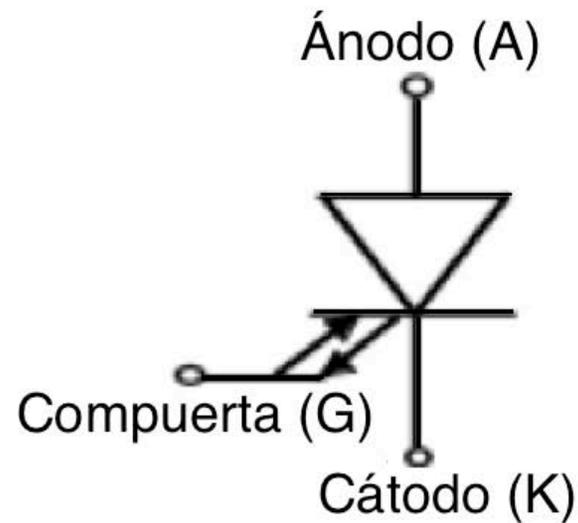


TIRISTOR APAGADO POR COMPUERTA (GTO).

El GTO es el resultado de una modificación parcial del tiristor rápido, que permite apagarlo cuando se extrae corriente por la compuerta en cantidad suficiente para romper el lazo de realimentación positiva que mantiene encendido a un tiristor convencional hasta que la corriente AK pasa por debajo del valor de sostenimiento; las demás características de operación del GTO son similares a las de tiristores rápidos no controlados en apagado.

Actualmente los GTOs son los conmutadores electrónicos de potencia completamente controlados que presentan los mayores valores de tensión de bloqueo y capacidad de corriente; se ofrecieron también en potencias baja y media, pero han sido reemplazados por los IGBTs.



Símbolo del GTO (Gate Turn Off), resaltando que se trata de un tiristor, pero con control bidireccional (control de encendido y de apagado) en la compuerta.

Como un miembro de la familia de los tiristores un GTO esta formado por una estructura regenerativa de cuatro capas (n^+pnp^+) y tres junturas.

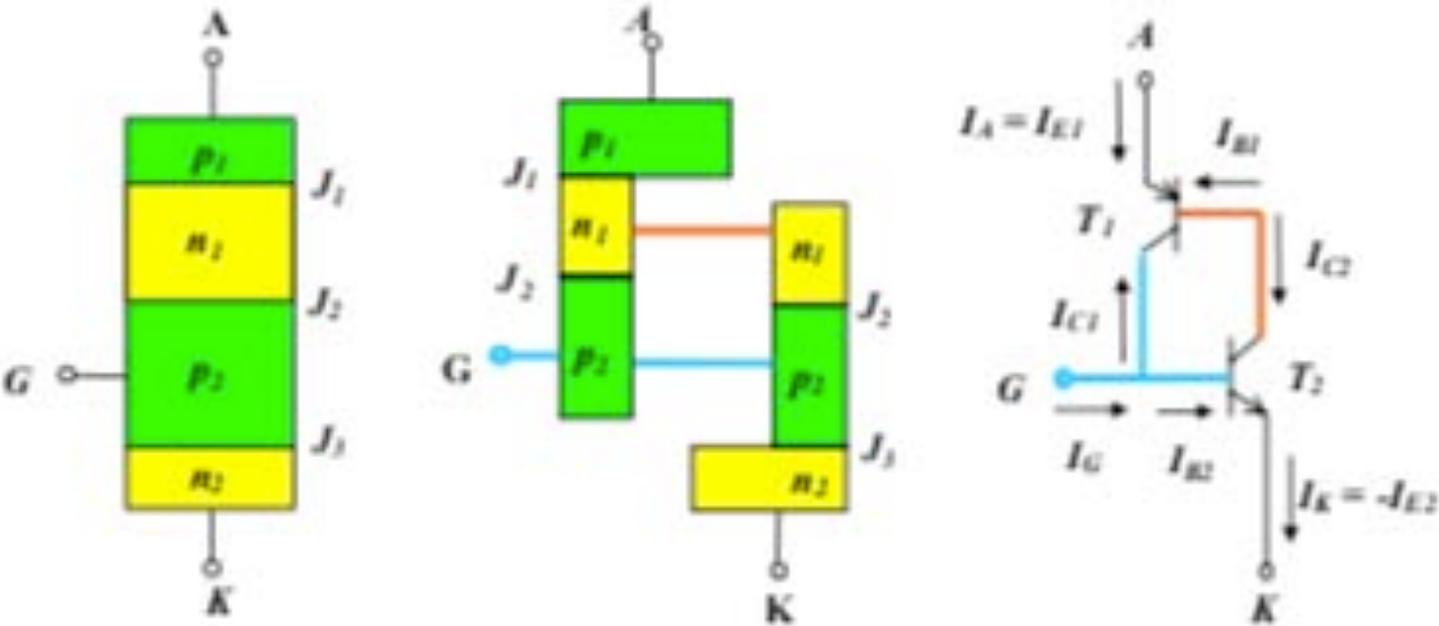
En conducción el GTO se comporta como un tiristor clásico: hay una fuerte inyección de electrones desde el cátodo y de huecos desde el ánodo al cuerpo del dispositivo, lo que mantiene una densidad de plasma extremadamente alta, gracias a la cual la caída en conducción es baja, similar a la de un diodo de potencia equivalente.

La diferencia fundamental entre los GTOs y los otros tiristores es que los GTO están diseñados para que se apaguen cuando se les aplica un pulso de corriente negativo al terminal de compuerta, causando la inversión de la corriente. La posibilidad de apagar por compuerta elimina la necesidad de emplear los circuitos auxiliares de apagado forzado que son necesarios para forzar el apagado de tiristores convencionales.

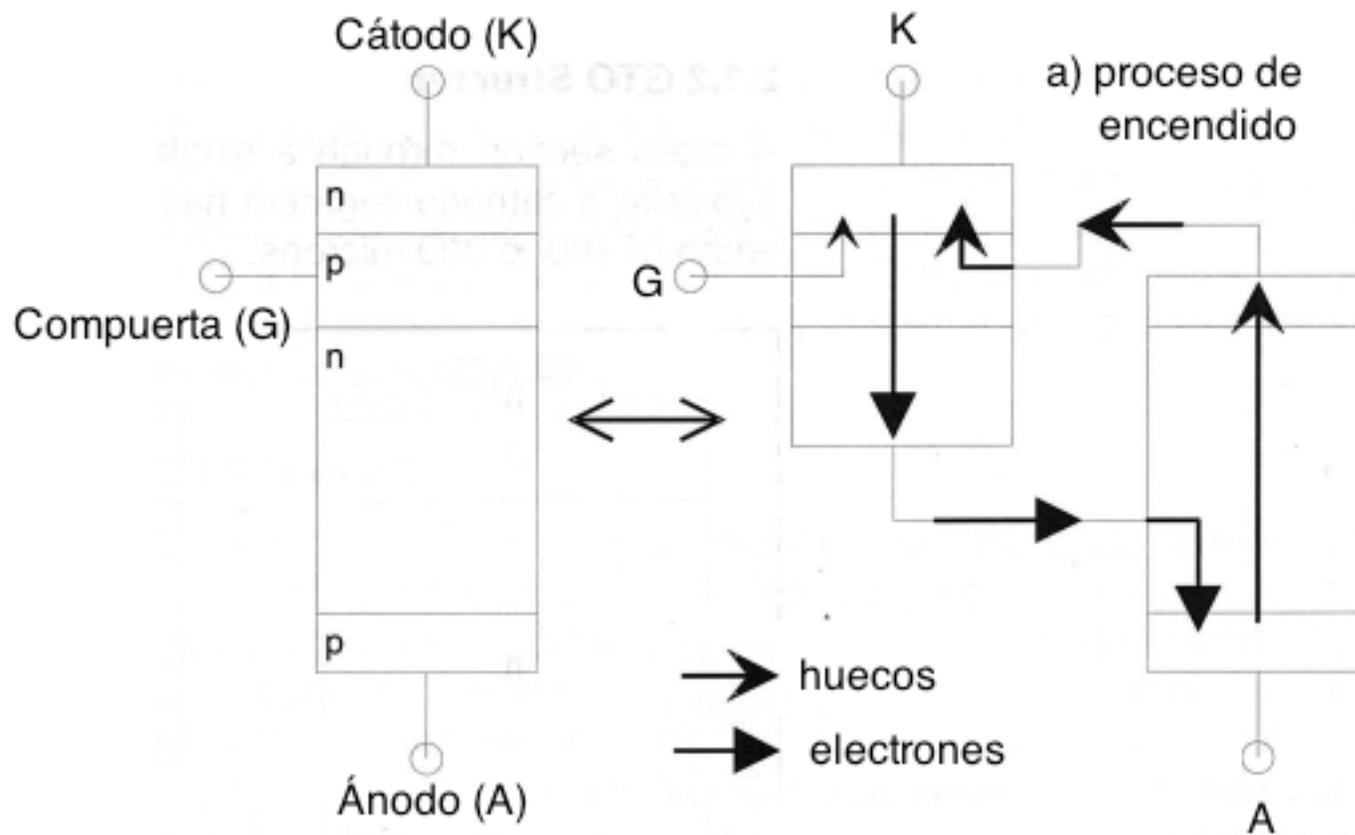
Los GTOs son dispositivos bipolares comandados por corriente que requieren de una corriente de apagado significativamente alta, ya que la ganancia de apagado (relación entre la corriente AK controlable y la magnitud del pulso de apagado), en la mayoría de los casos, está en el orden de 4 a 10.

La necesidad de extraer cantidades significativas de corriente de compuerta durante el apagado determina otra característica común a todos los GTOs, la estructura de compuerta es altamente inter-digitada: un GTO de 3000A puede llegar a tener 3000 segmentos de compuerta.

El comportamiento básico en encendido y apagado se explica completamente en base al modelo de los dos transistores.



El modelo de los dos transistores: esquema de la estructura semiconductor (izquierda), corte imaginario (centro), circuito equivalente (derecha).



Esquema del movimiento de los portadores en el tiristor GTO durante el proceso de encendido.

Del modelo de los dos transistores resulta que la corriente de ánodo del tiristor GTO es:

$$I_A = \frac{I_{co1} + I_{co2}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} = \frac{I_{fuga}}{1 - G}$$

Donde I_{fuga} es la corriente que circula cuando el dispositivo está en bloqueo directo y G es la ganancia de lazo del circuito equivalente.

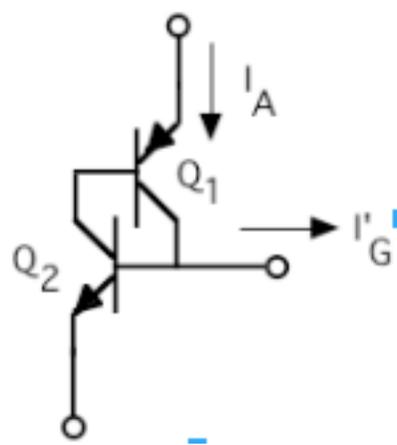
El proceso de encendido es idéntico al de los tiristores convencionales, y requiere que la ganancia de lazo G tienda a la unidad, lo que puede ocurrir por exceso de tensión AK , por exceso de temperatura de juntura, por exceso de dV_{AK}/dt (formas accidentales de disparo), o por inyección de corriente por la compuerta, que es la forma de disparo controlado.

Apagado por compuerta.

El proceso de apagado por compuerta se inicia cuando se empieza a extraer corriente por el terminal de compuerta, iniciando el proceso de reducción de la corriente de base del transistor NPN equivalente.

Para caracterizar la operación del GTO se introduce el concepto de ganancia de corriente de apagado, β_{off} , que se define como la relación entre el valor máximo de la corriente AK que se puede conmutar en apagado, I_{AKM} y el valor de la corriente de compuerta que se debe extraer para lograr forzar el apagado por compuerta:

$$\beta_{off} = \frac{I_{AKM}}{I_{KG}}$$



Circuito equivalente de dos transistores al comienzo del proceso de apagado por compuerta.

Mientras el tiristor está en conducción se cumple que:

$$I_{B2} = I_{EC1} + I_G = \alpha_1 I_A + I_G$$

Dado que $\alpha_1 I_A \gg I_G$, la corriente de compuerta es básicamente redundante una vez que la corriente en el tiristor alcanza el valor de la corriente de enganche, I_L .

Para iniciar el proceso de apagado controlado por compuerta, se debería empezar a extraer una corriente de compuerta, I'_G , con lo que la ecuación de la corriente de base del transistor 2 pasa a ser:

$$I_{B2} = \alpha_1 I_A - I'_G$$

Y la corriente de colector del transistor 2 es:

$$I_{C2} = (1 - \alpha_1) I_A$$

En conducción el transistor 2 está profundamente saturado; para forzar el apagado es preciso que salga de saturación, esto es, que se cumpla:

$$I_{B2} < \frac{I_{C2}}{\beta_2}$$

Remplazando:

$$\alpha_1 I_A - I'_G < \frac{(1 - \alpha_1) I_A}{\beta_2} = \frac{(1 - \alpha_1)(1 - \alpha_2) I_A}{\alpha_2}$$

Para forzar el apagado, se requiere que I'_G cumpla con:

$$I'_G > \frac{I_A}{\beta_{off}}$$

Luego:

$$\beta_{off} = \frac{\alpha_2}{1 - \alpha_1 - \alpha_2}$$

En el peor caso, que en teoría describe a los tiristores convencionales, la ganancia de apagado tiende a 1, esto es, para apagar el dispositivo sería necesario extraer la mayor parte de la corriente de ánodo por el terminal de compuerta, cosa que, por supuesto, resulta físicamente imposible dada la estructura del dispositivo.

Por supuesto en un GTO funcional la ganancia de apagado debe ser mayor que 1 e, idealmente, lo mas grande posible, pero en general la ganancia de apagado de los GTOs presentes en el mercado es relativamente baja, del orden de entre 4 y 10, lo cual da idea de la gran asimetría que existe entre el proceso de encendido donde las ganancia puede ser del orden de los miles, y el de apagado.

Este desequilibrio se debe a que para optimizar el comportamiento del GTO en conducción y en apagado hay que alcanzar un compromiso entre tendencias opuestas.

De la fórmula resulta que, para aumentar la ganancia de apagado β_{off} , se requiere:

$$\alpha_2 \approx 1 \quad \text{y} \quad \alpha_1 \ll 1$$

1.- Para hacer $\alpha_2 \approx 1$ se requiere:

a.- Base de Q_2 estrecha.

b.- Alto dopado en la región E_2 , lo que reduce la tensión de bloqueo de la juntura NP inferior al rango de 20 a 24V, lo que hace que la tensión de bloque del GTO sea básicamente la de la juntura NP superior.

2.- Para hacer $\alpha_1 \ll 1$ es preciso:

a.- Incrementar el ancho de la base de Q_1 , lo que tiene además el efecto benéfico de aumentar la tensión de bloqueo directa, pero tiene el grave efecto adverso de aumentar las pérdidas en conducción.

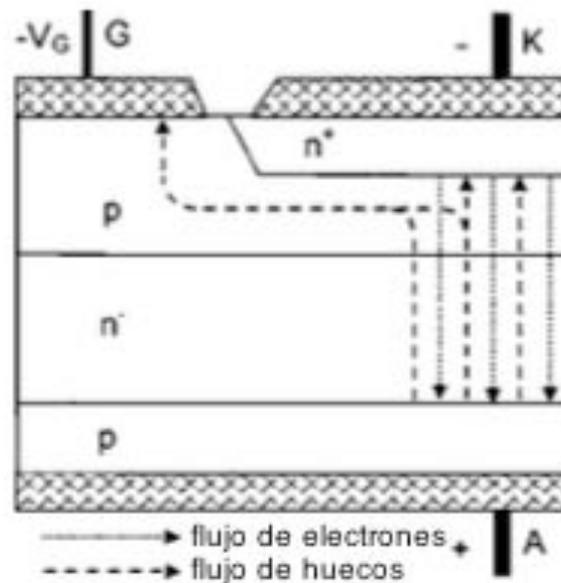
b.- Dopado bajo en la base de Q_1 ; pero esto también aumenta las pérdidas en conducción.

Por lo tanto no ha sido posible diseñar un GTO que simultáneamente tenga una alta ganancia de apagado y bajas pérdidas en conducción.

Como los GTOs dominan en el nicho de mercado de las potencias muy elevadas (miles de voltios y amperios), se prefiere maximizar la capacidad de manejo de corriente,

diseñando el dispositivo para minimizar las pérdidas en conducción, y aceptando una ganancia de apagado baja.

Al hacer esto el proceso de apagado es asimétrico, la inyección de portadores desde la región de cátodo se reduce mas rápidamente, pero la inyección desde el ánodo se reduce mas lentamente, y sigue circulando corriente del ánodo al terminal de compuerta.



Flujo de portadores durante el apagado, estructura básica del GTO

La cola de corriente se puede acortar:

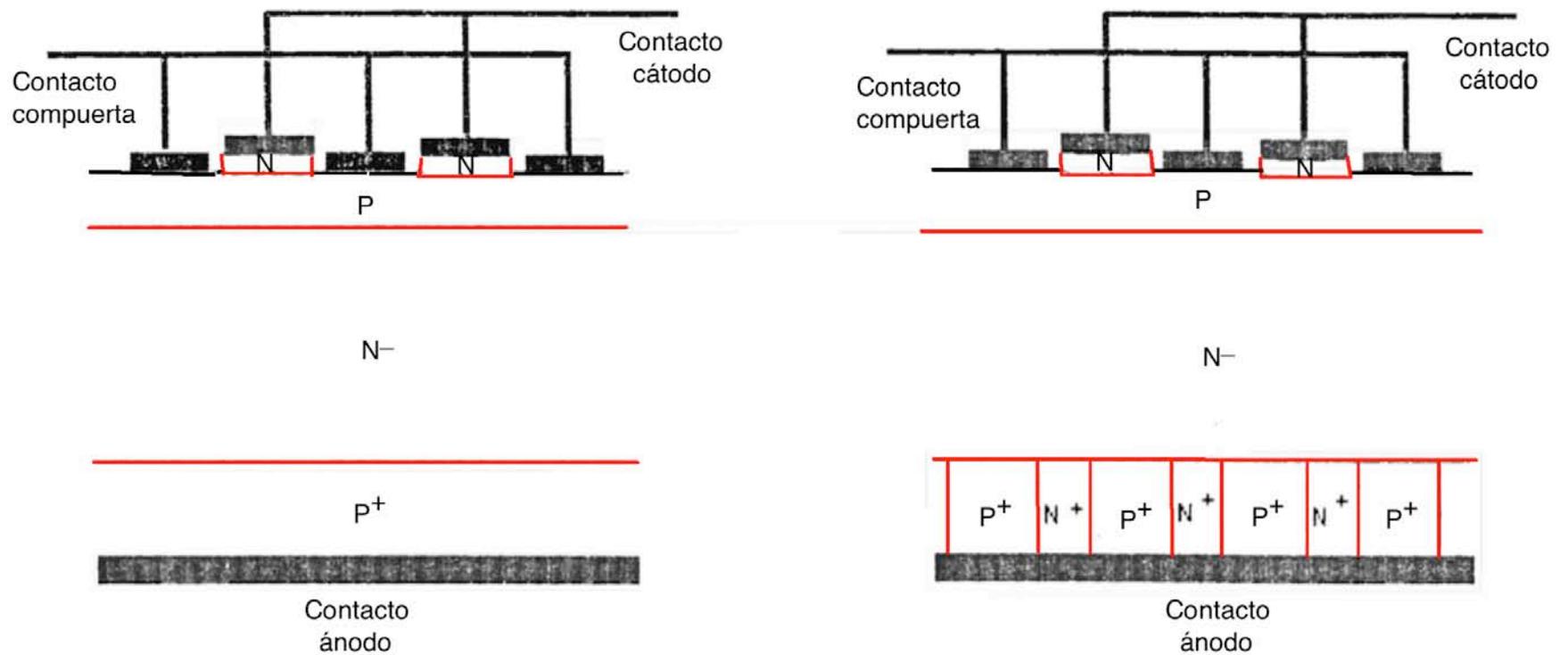
1.- Introduciendo un número significativo de átomos dopantes que sirvan como centros de re-combinación (usualmente átomos de oro).

El problema asociado con esta opción es que aumenta la caída en conducción lo que, en igualdad de condiciones, reduce la corriente máxima que puede llevar el GTO en comparación con la máxima posible en un tiristor convencional que tenga la misma área efectiva de conducción de corriente.

2.- Introduciendo una estructura de "cortos de ánodo", esto es, una serie de inclusiones N^+ en la zona P^+ que está en contacto con el terminal de ánodo.

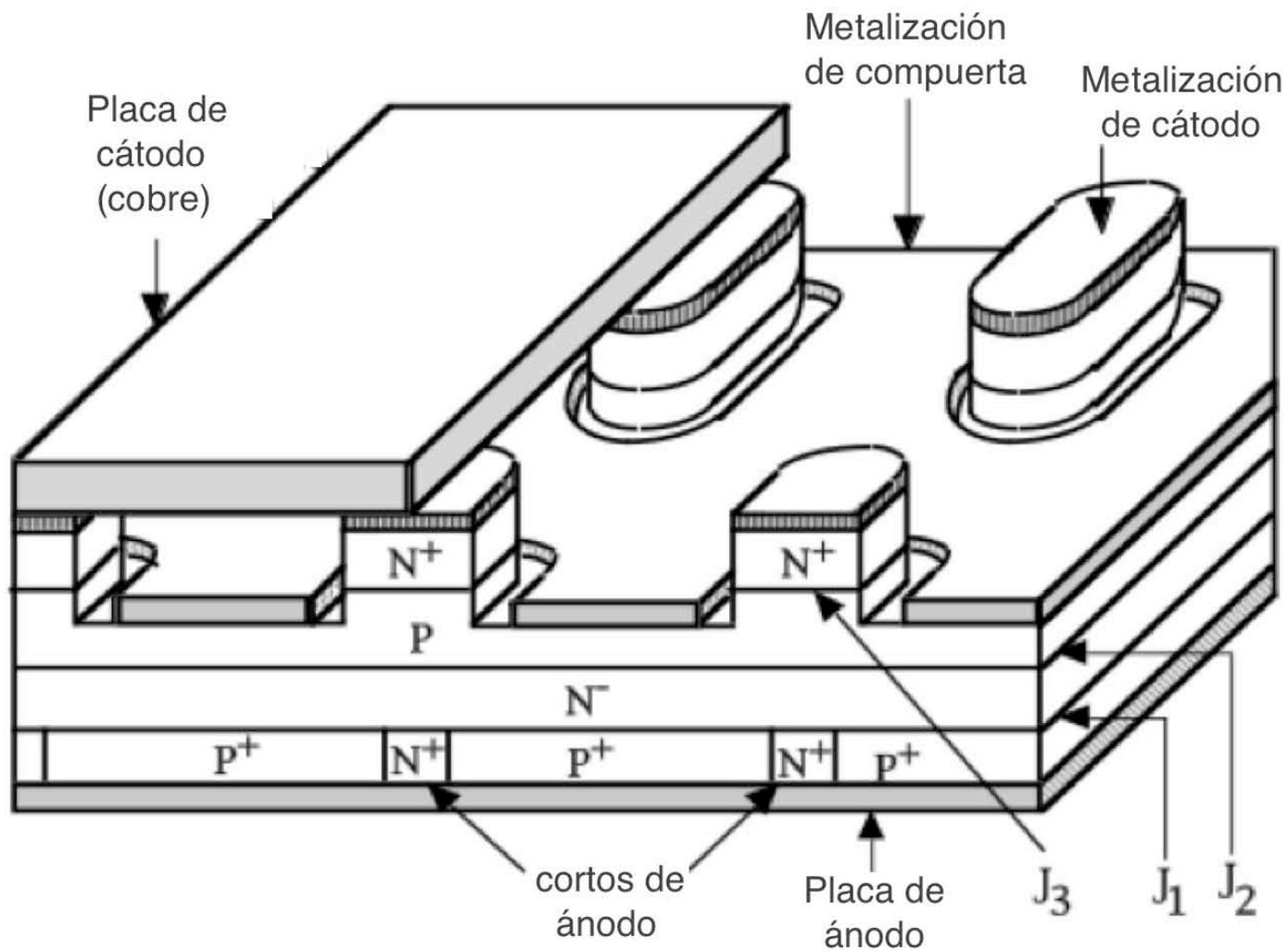
El problema asociado con esta opción es que reduce significativamente la capacidad de bloqueo inverso del dispositivo, en comparación con la capacidad de bloqueo que tendría un tiristor convencional con las mismas dimensiones; el resultado es un GTO "asimétrico".

En la práctica la reducción de la tensión de bloqueo es de menor (o nula) importancia, ya que la mayoría de las aplicaciones de los GTOs son en convertidores DC/DC o DC/AC en las cuales la tensión aplicada es esencialmente siempre unipolar y, además, la topología del circuito requiere que cada GTO tenga conectado un diodo de libre conducción en anti-paralelo.



Corte esquemático de los dos tipos básicos de GTOs.
 Izquierda: Con dopado de oro
 Derecha: Con cortocircuitos de ánodo.

En cualquiera de las dos opciones, el valor de la ganancia de apagado que se puede lograr es moderado, usualmente no mayor de 10; dado que los GTOs son esencialmente dispositivos de alta corriente, eso significa que la magnitud del pulso de corriente de apagado es importante, lo que implica que el área ocupada por el contacto de compuerta es necesariamente significativa, comparable con el área de la conexión de cátodo, lo que introduce un factor adicional de reducción en la capacidad de conducir corriente del GTO en comparación con un tiristor convencional construido con una oblea de la misma superficie.



Vista de la configuración tridimensional de un GTO con cortocircuitos de ánodo

La inter-digitación de cátodo y compuerta no solo reduce la capacidad de conducir corriente AK del dispositivo, sino que obliga a que las metalizaciones de cátodo y compuerta tengan que hacerse a dos niveles distintos, con la metalización de compuerta en forma de una capa con perforaciones por donde pasan una serie de "pilones" de cátodo que sobresalen del nivel donde se realiza la metalización de compuerta cuyo tope se metaliza y sobre los cuales se apoya una placa de cobre para minimizar la resistencia del contacto de cátodo.

Aunque la figura muestra específicamente la estructura de un GTO con cortos de ánodo, el arreglo tridimensional de los contactos de compuerta y cátodo también se emplea en los GTOs con dopado de metales pesados que no tienen cortos de ánodo.

La estructura de ambos tipos de GTOs se diferencia de la de los tiristores convencionales en los siguientes puntos:

- Estructura altamente inter-digitada en la zonas de compuerta-cátodo para lograr la conmutación más rápida posible.
- Islas de cátodo para simplificar la conexión con el exterior.

En general, con la excepción de las relacionadas con el apagado por compuerta, las características del GTO con dopado de metales pesados son similares a las de un tiristor convencional simétrico, aunque en general las pérdidas en conducción en los GTOs son más elevadas que en los SCRs para un mismo nivel de corriente y tamaño del cristal semiconductor.

Los cortos de ánodo son otro elemento de diferencia estructural entre los GTOs con cortos de ánodo y los tiristores convencionales; sin embargo, con la excepción de las relacionadas con el apagado por compuerta, las características del GTO con cortos de ánodo son similares a las de un tiristor convencional asimétrico, incluyendo la escasa capacidad de soportar tensiones inversas.

Específicamente se cumplen las definiciones de las tensiones de bloqueo, de los valores de corriente de enganche y de sostenimiento, de la relación entre las características del dispositivo y la temperatura y todo lo relacionado con el proceso de encendido.

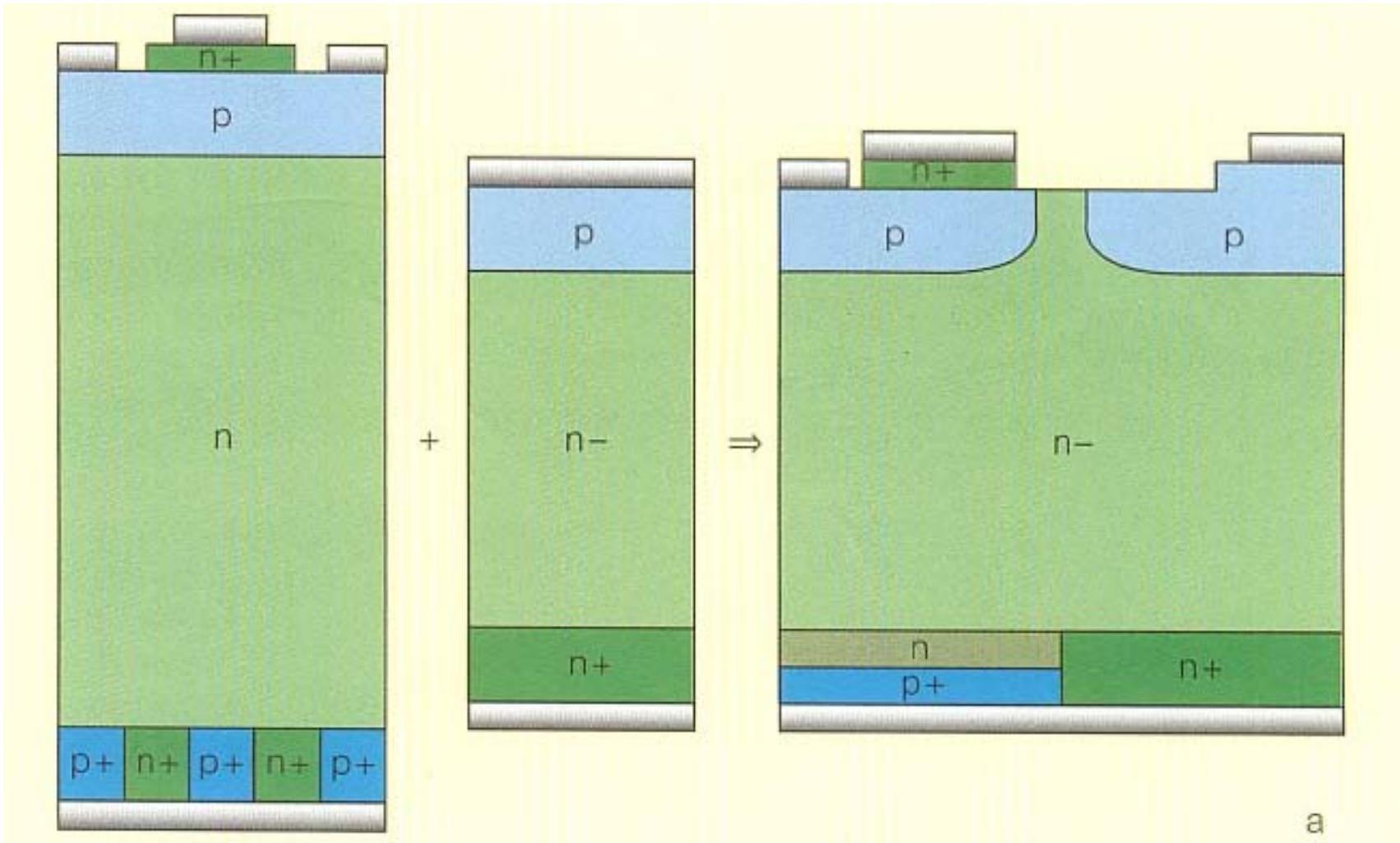
La familia de los GTO está formada por los siguientes tipos:

1.- GTO simétrico: Las tensiones de bloqueo directo e inverso son iguales; son dispositivos optimizados para operar en aplicaciones de conversión AC/AC a frecuencia de línea, donde el tiempo de conmutación de apagado no es un parámetro fundamental. Los GTO simétricos son GTOs con dopado de metales pesados en el área de ánodo.

2.- GTO asimétrico: La tensión de bloqueo inverso es significativamente menor que la tensión de bloqueo directo; son dispositivos optimizados para operar en aplicaciones de conversión DC/DC o DC/AC en las cuales el valor de la tensión inversa es irrelevante ya que cada

conmutador controlado tiene asociado un diodo de libre conducción, pero el tiempo de conmutación de apagado es un parámetro importante ya que limita la frecuencia de conmutación. Los GTOs asimétricos son GTO con cortos de ánodo.

3.- GTO de conducción inversa (RC-GTO): La estructura básico de un GTO con cortos de ánodo se modifica incluyendo en el cristal una zona configurada como un diodo conectado en anti-paralelo. Optimizados para operar en aplicaciones de conversión DC/DC o DC/AC, no requieren de un diodo de libre conducción individual, lo que simplifica el ensamblaje del circuito de potencia, pero introducen un elemento adicional de reducción en la capacidad de conducir corriente.

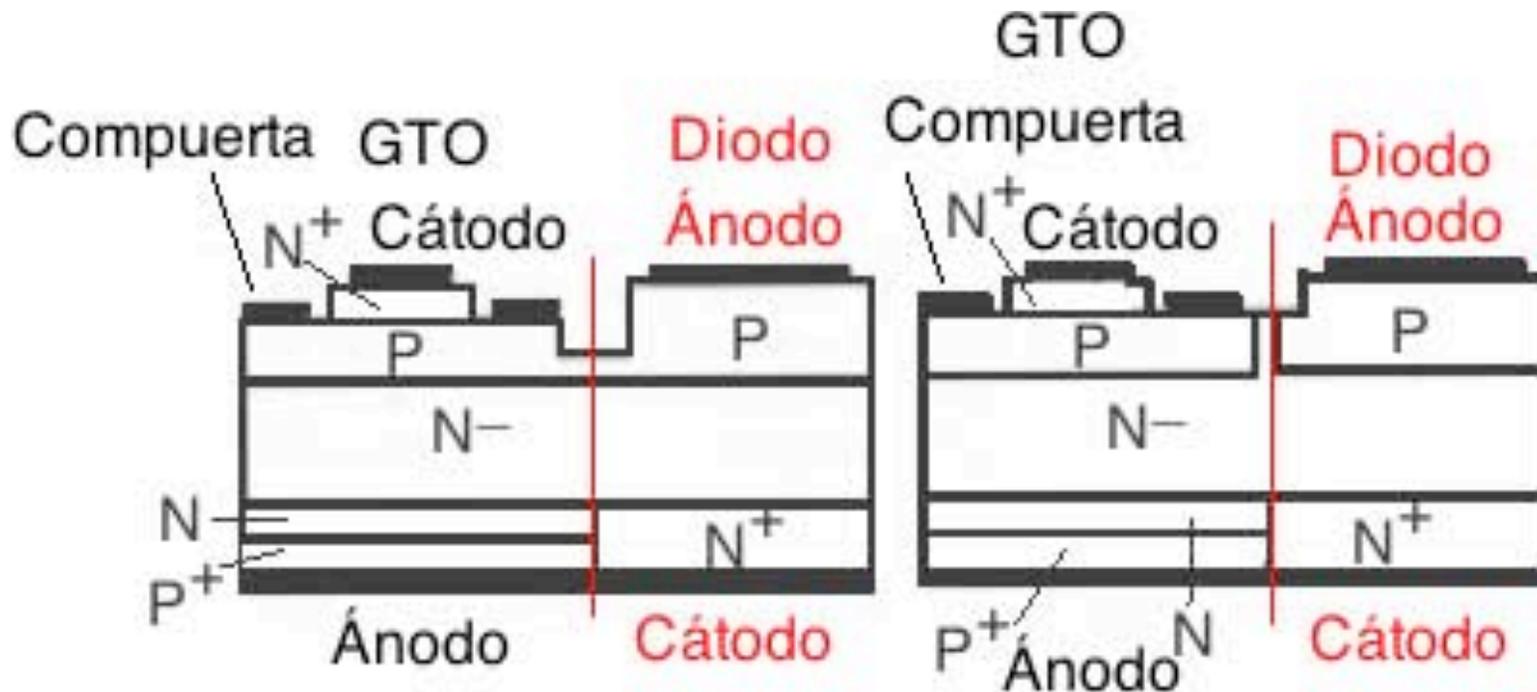


Estructura del RC-GTO, resultado de combinar un GTO con un diodo en inverso.

El diodo incluido en la estructura del GTO comparte con este una juntura, por lo que es preciso evitar que la corriente de compuerta fluya de la base P del transistor NPN equivalente al ánodo del diodo.

Esto se puede lograr con dos configuraciones distintas del cristal semiconductor:

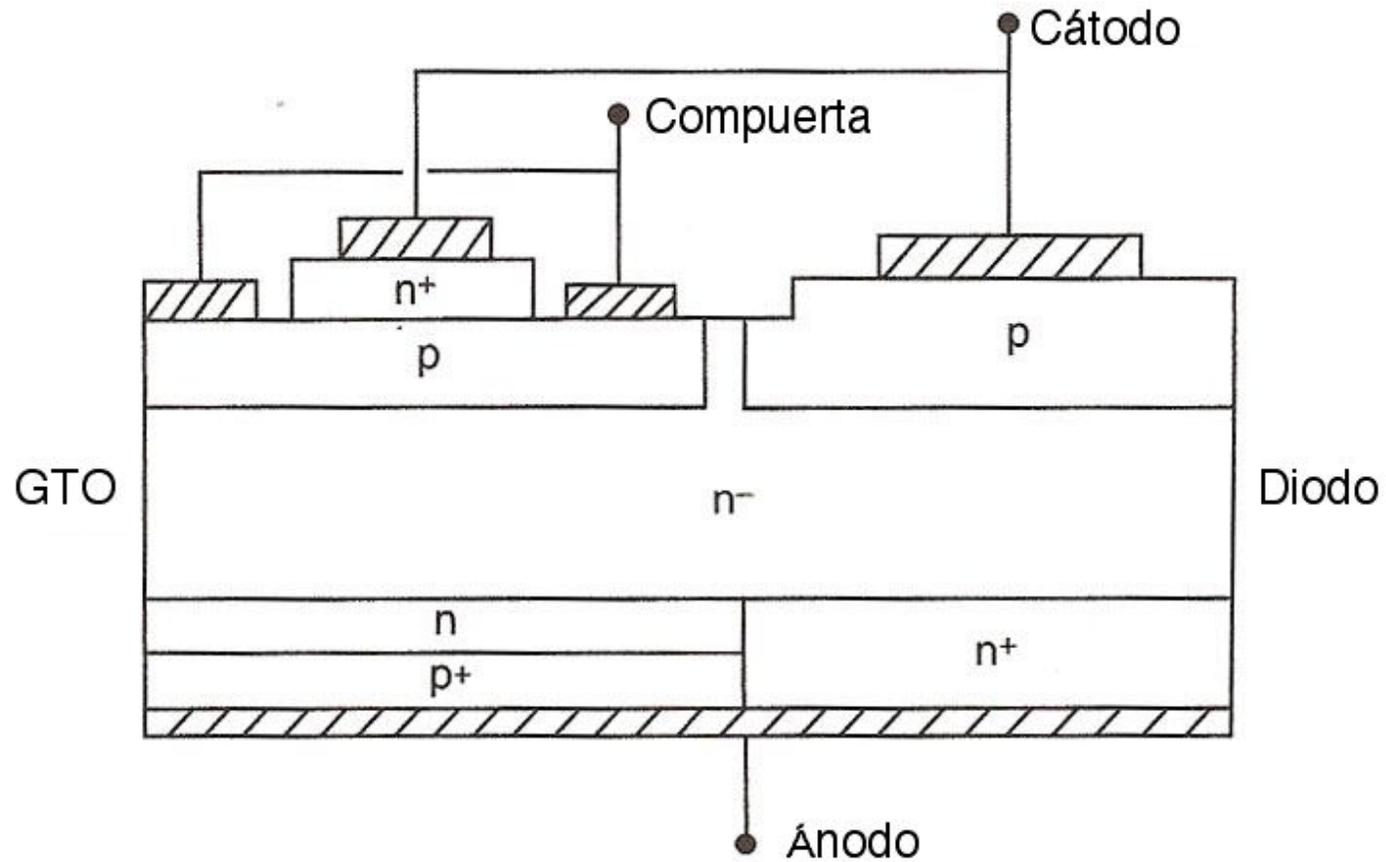
- a.- Con separación por trinchera
- b.- Con separación con juntura



RC-GTO: separación por trinchera (izquierda); por juntura (derecha).

La separación por juntura tiene la ventaja de que el flujo de corriente de la compuerta al ánodo es bloqueado por la juntura inversa NP, que tiene un efecto superior de atenuación que la simple caída óhmica producida por el área de paso restringido creada por la trinchera.

4.- Tiristores conmutados por compuerta Integrada, IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor): Son dispositivos híbridos de muy alta potencia, introducidos en el mercado por la compañía ABB, formados por un GTO de conducción inversa y un circuito de manejo de compuerta altamente optimizado para operar el RC-GTO asociado; tanto el RC-GTO como el circuito de manejo de compuerta están montados sobre un circuito impreso de alta potencia.



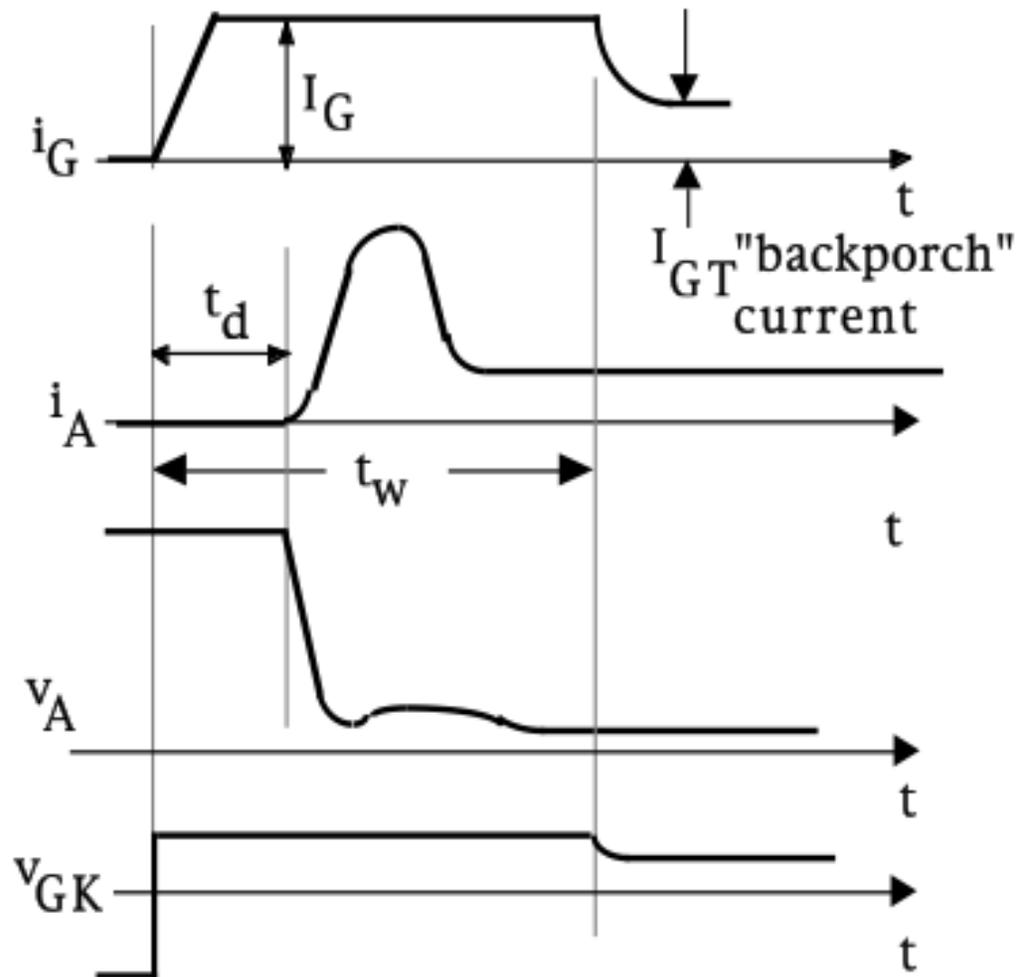
Corte del RC-GTO, componente de potencia del IGCT



IGCT: RC-GTO a la izquierda, circuito de manejo de compuerta a la derecha. La flecha señala el conjunto de MOSFETs que manejan el pulso de corriente de apagado; inmediatamente a continuación está el arreglo de condensadores del circuito de apagado.

El objetivo del IGCT es liberar al usuario de los problemas asociados al diseño de una fuente de disparo de alta corriente de apagado, y aprovechar las ventajas de diseño que ofrece la íntima asociación del circuito de disparo con el RC-GTO, tanto por su cercanía física como porque ambos han sido optimizados en conjunto en todas las etapas de diseño y fabricación.

Características de encendido del GTO.



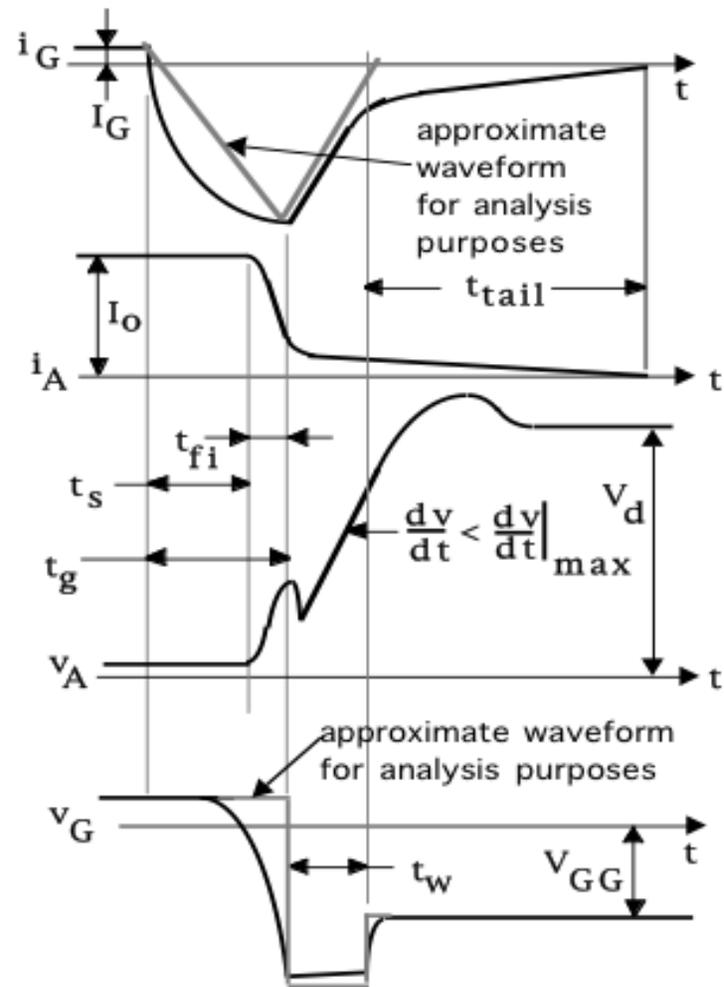
Curvas típicas de encendido del GTO.

I_G : valor pico de la corriente de encendido necesario para máxima velocidad de respuesta.

I_{GT} : corriente de sostenimiento. Debe mantenerse durante todo el intervalo de conducción del GTO.

t_d : tiempo de retardo (delay time). Durante este tiempo se acumulan portadores en la base hasta alcanzar el nivel necesario para iniciar la avalancha de encendido.

t_w : duración del pulso de encendido.



GTO características de apagado.

I_o : Corriente AK inicial, igual a la corriente de carga.

I_{GT} : corriente de compuerta de sostenimiento

t_s : tiempo de almacenamiento (storage time).

Tiempo requerido para extraer portadores y llevar las junturas a la condición donde empieza a romperse la avalancha de conducción.

t_{fi} : inicio del intervalo de apagado. La corriente de ánodo cae rápidamente mientras la corriente de carga se transfiere al condensador auxiliar de apagado. El voltaje ánodo-cátodo sube rápidamente debido a la inductancia parásita e el circuito auxiliar de apagado.

t_w : la juntura de compuerta entra en avalancha inversa. La corriente de base inversa sigue retirando portadores en exceso. Al reducirse la corriente de base se reduce la velocidad de caída de la corriente de ánodo.

t_{tail} : la juntura de compuerta bloquea, los portadores atrapados se reducen por recombinación y la corriente de ánodo cae lentamente hasta cero. El circuito de ayuda a la conmutación de apagado controla la velocidad de subida (dv_{ak}/dt) de la tensión de ánodo para asegurar que el GTO no se re-dispara. La mayor parte de las pérdidas de apagado ocurren en este intervalo.

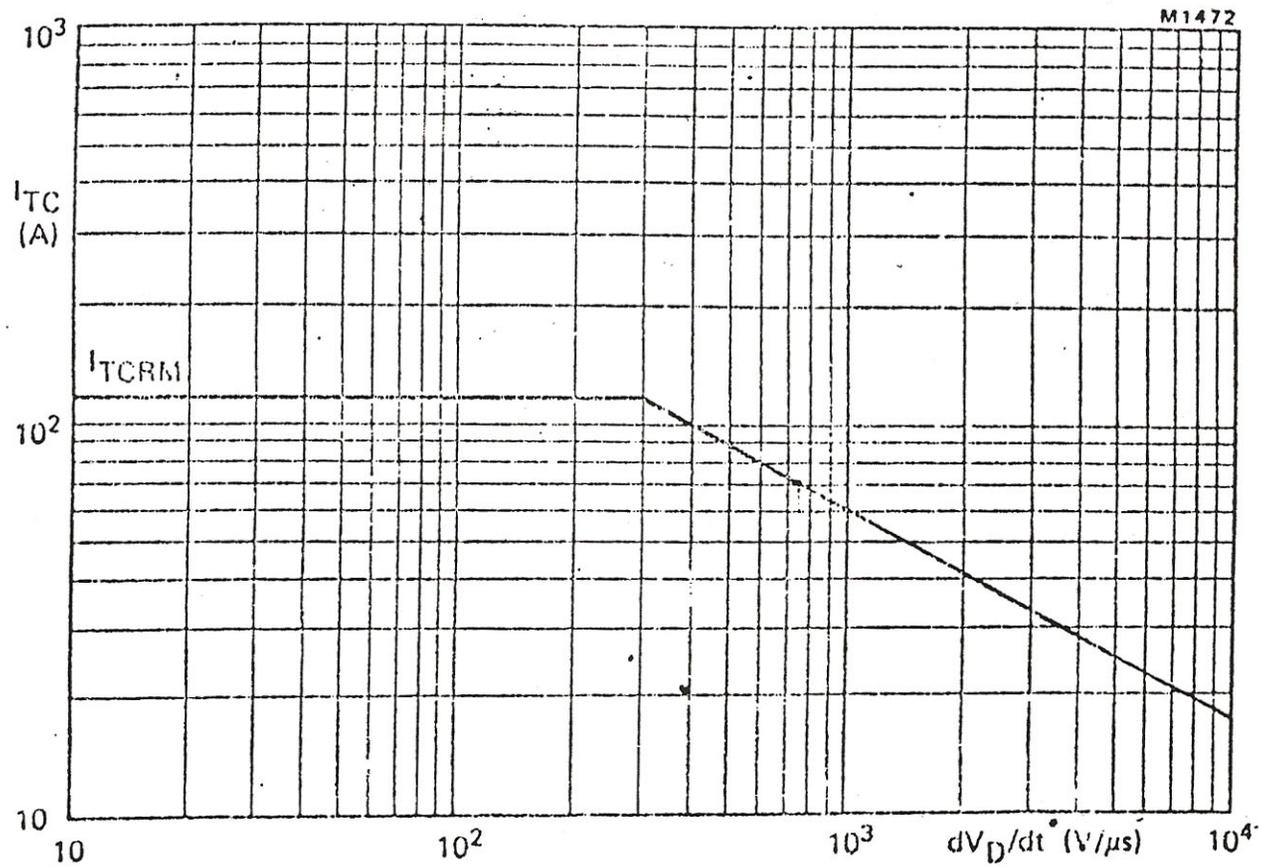
Las especificaciones de voltaje y corriente generales (valores repetitivos y no repetitivos) tienen las mismas definiciones que en el caso de los tiristores asimétricos.

Limitación del $\frac{dV_{AK}(t)}{dt}$ reaplicado en un GTO en función de la corriente AK conmutada, I_{TC}

En general el máximo $\frac{dV_{AKM}(t)}{dt}$ que puede ser reaplicado en sentido directo sobre un GTO que se ha conmutado en apagado por medio de la compuerta mientras la tensión AK sigue siendo positiva esta inversamente relacionado con la cantidad de corriente AK que fue interrumpida en la conmutación de apagado.

Si el $\frac{dV_{AK}(t)}{dt}$ reaplicado supera el valor máximo especificado por el fabricante para la corriente conmutada, I_{TC} , el GTO vuelve a entrar en conducción, lo que en general puede ocasionar que se produzca una falla catastrófica por corto circuito en el equipo.

La figura muestra una curva típica de relación corriente AK conmutada vs. $\frac{dV_{AK}(t)}{dt}$ máximo permisible



Corriente conmutable de ánodo, I_{TC} , vs. dV/dt reaplicado permisible.

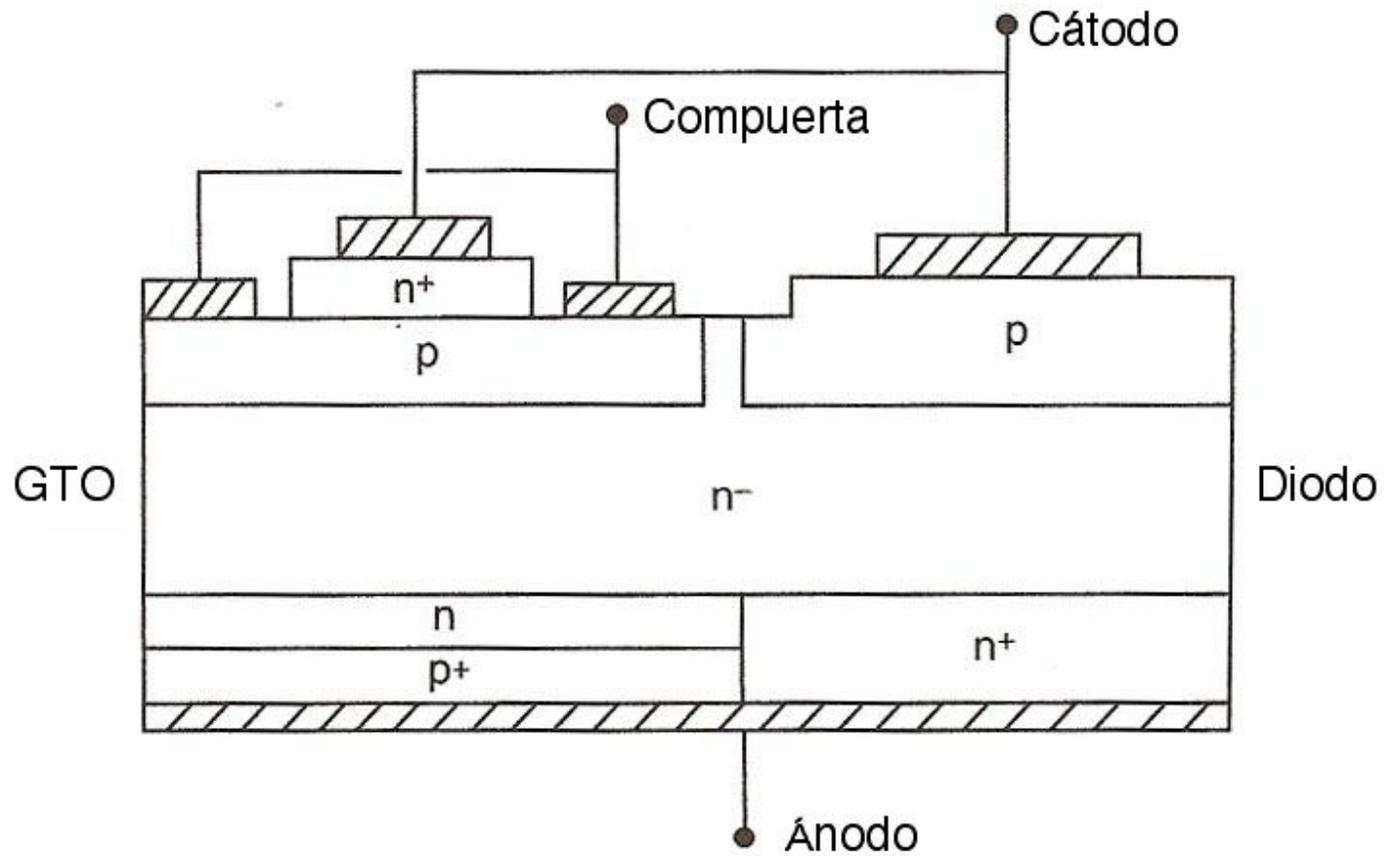
Esta limitación hace que el uso de circuitos de ayuda a la conmutación de apagado sea casi obligatorio cuando se trabaja con GTOs.

Adicionalmente, dado que el valor de los condensadores auxiliares requeridos son significativos tanto porque el factor de reducción de dV/dt requerido es elevado como porque la corriente a conmutar es muy significativa, la energía atrapada en cada conmutación es grande, lo que obliga a usar CAC de apagado recuperadores de energía para poder obtener una eficiencia razonable en el circuito.

IGCT (Integrated Gate-Commutated Thyristor)

Los IGCT son dispositivos tipo GTO introducidos al mercado por la compañía ABB.

Se diferencian de los GTO convencionales porque en la estructura del semiconductor esta integrado un diodo de conducción inversa, y porque el dispositivo semiconductor, encapsulado en un montaje tipo hockey puk, esta montado directamente en un circuito impreso en el cual se haya también los circuitos de manejo de compuerta tanto de encendido como de apagado, lo que permite optimizar la respuesta del dispositivo híbrido en conmutación.



Estructura de un IGCT.

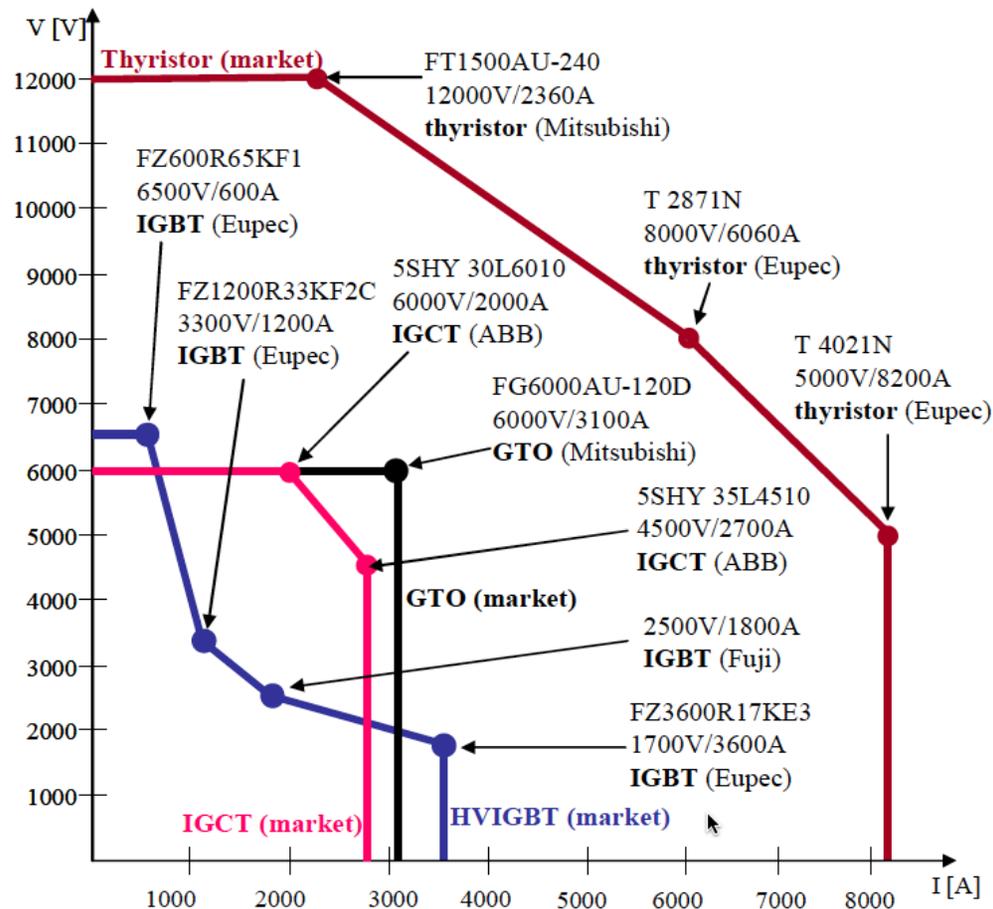


IGCT comercial, modelo 5SHY 55L4500.

Campo de aplicación.

Los GTOs y los IGCTs son los dispositivos electrónicos de control de potencia de conmutación controlada mas poderosos existentes actualmente en el mercado.

Su nicho son las aplicaciones de muy alta potencia, usualmente también a muy alta tensión, donde solo ellos son capaces de desempeñarse, y donde su baja velocidad de conmutación debe ser aceptada porque no existen sustitutos válidos.



El mercado de los dispositivos de control de potencia para aplicaciones de muy alta potencia.

Nota: Los SCR son dispositivos controlados solo en encendido.