la salida. La energía de luz proporcionada por el emisor está situada generalmente en la región de los infrarrojos o muy cercana a ella.

5.8. Modelo lineal del diodo

El análisis de circuitos que incluyen diodos de unión, puede hacerse gráficamente a partir de la curva característica. Por ejemplo, en el circuito de la Fig.5.6.

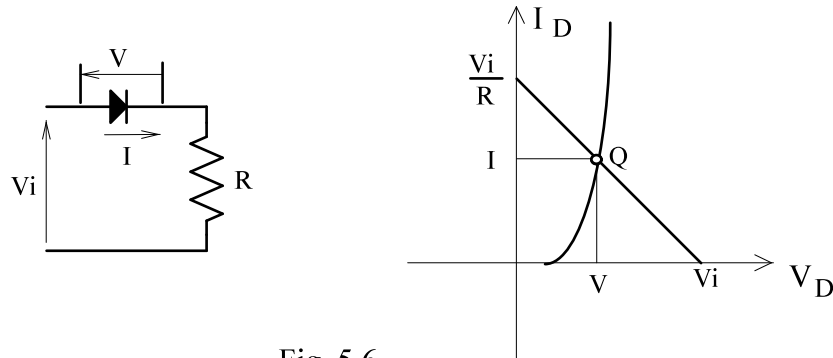


Fig. 5.6.

Para simplificar el análisis, se sustituye el diodo (no lineal), por circuitos lineales (modelos) que resultan de aproximar su característica mediante tramos rectos. Las aproximaciones que más se usan, son:

Diodo ideal ($R_f = 0$, $R_r \rightarrow \infty$, $V_\gamma = 0$):

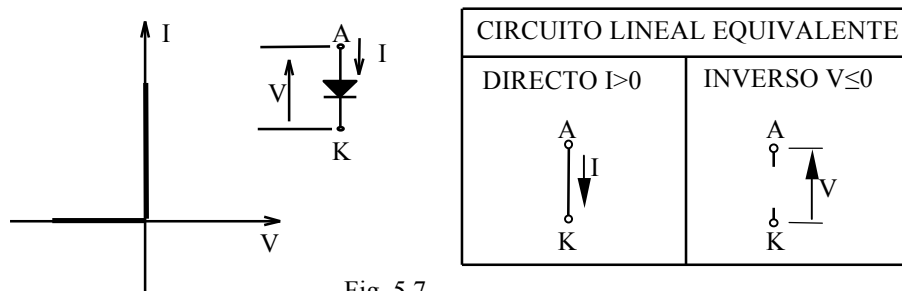


Fig. 5.7.

Conduce con $R_f = 0$ para $V \geq 0$, y presenta una $R_r \rightarrow \infty$ para $V \leq 0$.

Considerando $R_f = 0$, $R_r \rightarrow \infty$, $V_\gamma \neq 0$:

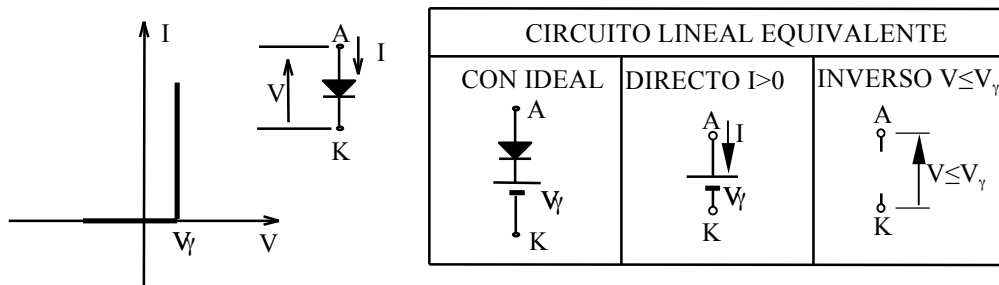


Fig. 5.8.

Considerando $R_f \neq 0$, $R_r \rightarrow \infty$, $V_\gamma = 0$:

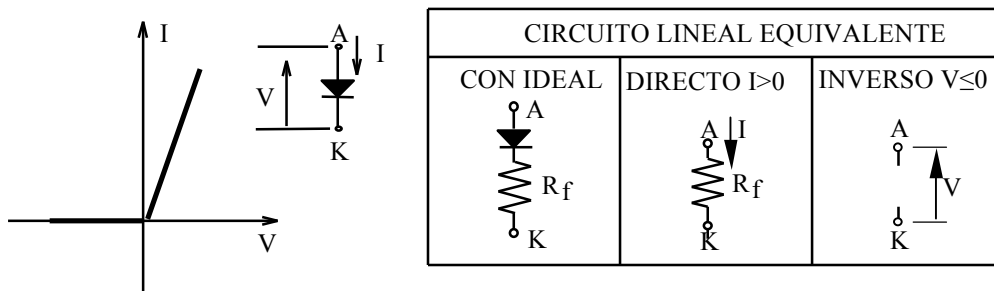


Fig. 5.9.

Considerando $R_f \neq 0, R_r \rightarrow \infty, V_\gamma \neq 0$:

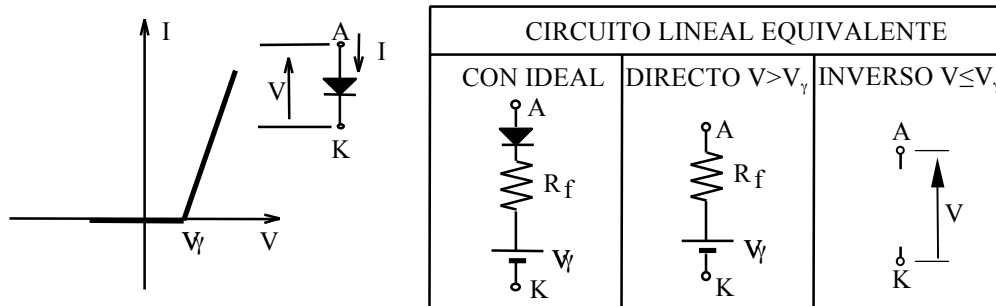


Fig. 5.10.

Considerando $R_f \neq 0, R_r \neq \infty, V_\gamma \neq 0$:

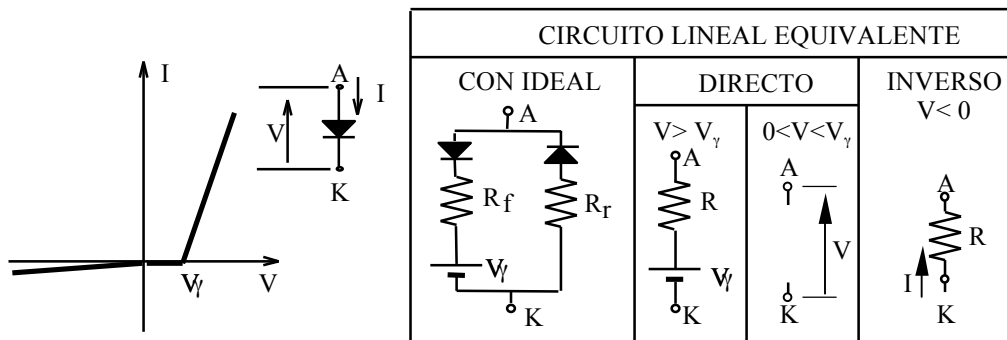


Fig. 5.11.

5.8.1. Modelos lineales equivalentes del diodo zener:

Considerando los efectos de: V_γ y V_Z :

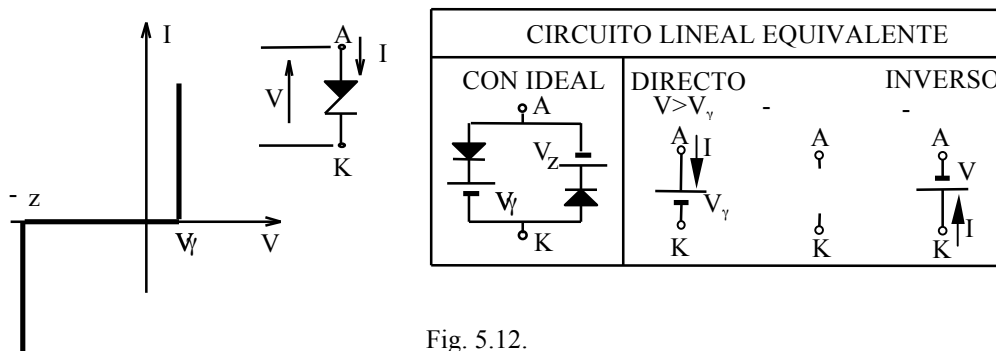


Fig. 5.12.

Considerando los efectos de: V_γ, V_Z, R_f y R_Z :

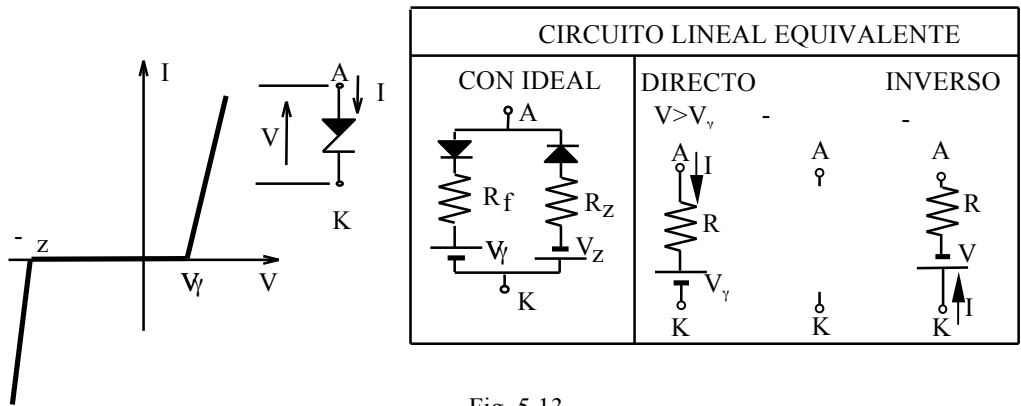


Fig. 5.13.