

## PRÁCTICA 2.- EL DIODO SEMICONDUCTOR

### 1.- OBJETIVOS

- Conocimiento de la característica corriente-tensión.
- Conceptos: tensión umbral, tensión zener, perforación, resistencia interna.
- Equivalencia del circuito *tensión umbral-resistencia interna*.
- Comportamiento del diodo en alterna.
- Obtención experimental de las curvas características de componentes.

### 2.- EL DIODO SEMICONDUCTOR

Un diodo semiconductor es un trozo de cristal de Silicio o Germanio dopado irregularmente con dos tipos de impurezas, debido a lo cual en dichos cristales se suelen diferenciar tres zonas: una zona *n* donde los enlaces entre los átomos de Silicio y de impureza dejan un electrón suelto fácilmente desprendible; una zona *p* donde a pesar de tener un electrón sin formar ningún enlace es más fácil incorporarle un electrón para completar dicho enlace que arrancarlo (es decir, existe un hueco); por tanto se puede hablar de una zona con electrones libres y una zona con huecos o portadores de carga positivos. El signo opuesto de estos portadores de carga hace que se intercambie cierto número de electrones y huecos entre ambas zonas hasta que en la zona media del semiconductor aparece una *zona de transición* formada por iones y dando lugar a una barrera de potencial.

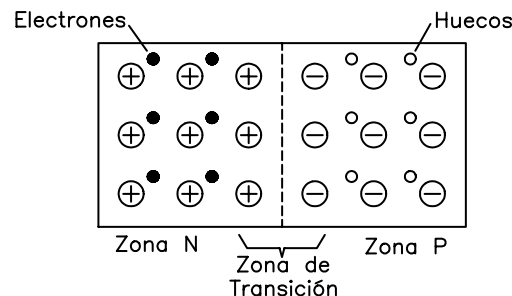


Figura 1.- Distribución de cargas en diodo sin polarizar.

Si a dicho trozo de cristal le añadimos unos terminales de conexión en sus extremos y lo introducimos en un circuito, veremos que dicho cristal tendrá un comportamiento diferente según se le aplique una tensión positiva o negativa en sus extremos:

- Si la tensión aplicada al diodo es tal que la tensión de la zona *p* es más positiva que la existente en la zona *n* (polarización directa) los electrones de la zona *n* tenderán a trasladarse a la zona *p*, hecho que se verá facilitado por tener dicha zona defecto de electrones y podrá establecerse una corriente a través del diodo. En este caso se podría decir que la corriente se divide en una corriente de electrones y otra corriente de huecos en sentido contrario. En esta situación la zona de transición se hace prácticamente despreciable.

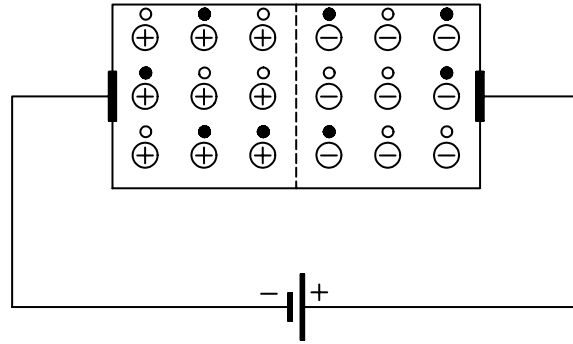


Figura 2.- Distribución de cargas en diodo polarizado directamente.

- Si la tensión aplicada al diodo es tal que la tensión de la zona *p* es más negativa que la existente en la zona *n* (polarización inversa), en esta situación se establecerá una conducción de electrones prácticamente despreciable ya que el número de estos en movimiento vendrá determinado por los que existen en la zona *p*, la cual al ser deficitaria de ellos sólo podrá aportar los portadores (electrones) de origen térmico. En este estado la zona de transición aumenta sus límites.

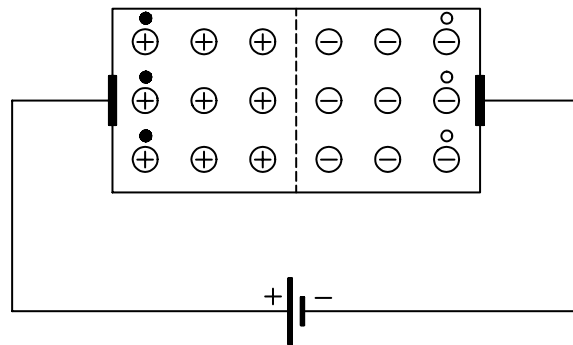


Figura 3.- Distribución de cargas en diodo polarizado inversamente.

Debido al dopaje realizado en un cristal semiconductor obtenemos un componente cuya importancia reside en su carácter *unidireccional*.

### 3.- CARACTERÍSTICA ESTÁTICA

En el estudio de componentes se pueden diferenciar dos tipos de características: las características estáticas (en las que se ve la interrelación de las magnitudes implicadas) y las características dinámicas (en las que se estudia la variación de una magnitud en función del tiempo, ante un determinado estímulo).

El diodo es un dipolo pasivo en el cual la diferencia de potencial entre sus bornes y la corriente que lo atraviesa están ligados por la ecuación:

$$I = I_o(e^{V/\eta V_T} - 1) \quad (1.1)$$

Este dipolo es disipativo, absorbe siempre potencia ya que *V* e *I* son siempre del mismo signo. El diodo está polarizado en sentido directo si *V* es positiva, indicando que el lado *p* de la unión es positivo con respecto al *n*. En este caso tendremos un valor positivo de *I*, o sea que la corriente circulará del lado *p* al lado *n*. La constante experimental  $\eta$  es

conocida como el *coeficiente de emisión*, vale la unidad para el *Ge* y aproximadamente 2 para el *Si*, con corrientes moderadas. El coeficiente  $V_T$  es el *potencial térmico* y viene dado por la ecuación:

$$V_T = \frac{kT}{q} = \frac{T}{11600} \approx 25.8mV \quad (1.2)$$

Donde  $q$  es la carga del electrón,  $k$  es la constante de Boltzmann en  $J/^{\circ}K$  y  $T$  la temperatura absoluta. Se denomina característica estática del diodo a la representación gráfica de la curva  $V = f(I)$ . Esta característica no es lineal y pone en evidencia el comportamiento unidireccional del dispositivo.

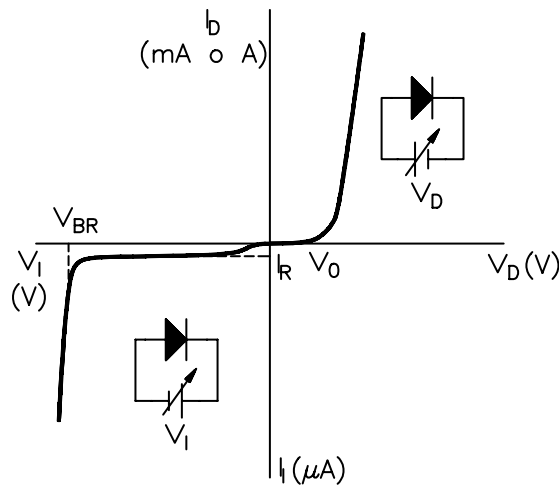


Figura 4.- Característica del diodo V-I.

En la *característica directa* de un diodo semiconductor se pueden apreciar 3 zonas netamente diferenciadas :

1. La zona inferior a la tensión de umbral ( $V_0$  o  $V_\gamma$ ) corresponde a una zona de la característica en la cual los valores de la corriente son muy pequeños (por ejemplo inferiores al 1% de la corriente nominal del diodo) y casi despreciables. Por debajo de esta tensión el diodo no actúa realmente como elemento unidireccional. Los diodos disponibles en el mercado son de *Ge* o de *Si*. Ambos diodos son comparables en cuanto a sus corrientes, pero  $V_\gamma$  es aproximadamente 0.2V para el *Ge* y 0.6V para el *Si*.
2. Por encima de la tensión de umbral, la corriente crece rápidamente según una exponencial que podemos aproximar:

$$I = I_o (e^{V/\eta V_T} - 1) \approx I_o e^{V/\eta V_T} \quad (1.3)$$

3. Cuando la corriente directa a través del diodo es importante, ya no es posible despreciar la caída de tensión óhmica en las regiones  $p$  y  $n$  así como en los accesorios conductores (contraelectrodos, shunts, terminales) del dispositivo. Cuando estas caídas de tensión óhmicas son preponderantes, la característica se confunde con una recta.

En cuanto  $V$  alcanza un valor de varias décimas negativas de voltio, entramos en la *característica inversa* del diodo.

$$I = I_o \left( e^{V/\eta V_T} - 1 \right) \approx -I_o \quad (1.4)$$

La corriente inversa es pues muy pequeña en relación a la corriente directa. Sin embargo, el diodo puede soportar en polarización inversa una elevada tensión inversa. El límite de dicha tensión es la llamada tensión de perforación, que según los diodos puede variar de varias centenas a varios miles de voltios. La expresión "perforación" debe tomarse en sentido figurado ya que el fenómeno que se produce no es forzosamente destructivo, si lo será cuando las potencias en juego  $v_i \cdot i_i$  alcanzan valores superiores a los admisibles en la unión. La perforación puede obedecer a dos procesos diferentes:

- **Perforación por avalancha.** Se considera la siguiente situación: Un portador generado térmicamente cae en la barrera de la unión y adquiere energía a partir del potencial aplicado. Estos portadores chocan con los iones del cristal, generándose suficiente energía para romper un enlace covalente. Se ha creado ahora un par electrón-hueco que se suma a los portadores originales. A su vez, estos portadores pueden adquirir energía del campo eléctrico aplicado, chocar contra otros iones del cristal y crear, asimismo, otra pareja de electrón-hueco. Por lo tanto, cada nuevo portador puede producir reiteradamente portadores adicionales debido a la colisión y acción destructiva de los enlaces. El resultado de este proceso es una gran corriente inversa y diremos que el diodo está en la región de avalancha o ruptura. La energía cinética de los portadores minoritarios que atraviesan la unión en polarización inversa aumenta con  $V_I$ . La aceleración de los portadores para valores elevados de  $V_I$  puede provocar la ionización por choque de los átomos neutros y producir un efecto de avalancha. La tensión a partir de la cual el fenómeno aparece, se denomina tensión de perforación  $V_{BR}$  y es seguida de una zona de resistencia negativa a causa del efecto de ionización que se mantiene incluso para valores de  $V_I < V_{BR}$ . En la zona en la que la pendiente es negativa, el funcionamiento es inestable y no es utilizable normalmente.

- **Perforación por efecto zener.** Aún cuando los portadores asequibles inicialmente no adquieran suficiente energía para romper los enlaces, se puede iniciar la avalancha por ruptura directa de los enlaces. Al polarizar el diodo en inverso, la elevación de la barrera de potencial da lugar a un campo eléctrico en la zona de depleción. Debido a la existencia de dicho campo, cabe que éste ejerza una fuerza suficientemente elevada sobre un electrón, de tal manera que se rompa su enlace covalente apareciendo pares electrón-hueco distintos de los de origen térmico. Debido a la creación de estos portadores la corriente inversa aumenta rápidamente; sin embargo, la tensión  $V_{BR}$  permanece casi constante. Nótese que este proceso no implica la colisión de portadores contra los iones del cristal.

- En la práctica, cuando la tensión en bornes de un diodo polarizado en inverso llega al valor  $V_{BR}$  el proceso que aparece puede participar de ambos fenómenos. De todos modos, el efecto sobre el diodo depende enormemente de las características del circuito,

así como de la duración del mismo. El hecho de que un diodo quede destruido por sobrepaso de  $V_{BR}$  depende de la duración del mismo y de la energía puesta en juego.

#### **4.- CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS O DE CONMUTACIÓN**

Si al cerrar un circuito el diodo queda polarizado en directo, se establece en él una circulación de electrones junto con otra circulación en sentido contrario de huecos. En cambio si la polarización resulta ser inversa no se establece ninguna circulación de portadores significativa, es decir en uno y otro caso nos encontraríamos en las situaciones de las figuras 2 y 3 respectivamente. Describiéndose en uno y otro caso las ramas positiva o negativa de Fig.4. Una vez anulada la polarización existente, los portadores en circulación deben de volver a almacenarse, es decir, se debe restablecer la configuración de cargas inicial representada en la Fig1; correspondiente al punto origen de la característica  $I$ - $V$ .

Pero si esto no es así, y las polarizaciones directas e inversas se suceden sin que haya tiempo suficiente para el almacenamiento de los portadores. El diodo no describirá la curva  $I$ - $V$ , y su funcionamiento se mostrará por las características dinámicas. Estas describen la evolución en el tiempo de la tensión directa (c.d.t. en extremos del diodo) y la corriente que atraviesa el diodo.

Consideremos la Fig. 5, si al circuito *a)* se le aplica la tensión de entrada en escalón *b)*, la estructura interna del diodo pasará de la mostrada en Fig. 2 a la Fig. 3. La corriente y la tensión en extremos del diodo experimentarán una variación como las mostradas en *c)* y *d)*. En dichas representaciones se ve que el diodo no bloquea instantáneamente la tensión  $V_I$  inversa aplicada, debido a la existencia de gran número de portadores en circulación. Dichos portadores deberán retroceder para alcanzar la configuración de Fig.3, estableciéndose una corriente de valor  $-V_I/R_L$ . Esta corriente se mantendrá hasta que se alcance una configuración de cargas similar a Fig.1 y durante el tiempo denominado de almacenamiento  $t_s$ , que dependerá del número de portadores en juego. Igualmente la caída de tensión en el diodo baja ligeramente y sigue siendo positiva debido a que la distribución de portadores es la misma aunque su concentración va disminuyendo durante el almacenamiento.

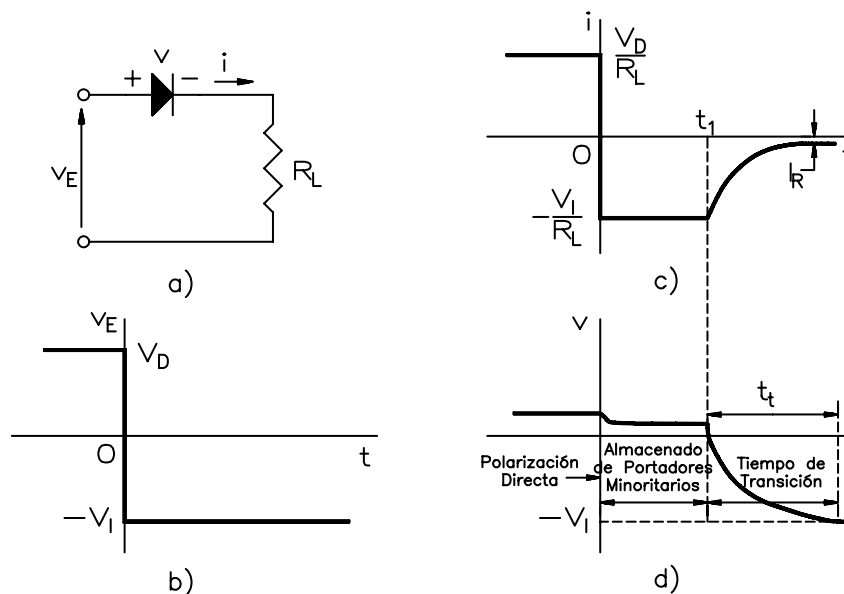


Figura 5.- Características de conmutación del diodo.

Una vez transcurrido el tiempo de almacenamiento la corriente comienza a anularse por la ausencia de portadores y la c.d.t. directa comienza a invertirse hacia  $V_I$ , llegará a este valor cuando la carga de transición de la unión haya tomado el valor correspondiente a la tensión de alimentación aplicada, este proceso transcurre durante el tiempo de transición  $t_t$ .

Los fabricantes suelen proporcionar el tiempo conocido como *tiempo inverso de recuperación* y es igual a  $t_{rr}=t_t+t_s$  y es el tiempo necesario para que el semiconductor recupere su total capacidad de bloqueo respecto a una tensión inversa, cuando pasa de polarización directa a inversa. Igualmente se define  $t_{rf}$  *tiempo de recuperación directo* tiempo necesario para alcanzar su estado de plena conducción cuando pasa de polarización inversa a directa.

## 5.- CIRCUITO EQUIVALENTE DEL DIODO

Un diodo puede ser sustituido por un circuito equivalente dependiendo de la polarización aplicada.

Para una polarización directa el circuito equivalente sería un circuito serie formado por una fuente de tensión en oposición a la de polarización de valor igual a la tensión umbral, y una resistencia estática. Dicha resistencia estática interna se define como la relación  $\rho = V_d / I_d (\Omega)$  entre la tensión e intensidad en cada punto de la característica estática directa, se toma un valor medio. Esta representación tiene la ventaja de que es posible escribir la ecuación de la característica directa de la forma:  $V_d = V_o + \rho \cdot I_d$ .

Si la polarización es inversa el circuito equivalente sería una resistencia de valor elevado que impediría el paso de corriente.

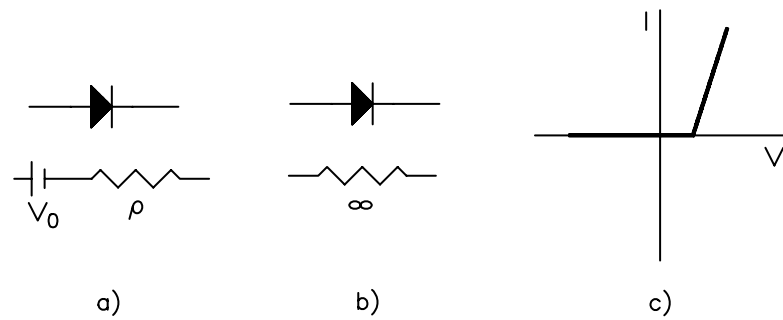
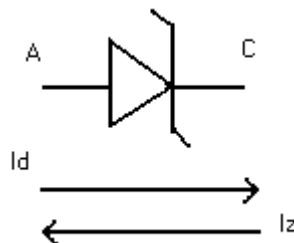


Figura 6.- Circuitos equivalentes en polarización directa a), e inversa b). En c) se muestra la característica considerando estas equivalencias.

## 6.- EL DIODO ZÉNER

Mientras que el diodo semiconductor sólo permite el paso de corriente en la zona de polarización directa en sentido ánodo-cátodo el diodo zéner puede trabajar en la región inversa, permitiendo la circulación de corriente en sentido cátodo ánodo.

La tensión inversa a partir de la cual el diodo conduce en sentido inverso se denomina tensión zéner ( $V_z$ ). Por debajo de dicha tensión y hasta el valor de la tensión umbral ( $V_\gamma$ ) el diodo estará en polarización inversa, no permitiendo el paso de la corriente; si se somete a una tensión ánodo-cátodo mayor que  $V_\gamma$  pasará a polarización directa, comportándose como el diodo semiconductor visto anteriormente.



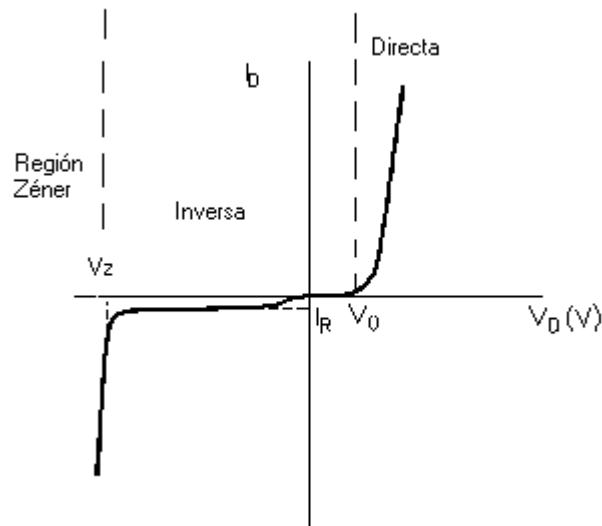


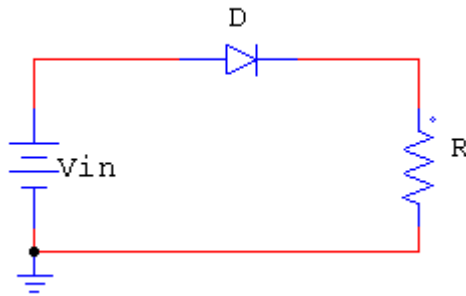
Figura 7.- Símbolo y curva característica del diodo zéner

## 7.- RECOMENDACIONES

1. Para saber si un diodo se encuentra en buen estado, y determinar el ánodo y el cátodo se utilizará un óhmetro. Con éste se realizarán dos medidas de la resistencia del diodo (una para cada uno de los sentidos posibles de colocación). Si el diodo está en buen estado la medida más baja será del orden de  $500\Omega$  máximo, la mayor será del orden de  $300K\Omega$ . El ánodo será el extremo colocado en el polo positivo del óhmetro para la medida más baja si el polímetro es digital, si es analógico el ánodo será el colocado en el polo negativo.
2. En el diseño de circuitos habrá que seleccionar un tipo de diodo cuya tensión inversa máxima soportable sea mayor que la tensión que pueda aparecer de estas características en el circuito.
3. La potencia a disipar por el diodo debe de limitarse a la mitad de la nominal. Ya que la disipación de potencia supone aumento de temperatura, provocando consecuentemente un aumento de corriente inversa.
4. Igualmente el diodo debe ser seleccionado para que la corriente máxima que circule por el circuito esté dentro de los márgenes dados por el fabricante, o bien, calcular la resistencia mínima que debe haber en el circuito para garantizar que no se sobrepasará el valor máximo de la corriente que soporte el diodo en cuestión.

Para el cálculo de dicha resistencia mínima tan sólo hay que resolver la ecuación de la malla del circuito, tomando como dato la  $I_{max}$  que soporte el diodo:





$$V_{in} = V_D + V_R = V_D + IR ;$$

como sólo circula corriente si el diodo está en polarización directa  $V_D = V_\gamma$  . Particularizando para el caso más desfavorable de la corriente  $I = I_{max}$  tendremos:

$$V_{in} = V_\gamma + I_{max} R \quad \rightarrow \quad R_{min} = \frac{V_{in} - V_\gamma}{I_{max}} ;$$

El valor de  $R = R_{min}$  obtenido es el que debe tener para que circule la corriente máxima, seleccionando un valor de  $R > R_{min}$  la corriente que circulará por el diodo será menor que  $I_{max}$  , asegurando así la no destrucción del dispositivo No obstante, es importante recordar en este punto que la hora de elegir una resistencia no sólo debemos considerar su valor óhmico, sino también la máxima potencia que puede disipar.

## 8.- EJERCICIO EXPERIMENTAL

### 8.1.- Material

- |                          |                                 |
|--------------------------|---------------------------------|
| - Generador de funciones | - Polímetro                     |
| - Transformador 220V-24V | - 1 resistencia de 1KΩ 1W       |
| - Osciloscopio           | - 1 diodo semiconductor D1N4007 |
| - 1 diodo zéner de 5V1   |                                 |

### 8.2.- Proceso

- 1.- Utilizando un polímetro identificar los terminales correspondientes al ánodo y cátodo del diodo. Representarlo, indicar dichos terminales y definirlos.