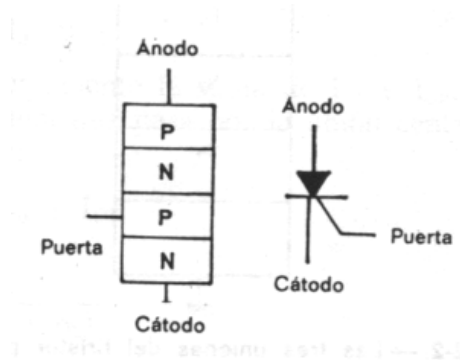


TEORIA DEL TIRISTOR

1.- Estructura y símbolo

El tiristor es un semiconductor sólido de silicio formado por cuatro capas P y N alternativamente, dispuestas como se ve en la siguiente figura, donde también se representa su símbolo.



Los dos terminales principales son el de ánodo y el de cátodo, y la circulación entre ellos de corriente directa (electrones que van del cátodo al ánodo o corriente que va de ánodo a cátodo) está controlada por un electrodo de mando llamado "puerta" ("gate" en inglés).

El tiristor es un elemento unidireccional; una vez aplicada la señal de mando a la puerta, el dispositivo deja pasar una corriente que sólo puede tener un único sentido. Por ello a veces se designa al tiristor por lo que constituye, de hecho, su definición, *rectificador controlado*, traducción incompleta del inglés, "silicon controlled rectifier" de ahí las siglas de SCR.

El dispositivo cumple varias misiones que podemos clasificar un poco arbitrariamente como sigue:

- Rectificación: consiste en usar la propiedad de funcionamiento unidireccional del dispositivo, el cual realiza entonces la función de un diodo;
- Interrupción de corriente: usado como interruptor, el tiristor puede reemplazar a los contactores mecánicos;
- Regulación: la posibilidad de ajustar el momento preciso de cebado permite emplear el tiristor para gobernar la potencia o la corriente media de salida;
- Amplificación: puesto que la corriente de mando puede ser muy débil en comparación con la corriente principal, se produce un fenómeno de amplificación en corriente o en potencia. En ciertas aplicaciones esta "ganancia" puede ser de utilidad.

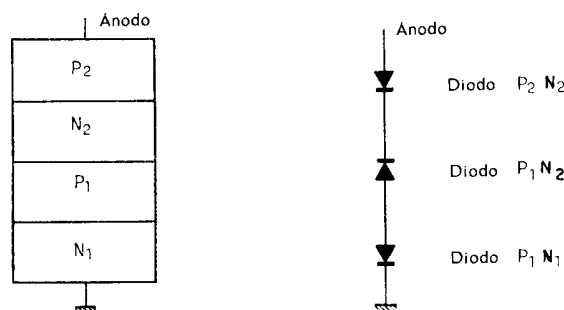
2. El tiristor bajo tensión (en estado de bloqueo)

Para simplificar el siguiente análisis admitiremos que el cátodo del tiristor está siempre a masa y que la puerta no está conectada ("flotando").

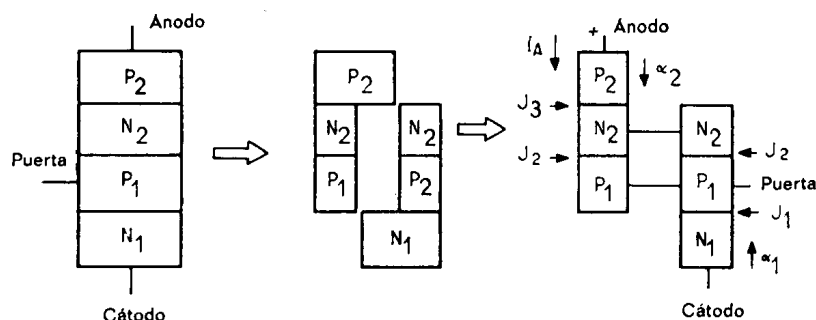
En estas condiciones, se puede comparar el tiristor a tres diodos conectados en oposición. En efecto, las capas P2N2 y P1N2 forman diodos que aseguran el aguante en tensión del dispositivo. De esta forma:

— Si el ánodo es positivo, el elemento está polarizado directamente, pero el diodo P1N2 bloquea la tensión aplicada;

— Si, por el contrario, el ánodo es negativo, los diodos P2N2 y P1N1 tienen polarización inversa. Por ser débil la tensión de avalancha de P1N1, su papel es despreciable y es P2N2 el que ha de limitar la corriente inversa de fuga.



Las tres uniones del tiristor pueden representarse mediante tres diodos equivalentes



El tiristor es equivalente a una combinación de dos transistores, uno PNP y otro NPN.

La tensión máxima viene limitada, prácticamente, por la tensión de avalancha de los diodos P2N2 y P1N2.

3. El tiristor bajo tensión directa

Se comprenderá mejor el funcionamiento del tiristor si nos referimos al montaje con dos transistores, PNP y NPN, de la figura 2-3, que resulta equivalente. Estos dos transistores están conectados de forma que se obtenga una realimentación positiva.

Supongamos que sea positiva la región P2 con relación a la N1. Las uniones J3 y J1 emiten portadores, positivos y negativos respectivamente, hacia las regiones N2 y P1. Estos portadores, tras su difusión en las bases de los transistores, llegan a la unión J2, donde la carga espacial crea un intenso campo eléctrico.

Siendo 0.3 la ganancia de corriente que da la fracción de la corriente de huecos inyectada en el emisor y que llega al colector del PNP, y siendo por otro lado a la ganancia de corriente que da la fracción de la corriente de electrones inyectada en el emisor que llega al colector del NPN, podemos escribir:

$$I_{C2} = \alpha_2 I_A$$

y

$$I_{C1} = \alpha_1 I_A$$

La corriente total de ánodo I_A es evidentemente la suma de I_{C1} e I_{C2} , a la que hay que sumar la corriente de fuga residual que pasa por la unión central J2 y a la que llamaremos I_{CX} . Se tiene entonces:

$$I_A = \alpha_1 I_A + \alpha_2 I_A + I_{CX}$$

lo que nos da:

$$I_A = \frac{I_{CX}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}$$

Ahora bien, en muchos transistores de silicio la ganancia α es baja para valores reducidos de corriente, aumentando cuando crece la corriente. Luego, si I_{CX} es reducida, el denominador de la fracción anterior se acerca a 1 (para corrientes débiles) y la corriente I_A es apenas mayor que la corriente de fuga.

Aunque polarizada directamente, la estructura PNPN permanece pues bloqueada presentando una elevada impedancia.

Cuando aumenta, por cualquier motivo, la corriente de fuga I_{CX} , aumentan la corriente y la ganancia. La suma $\alpha_1 + \alpha_2$ tiende entonces a 1 y la corriente I_A tiende a infinito. En realidad, esta corriente toma un valor muy alto, limitado sólo por el circuito externo.

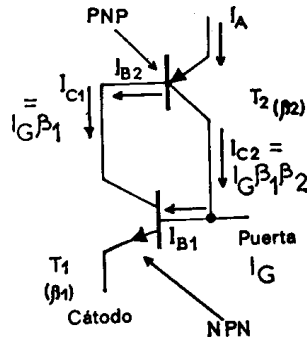
El tiristor está entonces en estado conductor (también se dice que está desbloqueado o disparado).

Hagamos observar que este tipo de cebado por aumento de la corriente de fuga — esto es, en general, por aumento de la tensión aplicada entre ánodo y cátodo del elemento — es desaconsejable en la mayoría de los casos.

4. Principio de cebado por puerta

El cebado por puerta es el método más usual de disparo de tiristores. El razonamiento siguiente aparecerá mucho más claro si nos referimos a la figura 2.4.

Una vez polarizado directamente el tiristor se inyecta un impulso positivo de mando en su puerta (este ataque es en corriente, denominándose I_G a esta última). El transistor NPN designado T1 recibe una corriente de base I_G , pasando a ser su corriente de colector de $I_G \beta_1$, donde β_1 es la ganancia de corriente de este transistor (montaje en emisor común).



Montaje equivalente de un tiristor que explica el fenómeno del cebado

Esta corriente se inyecta a su vez en la base del transistor T2 (PNP) que entrega entonces una corriente de $I_G \beta_1 \beta_2$ (siendo β_2 la ganancia de corriente de T2). Esta corriente, que aparece en el colector de T2, vuelve a aplicarse a la base de T.

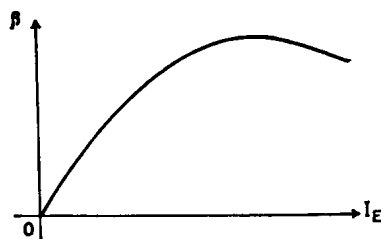
Hay que considerar entonces dos casos:

- 1.º El producto $\beta_1 \beta_2$ es inferior a 1, en cuyo caso el elemento no se ceba;
- 2.º El producto $\beta_1 \beta_2$ tiende a la unidad, con lo que se realiza el proceso de amplificación y el elemento bascula al estado conductor.

Estas dos condiciones ($\beta_1 \beta_2 < 1$ y $\beta_1 \beta_2 \rightarrow 1$) caracterizan el estado del tiristor en función de la corriente. En efecto, la ganancia β de un transistor de silicio crece normalmente, por lo general, en función de la corriente (fig. 2-5). Así pues:

— Si la corriente de puerta es débil, el producto $\beta_1 \beta_2$ es inferior a la unidad y no se ceba el elemento;

— Si el impulso de mando es suficiente, las corrientes de emisor son lo bastante elevadas para que el producto $\beta_1 \beta_2$ tienda a 1.



La ganancia de corriente β de un transistor de silicio depende por o general de la corriente de emisor

En cuanto se produce el cebado, la realimentación hace que los dos transistores conduzcan a saturación (por cuanto la corriente de colector de uno se inyecta sistemáticamente en la base del otro). Una vez en conducción, los

transistores se mantienen ya en ese estado, incluso aunque desaparezca el impulso inicial de puerta, hasta que el circuito exterior deje de mantener la corriente I_A .

5. ¿Cómo puede cebarse un tiristor?

Como ya hemos visto, el tiristor puede adoptar uno de estos estados:

- de bloqueo, cuando está polarizado en sentido inverso;
- de bloqueo o de conducción, cuando la polarización es directa, según que esté cebado o no.

En este último caso, para hacerlo pasar del estado de bloqueo al de conducción se recurre, como se ha dicho ya, a la propiedad esencial del transistor de silicio: la de poseer una ganancia de corriente que crece con la corriente de emisor, I_E .

Por tanto, se pueden usar todos los medios capaces de provocar un aumento de la corriente I_E . Los más importantes son;

- La tensión. Cuando aumenta la tensión ánodo-cátodo del tiristor, llega un momento en que la corriente de fuga es suficiente para producir un brusco aumento de la corriente I_E .

Esta forma de disparo se usa sobre todo con los diodos de 4 capas (diodos-tiristores).

- La derivada de la tensión. Ya se sabe que una unión PN presenta una cierta capacidad. Así, pues, si se hace crecer bruscamente la tensión ánodo-cátodo, esta capacidad se carga con una corriente:

$$i = C \, dv / dt$$

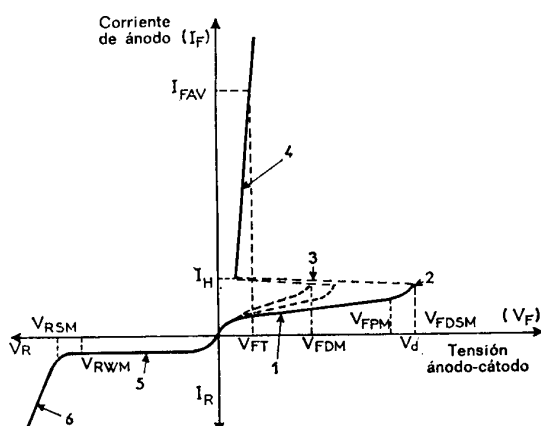
Y, si esta corriente i es suficientemente elevada, provocará el cebado del tiristor.

- *La temperatura.* La corriente inversa de fuga de un transistor de silicio aumenta al doble, aproximadamente, cada 14°C (al aumentar la temperatura). Cuando la corriente alcanza un valor suficiente, se produce el disparo del tiristor por los mismos fenómenos ya vistos.
- *El efecto transistor.* Es la forma clásica de gobernar un tiristor.
En la base del transistor equivalente se inyectan portadores suplementarios que provocan el fenómeno de cebado (la base es la puerta del tiristor).
- *El efecto fotoeléctrico.* La luz, otra de las formas de energía, puede también provocar el cebado del tiristor al crear pares electrón-hueco. En este caso se emplea un fototiristor, que es un tiristor con una "ventana" (esto es una lente transparente que deja pasar los rayos luminosos) en la región de puerta.

6. Curva característica del tiristor

En la figura se ha dibujado la curva característica típica de un tiristor (elemento unidireccional), representándose la corriente I_A en función de la diferencia de tensión ánodo-cátodo.

Cuando es nula la tensión V , lo es también la corriente I_A . Al crecer la tensión V en sentido directo — se la designará como V_F , siendo F la inicial de "forward" (directo, en inglés) — se alcanza un valor mínimo (V_d) que provoca el cebado; el tiristor se hace entonces conductor y cae la tensión ánodo-cátodo mientras aumenta la corriente I_A . Por lo mismo que hemos dicho de la tensión, a esta corriente directa la llamaremos I_F .



Curva característica de un tiristor

Si se polariza inversamente el tiristor, aplicándole una tensión V_R (donde R es la inicial de "reverse", esto es, inverso en inglés) observaremos la existencia de una débil corriente inversa de fuga (esta corriente inversa recibirá el símbolo I_R) hasta que se alcanza un punto de tensión inversa máxima que provoca la destrucción del elemento.

El tiristor es pues conductor sólo en el primer cuadrante. El disparo ha sido provocado en este caso por aumento de la tensión directa.

La aplicación de una corriente de mando en la puerta desplaza, como veremos, hacia la derecha el punto de disparo V_d .

7. Definición de los símbolos

La curva característica del tiristor puede pues dividirse en 6 regiones, de las que 4 están situadas en el primer cuadrante. A continuación definiremos los símbolos principales relativos a puntos notables de esta curva.

Debido a que la mayor parte de la bibliografía existente sobre tiristores procede de EE.UU., se han conservado aquí las designaciones simbólicas del inglés. El lector podrá así referirse directamente a los documentos originales cuya lista se encontrará en la bibliografía, o en cualquier trabajo, en general, del otro lado del Atlántico.

Las magnitudes directas llevarán el índice F (de forward) y las inversas R (de reverse). El siguiente cuadro resume el significado de las abreviaturas usadas:

CORRIENTE DIRECTA MEDIA

Se define así el valor medio de los valores instantáneos de corriente directa ánodo-cátodo en el tiristor, para un intervalo dado de tiempo. Su símbolo es I_{FAV} .

$$I_{FAV} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} i dt$$

CORRIENTE ACCIDENTAL DE PICO

Es el valor que puede alcanzar una punta de corriente ánodo-cátodo en forma accidental, esto es transitoriamente y no de modo recurrente. Su símbolo es I_{FSM} y define pues el valor máximo admisible de las extracorrientes, en el curso de regímenes transitorios aleatorios.

CORRIENTE MÁXIMA DE PUERTA

La corriente máxima de puerta se simboliza I_{GFS} , y es el valor máximo instantáneo que puede alcanzar una punía de corriente en el electrodo de mando del tiristor.

Este valor define también el valor máximo de la corriente de mando en régimen de impulsos de muy corta duración.

TENSIÓN DIRECTA DE DISPARO

La tensión directa de disparo V_d (o también V_{BO}) es la tensión directa por encima de la cual se ceba el tiristor por disparo directo.

TENSIÓN INVERSA DE RUPTURA

La tensión inversa que produce la ruptura del elemento se designa como V_{RR} .

TENSIÓN INVERSA RECURRENTE

La tensión inversa recurrente es V_{RWM} . Se define así el valor máximo que puede tomar la amplitud de la tensión inversa periódica aplicada entre el ánodo y cátodo del tiristor.

TENSIÓN INVERSA RECURRENTE DE PICO

La tensión inversa recurrente de pico es V_{RPM} y es el valor máximo que pueden alcanzar las punías recurrentes de tensión inversa.

Este valor es numéricamente superior al valor máximo de tensión inversa del tiristor (valor de pico máximo).

TENSIÓN INVERSA TRANSITORIA O ACCIDENTAL

La tensión inversa transitoria o accidental es V_{RSM} . Este valor limita la tensión inversa cátodo-ánodo a la que puede someterse el tiristor, durante un intervalo dado de tiempo.

TENSIÓN DIRECTA DE PICO EN BLOQUEO

La tensión directa de pico en estado de bloqueo es V_{DWM} (o también V_{FDM}). Su valor fija un límite a la tensión máxima aplicable entre ánodo y cátodo del tiristor, con puerta flotante, sin riesgo de disparo.

Esta tensión es pues ligeramente inferior a la tensión de disparo en ausencia de señal de mando.

POTENCIA TOTAL DISIPADA

La potencia total disipada en el tiristor es P_{TOT} . En ella se consideran todas las corrientes: directa, media e inversa (I_{FAV} e I_{RR}); de fuga, directa e "inversa" (I_{FD} e I_R); de mando (I_G); corriente capacitiva, etc.

Su valor permite calcular el radiador, si es que el tiristor precisa de uno.

POTENCIA MEDIA DISIPABLE DE PUERTA

La potencia media disipable de puerta es P_{GAV} . Es el valor de la potencia disipada en la unión puerta-cátodo.

POTENCIA DE PICO DE PUERTA

La potencia de pico de puerta es P_{GFS} . Corresponde a la potencia máxima disipada en la unión puerta-cátodo, en el caso de aplicarse una señal de disparo no continua.

Su valor es superior al de P_{GAV} y su límite depende de las condiciones de cebado.

TIEMPO DE INTEGRACIÓN

Es el tiempo en el que se calcula el valor medio, o el eficaz, de la potencia disipada. Se le designa por t_{int} .

En el caso de los tiristores, este tiempo suele fijarse en 20 ms. No obstante, será necesario tener en cuenta la relación existente entre el período de la señal y estos 20 ms para efectuar cualquier cálculo.

CORRIENTE DE ENGANCHE

La corriente de enganche I_L es la corriente I_A mínima que hace bascular el tiristor del estado de bloqueo al de conducción. Su valor es por lo general de dos o tres veces la corriente de mantenimiento, definida a continuación.

CORRIENTE DE MANTENIMIENTO

Para conservar su estado de conducción el tiristor debe suministrar una corriente de ánodo, I_A , mínima que recibe el nombre de corriente de mantenimiento, I_H . A veces se denomina también a esta corriente, corriente hipo-estática.

TENSIÓN DE ENGANCHE

A la corriente I_L , de enganche le corresponde una tensión de enganche V_L .

TENSIÓN DE MANTENIMIENTO

Del mismo modo, se podría definir una tensión de mantenimiento V_H que sería la tensión que, aplicada al ánodo, permitiría el paso de la corriente I_H de mantenimiento.

CORRIENTE DE PUERTA

La corriente de puerta se designa I_G .

En una serie dada de tiristores — teniendo en cuenta la dispersión de las características — el valor máximo necesario para asegurar el cebado de cualquier elemento se designa I_{GT} .

TENSIÓN DE CEBADO

A esta corriente I_{GT} le corresponde una tensión de cebado V_{GD} (que en los dispositivos de uso corriente se aproxima a 1 V).

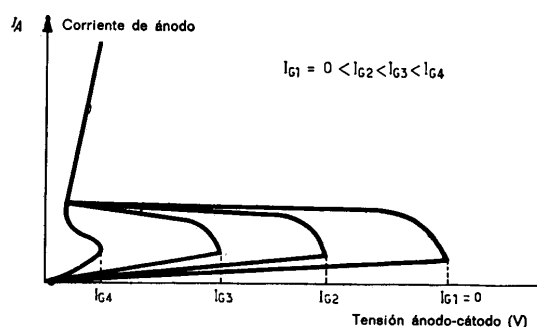
TENSIÓN MÁXIMA EN LA PUERTA SIN DISPARO

Finalmente, la tensión máxima aplicable a la puerta sin provocar el disparo se simboliza por V_{GD} . Esta tensión se define a la temperatura máxima y es siempre muy inferior a la tensión de cebado (puede ser, por ejemplo, de 0,3 V).

Las restantes abreviaturas y notaciones, entre ellas las dinámicas, se irán explicando a medida que vayan haciendo su aparición.

8. Acción de la puerta

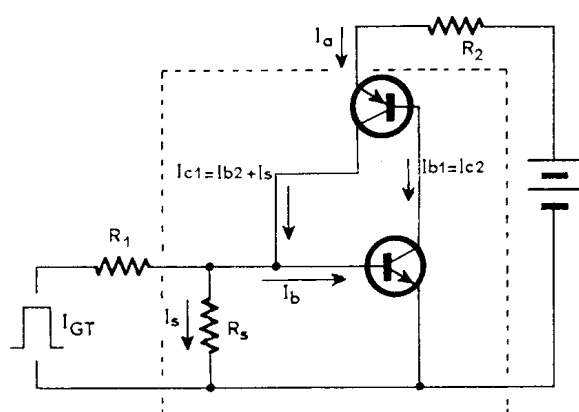
Si se aplica una señal de mando a la puerta del tiristor se modifica la tensión de cebado de éste, tal como muestra las curvas de la figura.



Cuando es nula la corriente I_G de puerta, el tiristor no se ceba hasta que se alcanza la tensión de disparo entre ánodo y cátodo del elemento.

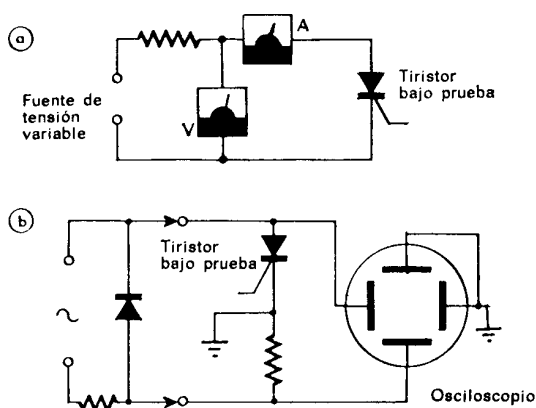
A medida que aumenta la corriente de puerta I_G , disminuye el valor de la tensión de disparo del tiristor. En el límite, el tiristor se comporta como un diodo, esto es, para una corriente de puerta suficientemente elevada, la menor tensión de ánodo provoca la conducción en el tiristor.

Para prevenir los posibles cebados esporádicos del tiristor se puede conectar un resistor en paralelo con la unión puerta-cátodo (siguiente figura). Esto es especialmente interesante cuando la ganancia β del transistor NPN (del par equivalente) es elevada. (Por lo general suele ser más elevada que la ganancia β del PNP.)



Montaje equivalente de un tiristor formado por una pareja PNP-NPN y una terminación resistiva en la base del NPN.

Por otra parte, casi todos los fabricantes integran ya un resistor de difusión entre la puerta y el cátodo del tiristor; esta tecnología es la que se conoce como "shorted emitter", con un cortocircuito puerta-emisor, y más adelante nos ocuparemos de su estudio.



Dos métodos de medida de la corriente de fuga, el denominado de c.c. (a) y el osciloscopio (b).

Al aumentar el valor de la corriente de puerta necesaria para el cebado del tiristor, este resistor en paralelo mejora las características del elemento en bloqueo, y aumenta la inmunidad ante transitorios parásitos. La resistencia depende de la temperatura y de las tolerancias de fabricación, y varía entre los valores extremos $R_{G, (mín.)}$ y $R_{G, (máx.)}$.

9. Corrientes de fuga

De hecho, las corrientes de fuga en el tiristor imponen algunas de las limitaciones inherentes a este dispositivo. Estas corrientes de fuga son:

- La corriente directa de fuga, I_{FD} ;
- La corriente inversa de fuga, I_R

Para su medida pueden usarse dos métodos diferentes:

— *El llamado método de corriente continua* en el que se usa un generador de tensión variable, voltímetro y amperímetro (fig. ant. (a)).

— *El método conocido como del osciloscopio* que permite la medida de los valores de pico (fig. ant. (b)) y el trazado rápido y completo de la curva característica. El generador de tensión se obtiene por rectificación de media onda de una tensión senoidal.

Bibliografía

Tiristores y Triacs (Circuiteca Electrónica)
Henri Lilen
Edit. Alfaomega-Marcombo

Digitalizado por Víctor Gómez para Electrónica ROMALO