

## TEMA 7. TIRISTORES DE APAGADO POR PUERTA

### 7.1. INTRODUCCIÓN

### 7.2. ESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO DEL GTO

### 7.3. ESPECIFICACIONES DE PUERTA EN EL GTO

### 7.4. CONMUTACIÓN DEL GTO

#### 7.4.1. Encendido del GTO

#### 7.4.2. Apagado del GTO

### 7.5. MÁXIMA CORRIENTE ANÓDICA CONTROLABLE POR CORRIENTE DE PUERTA

### 7.6. OTROS DISPOSITIVOS DE APAGADO DESDE LA PUERTA.

#### 7.6.1. Tiristor Controlado por Puerta Integrada: IGCT.

#### 7.6.2. Tiristor Controlado por Puerta MOS: MCT

### 7.7. COMPARACIÓN ENTRE LOS DISPOSITIVOS DE POTENCIA.

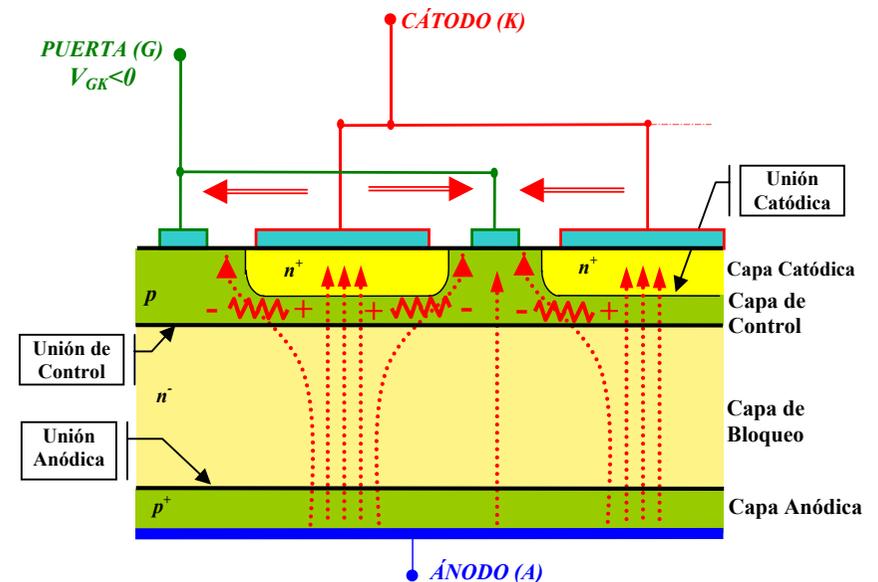
### 7.8. ULTIMAS TENDENCIAS EN LA FABRICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE POTENCIA

## INTRODUCCIÓN

El **SCR** tiene una **caída en conducción muy baja**, pero necesita que el circuito de **potencia anule su corriente anódica**.  $\Rightarrow$  Esto ha reducido su empleo a circuitos de alterna (bloqueo natural con una conmutación por ciclo).

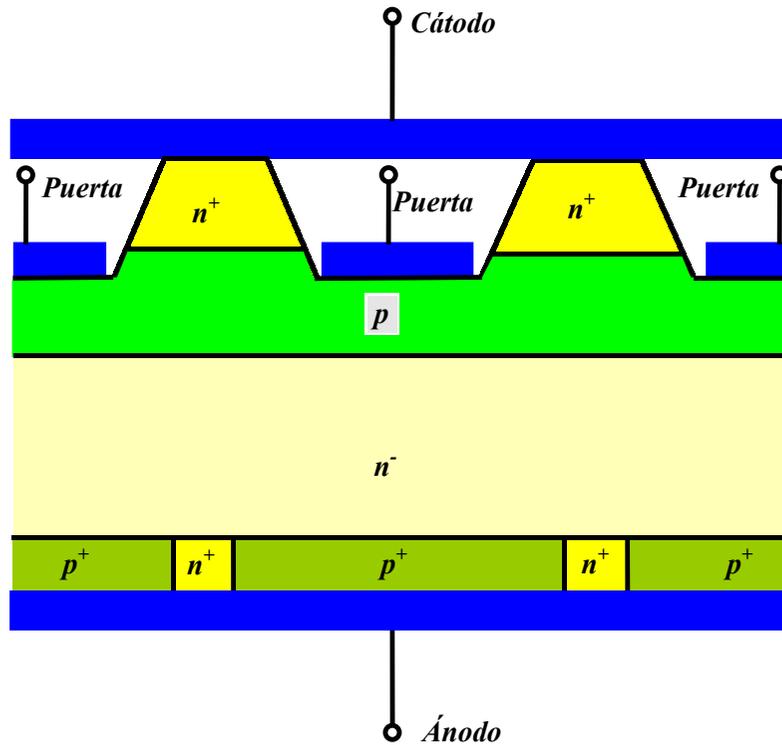
Desde los primeros años del **SCR** los fabricantes han intentado conseguir que los **SCR** pudiesen cortarse desde la puerta  $\Rightarrow$  A principios de los años 80 aparecen los primeros **GTOs**.

Porqué no puede cortarse un **SCR** desde puerta?



Al aplicar una tensión negativa en la puerta ( $V_{GK} < 0$ ), circula una corriente saliente por la puerta. Aparece una focalización de la corriente anódo-cátodo hacia el centro de la difusión  $n^+$  catódica debido a la tensión lateral. Esta corriente polariza directamente la zona central de la unión catódica, **manteniendo al SCR en conducción**.

### ESTRUCTURA DEL GTO

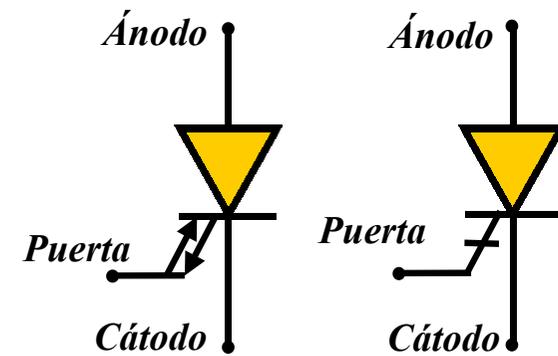
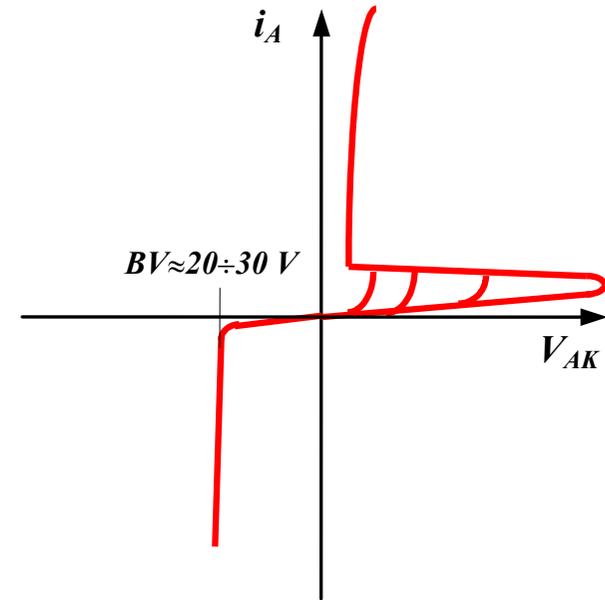


Sección de un GTO:

Las principales **diferencias con el SCR** son:

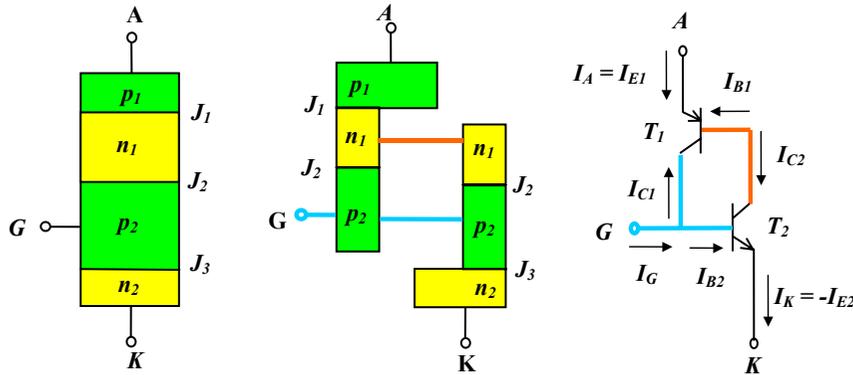
- Interconexión de capas de control (más delgada) y catódicas, minimizando distancia entre puerta y centro de regiones catódicas y aumentando el perímetro de las regiones de puerta.
- Ataque químico para acercar el contacto de puerta al centro de las regiones catódicas.
- Regiones  $n^+$  que cortocircuitan regiones anódicas:
  - Acelerar el apagado
  - Tensión inversa de ruptura muy baja

### CARACTERÍSTICA ESTÁTICA DEL GTO



Característica estática y símbolos de GTO's

## FUNCIONAMIENTO DEL GTO



Al **cebarlo** por corriente entrante de puerta, tenemos exactamente el mismo proceso que en el SCR normal.

Para **bloquearlo**, será necesario sacar los transistores de saturación aplicando una corriente de puerta negativa:

$$I_{B2} = \alpha_1 I_A - I_G^- ; I_{C2} = -I_{B1} = (1 - \alpha_1) I_A$$

La **no saturación** de  $T_2 \Rightarrow I_{B2} < I_{C2} / \beta_2$  donde  $\beta_2 = \alpha_2 / (1 - \alpha_2)$  sustituyendo las ecuaciones anteriores en la desigualdad obtenemos:

$$I_{B2} < \frac{I_{C2} \cdot (1 - \alpha_2)}{\alpha_2} = \frac{(1 - \alpha_1) \cdot (1 - \alpha_2)}{\alpha_2} \cdot I_A ;$$

$$I_{B2} = \alpha_1 \cdot I_A - I_G^- < \frac{(1 - \alpha_1) \cdot (1 - \alpha_2)}{\alpha_2} \cdot I_A$$

luego:  $I_G^- > \frac{I_A}{\beta_{off}}$ ,

dónde  $\beta_{off}$  es la **ganancia de corriente** en el momento del corte y vendrá expresada por:

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

## FUNCIONAMIENTO DEL GTO

Para conseguir cortar el GTO, con una corriente soportable por la puerta, debe ser  $\beta_{off} = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2 - 1}$  lo mayor posible, para ello debe ser:  $\alpha_2 \approx 1$  (lo mayor posible) y  $\alpha_1 \approx 0$  (lo menor posible).

$\Rightarrow \alpha_2 \approx 1$  implica que la base de  $T_2$  (capa de control) sea estrecha y tenga una **vida media de los huecos muy corta**. La primera condición es normal en SCR de alta tensión, la segunda no, porque ocasiona un aumento de las pérdidas en conducción. Para conseguir una buena ganancia  $\beta_{off}$  será necesario asumir unas pérdidas en conducción algo mayores.

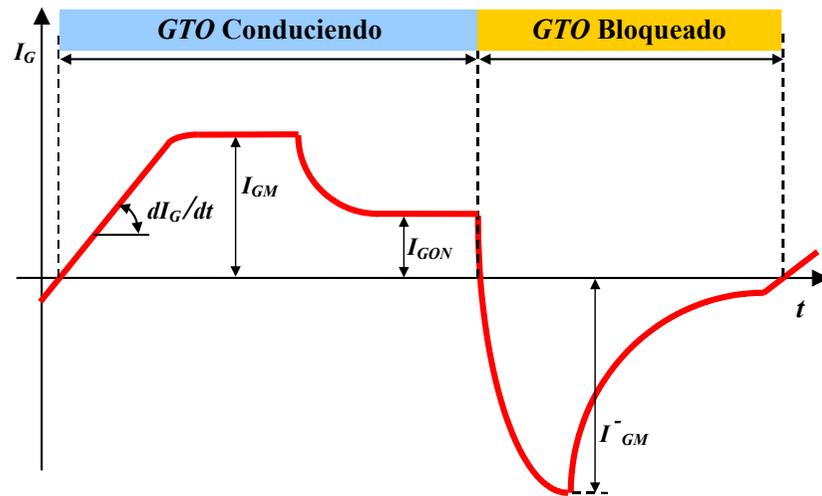
$\Rightarrow \alpha_1 \approx 0$  implica que la base de  $T_1$  (capa de bloqueo) sea ancha y tenga una **vida media de los huecos muy larga**. La primera condición es normal en SCR de alta tensión, la segunda no, porque ocasiona un aumento de las pérdidas en conducción.

Para conseguir una buena ganancia  $\beta_{off}$  será necesario asumir unas pérdidas en conducción algo mayores.

Los **cortocircuitos anódicos** evitan estas pérdidas extras, al quitar corriente de base a  $T_1$  disminuyendo su ganancia sin tener que disminuir la vida media.

Respecto a la **velocidad de corte de  $T_1$** , si la vida media de los huecos es larga, el transistor se vuelve muy lento, ya que solo pueden eliminarse por recombinación al no poder difundirse hacia las capas p circundantes por estar llenas de huecos. Los cortocircuitos anódicos aceleran la conmutación de  $T_1$  al poder extraerlos (**a costa de no soportar tensión inversa**).

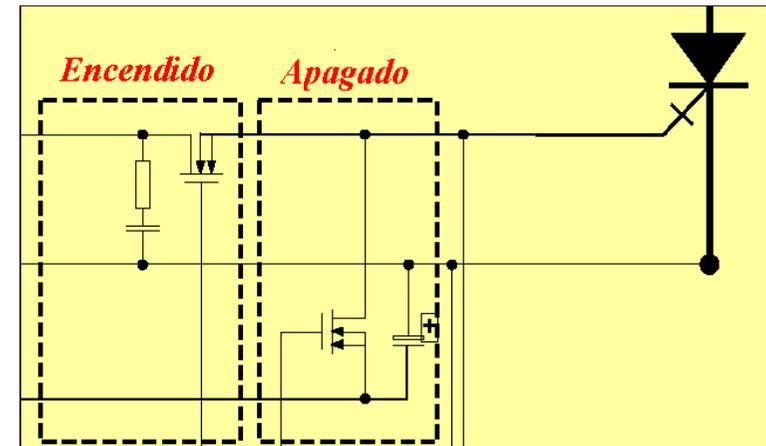
## ESPECIFICACIONES DE PUERTA DEL GTO



Formas de Onda de la Corriente de Puerta

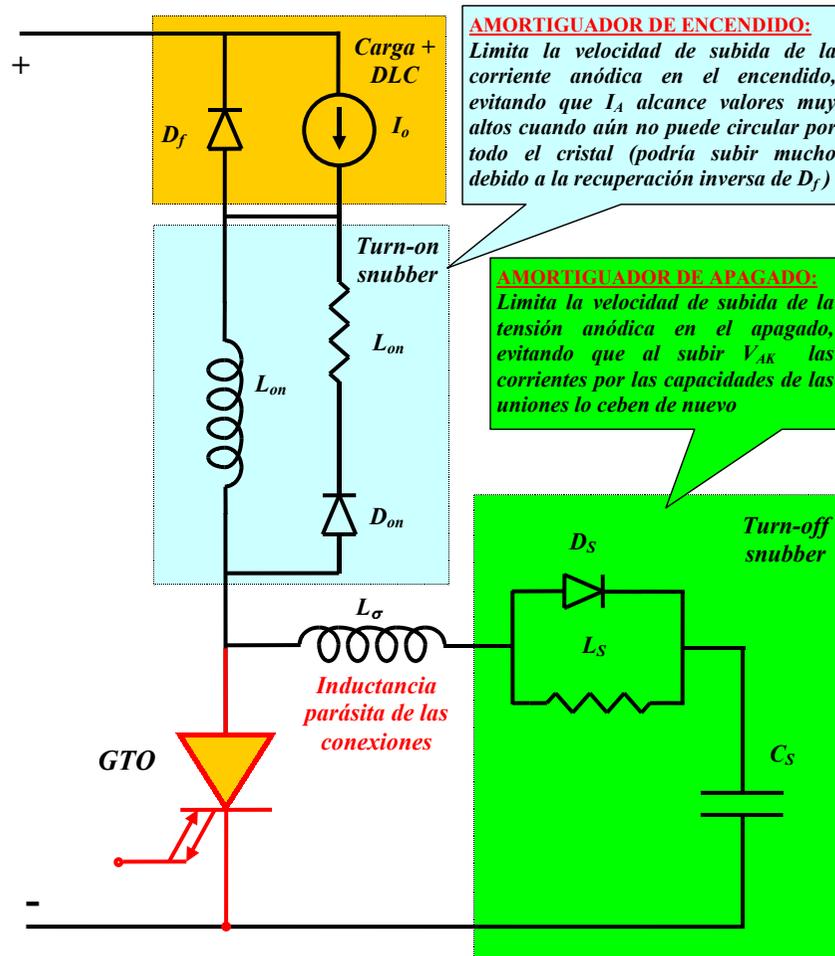
- Para entrar en conducción**, se necesita una subida rápida y valor  $I_{GM}$  suficientes para poner en conducción todo el cristal. Si sólo entra en conducción una parte y circula toda la corriente, se puede dañar. Nótese que si sólo entra en conducción una parte bajará la tensión ánodo-cátodo y el resto de celdillas que forman el cristal no podrán entrar en conducción.
- Cuando se ha establecido la conducción se deja una corriente  $I_{GON}$  de **mantenimiento** para asegurar que no se corta espontáneamente. (Tiene menos ganancia que el SCR).
- Para cortar** el GTO se aplica una corriente  $I_G^- = I_A/\beta_{off}$  muy grande, ya que  $\beta_{off}$  es del orden de 5 a 10.
- Esta corriente negativa **se extingue al cortarse** el SCR, pero debe mantenerse una tensión negativa en la puerta para evitar que pudiera entrar en conducción esporádicamente.

## CIRCUITO DE EXCITACIÓN DE PUERTA DEL GTO



Se necesita una fuente de tensión con toma media.

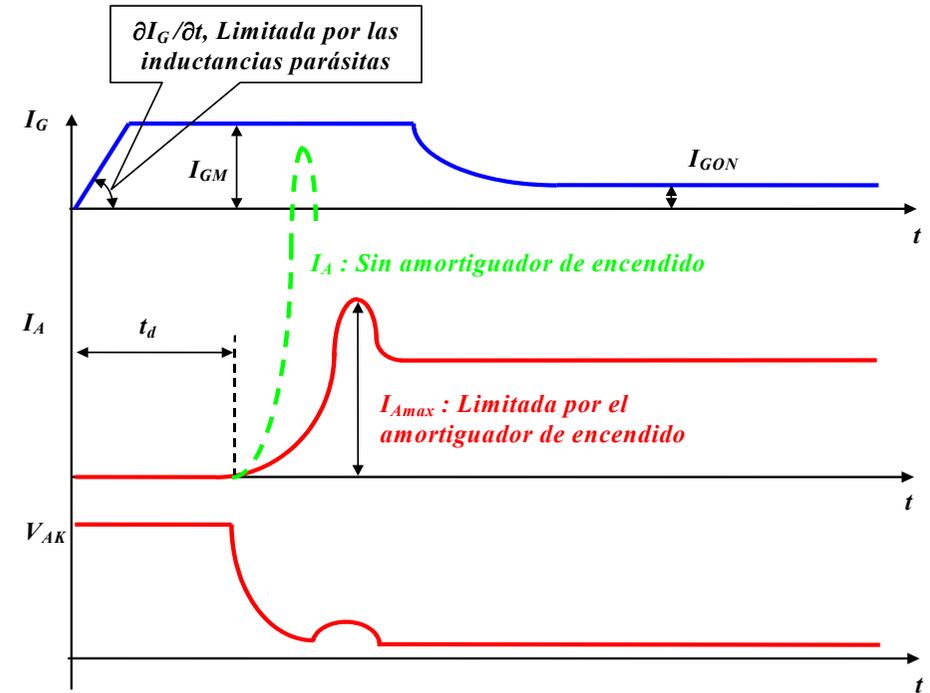
## CONMUTACIÓN DEL GTO



Circuito para el Estudio de la Conmutación del GTO:

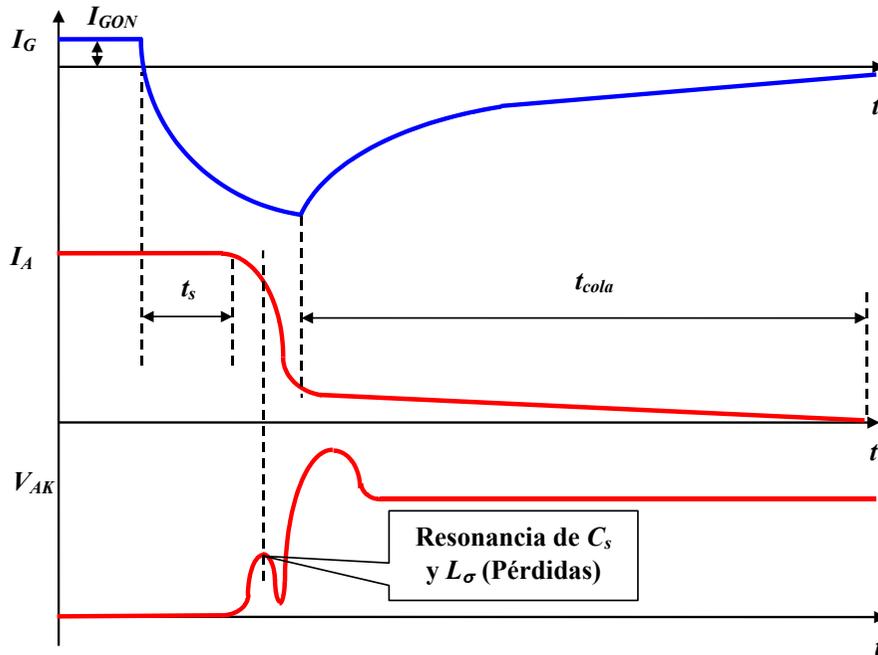
Al no poder hacerlo funcionar sin estos componentes auxiliares, vamos a estudiar la conmutación del GTO sobre este circuito completo.

## CONMUTACIÓN DEL GTO. ENCENDIDO POR CORRIENTE POSITIVA DE PUERTA



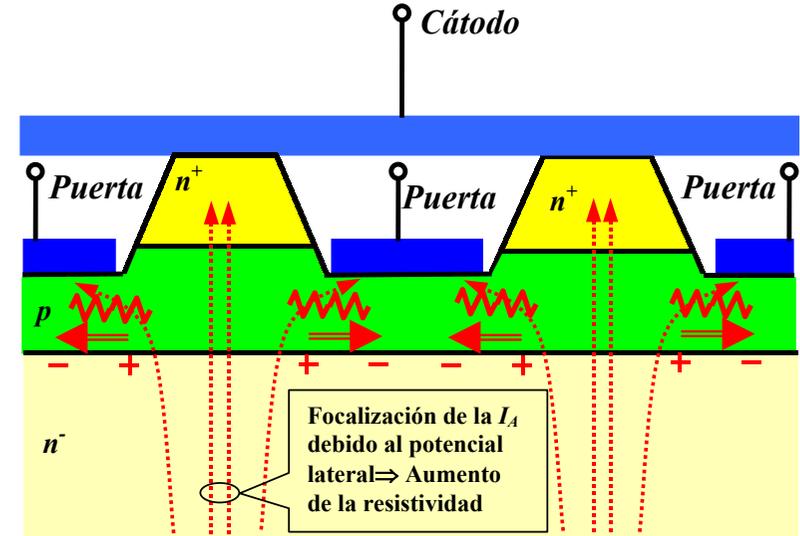
Formas de Onda en el Encendido del GTO

## CONMUTACIÓN DEL GTO. APAGADO POR CORRIENTE NEGATIVA DE PUERTA



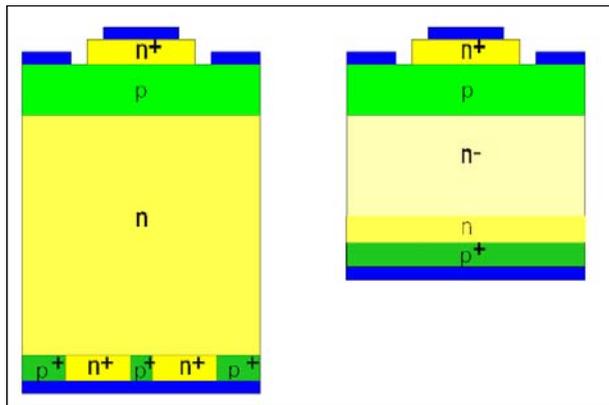
Formas de Onda en el Apagado del GTO

## MÁXIMA CORRIENTE ANÓDICA CONTROLABLE POR CORRIENTE DE PUERTA EN UN GTO

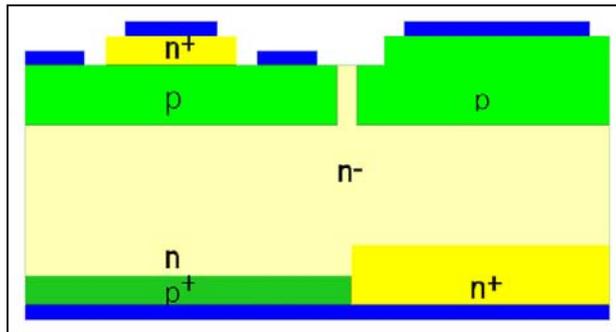


- ⇒ Al aplicar una corriente negativa por la puerta, se produce un campo lateral, que provoca que la **corriente anódica se concentre** en los puntos mas alejados de las metalizaciones de puerta.
- ⇒ Esto hace que  **aumente la resistividad** de la capa de control.
- ⇒ Para que circule la corriente  $I_G$  requerida, **se necesita más tensión**.
- ⇒ Si sube  $I_A$  se necesita aún **más tensión**  $-V_{GK}$ .
- ⇒ Se podrá subir  $-V_{GK}$  hasta la tensión de **ruptura** de la unión Puerta-Cátodo.
- ⇒ **Esta ruptura definirá la máxima corriente controlable desde la puerta**

## TIRISTOR CONTROLADO POR PUERTA INTEGRADA: IGCT

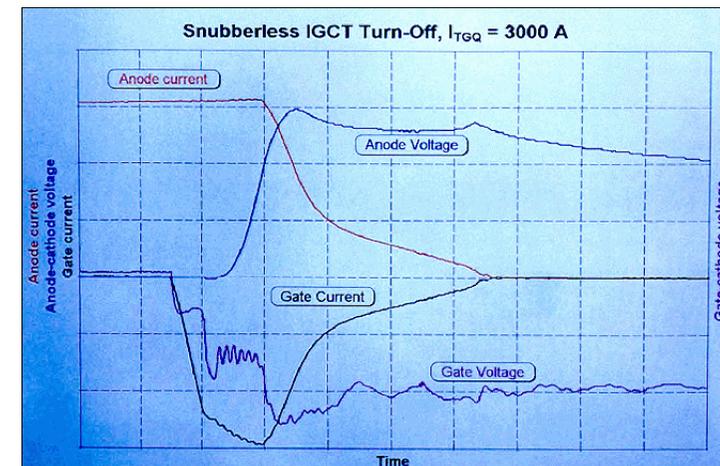
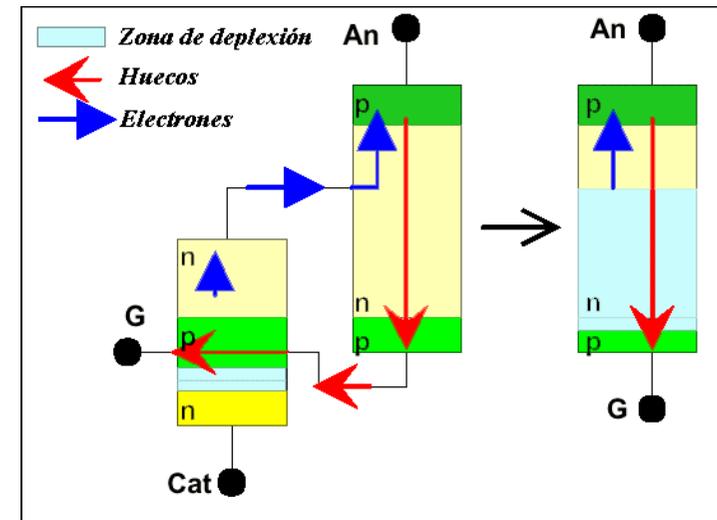


GTO y Diodo de la misma tensión de ruptura. Para integrararlos en la misma oblea, hay que hacer el diodo más ancho  $\Rightarrow$  **Más pérdidas**



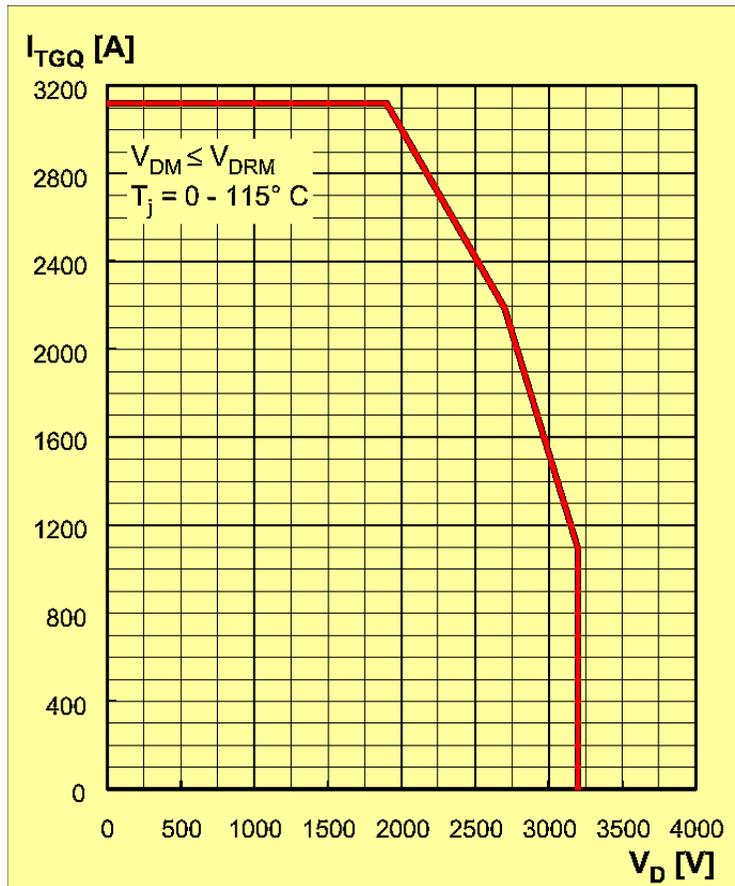
- IGCT y Diodo de la misma tensión de ruptura. **Se integran sin problemas.**
- Se suprimen los cortocircuitos anódicos, se sustituyen por una capa anódica "transparente" a los electrones (emisor del transistor pnp muy poco eficaz  $\Rightarrow \alpha_1$  muy pequeña. Esto permite hacer un dispositivo PT  $\Rightarrow$  **menores pérdidas en conducción.**
- Se mejora el diseño de la puerta (con una tensión Puerta-Cátodo de sólo 20V). Apagado muy rápido  $\Rightarrow$  **menores pérdidas en conmutación.**

## FUNCIONAMIENTO DEL IGCT



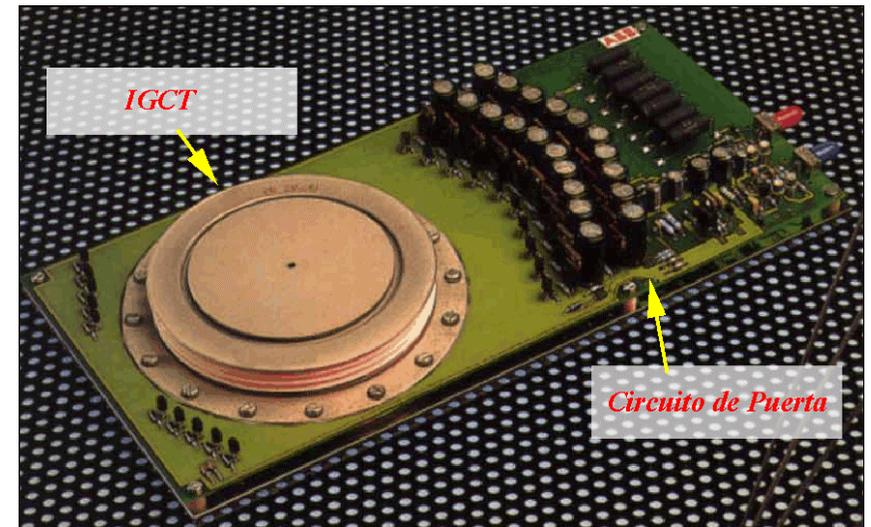
- En el IGCT, se consigue transferir **TODA** la corriente catódica a la puerta rápidamente, de forma que la unión catódica queda casi instantáneamente polarizada inversamente y el apagado del SCR queda reducido al corte del transistor npn  $\Rightarrow$  **No es necesario un amortiguador de apagado.**
- La **ganancia de puerta será 1** ya que toda la corriente anódica se transfiere a la puerta.

## ZONA DE OPERACIÓN SEGURA DEL IGCT



Ejemplo de zona de operación Segura de un IGCT.  
(Análoga a la de un BJT)

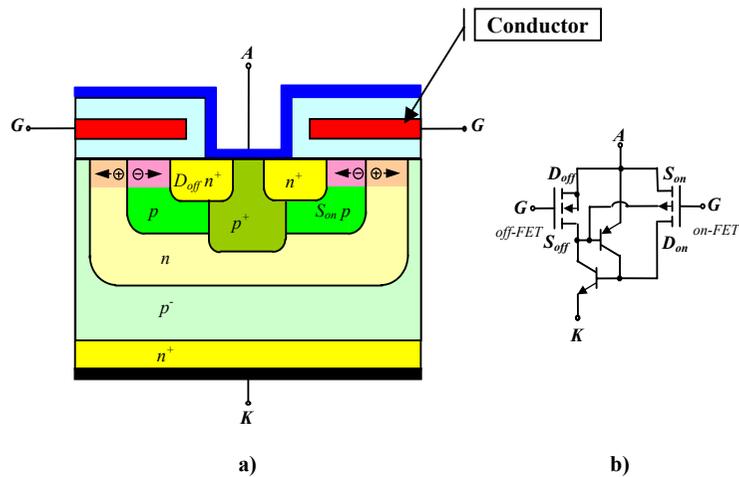
## MODULO CON UN IGCT



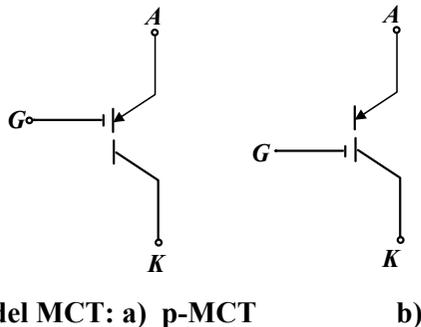
4.500V, 3.600Amp. Diámetro Oblea: 120 mm



## TIRISTOR CONTROLADO POR PUERTA MOS: MCT



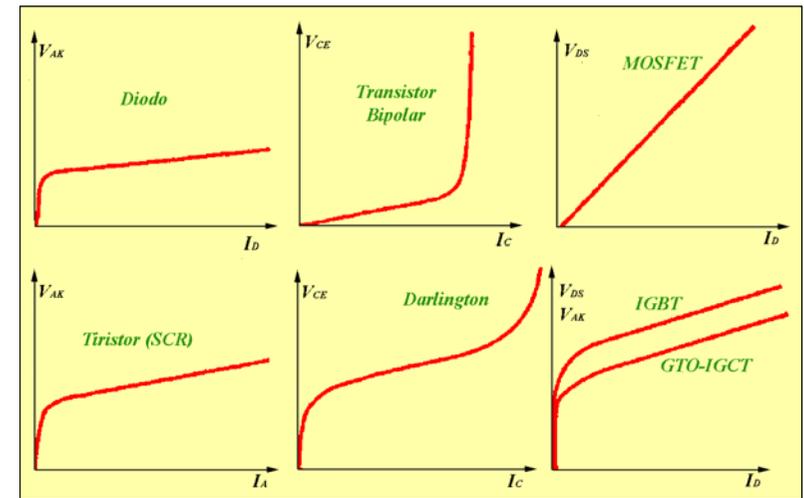
(a) Sección Transversal del p-MCT. (b) Circuito Equivalente



Símbolos del MCT: a) p-MCT b)

- Estructura formada por un SCR y dos transistores MOS (uno para encenderlo y otro para apagarlo) ⇒ **Estructura compleja**, con muchos requerimientos contradictorios.
- Comenzaron las investigaciones en 1992, en la actualidad se han **abandonado** al no poder alcanzar potencias elevadas y no ser competitivo con el MOS en bajas potencias (frecuencia menor y mayor complejidad de fabricación ⇒ mayor costo).

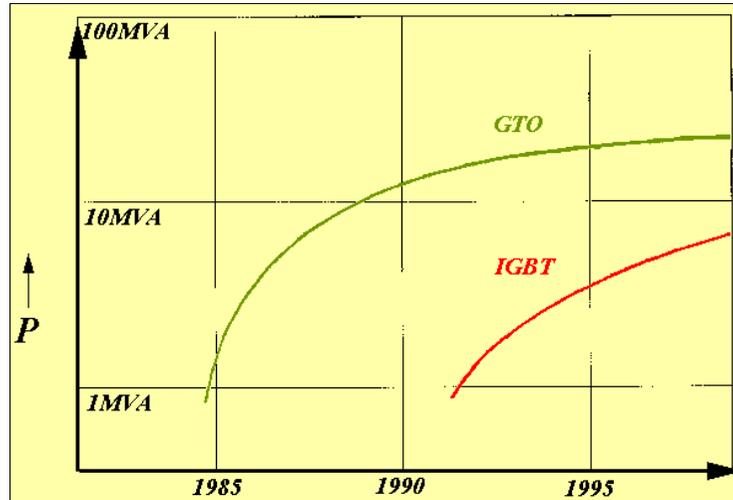
## COMPARACIÓN ENTRE LOS DISPOSITIVOS DE POTENCIA



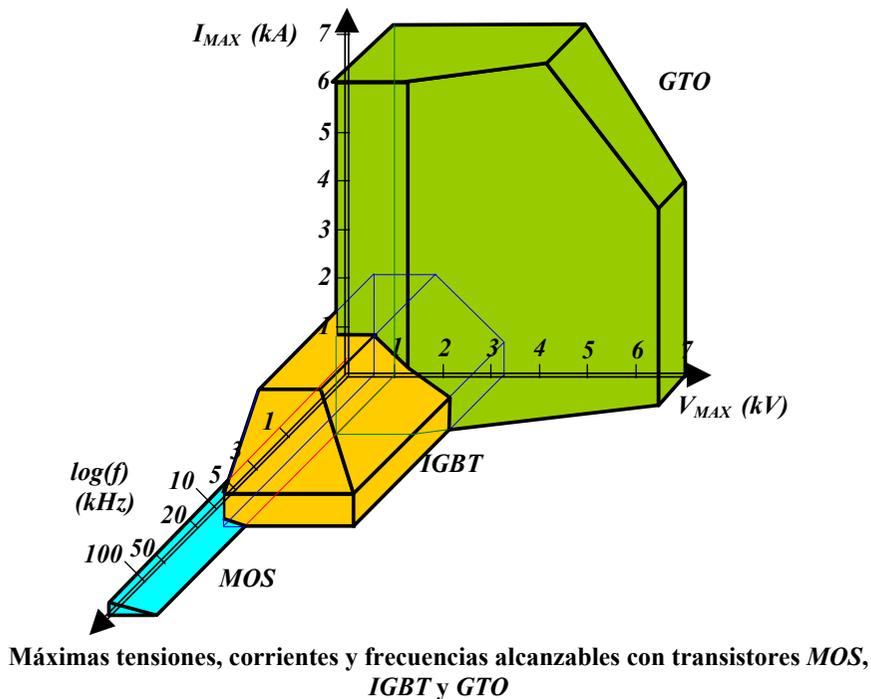
Comparación de la caída de tensión en conducción.

<u>MOS</u>	<u>IGBT</u>	<u>SCR</u>	<u>GTO</u>
➤ Fácil de controlar	➤ Área de silicio /kVA	➤ Área de silicio /kVA	➤ Muy alta tensión
➤ Velocidad	➤ Fácil de controlar	➤ Tensiones y corrientes muy altas	➤ Área de silicio /kVA
➤ Bajo coste ( $V < 150V$ )	➤ No "Snubber"		
➤ Salida lineal			
➤ Alto coste/kVA ( $V > 300V$ )	➤ Caída en conducción	➤ No se apaga desde la puerta	➤ Circuito de puerta
	➤ $f_{max}$ 50kHz		➤ Pérdidas en Conmutación
			➤ "Snubbers"

## COMPARACIÓN ENTRE DISPOSITIVOS DE POTENCIA

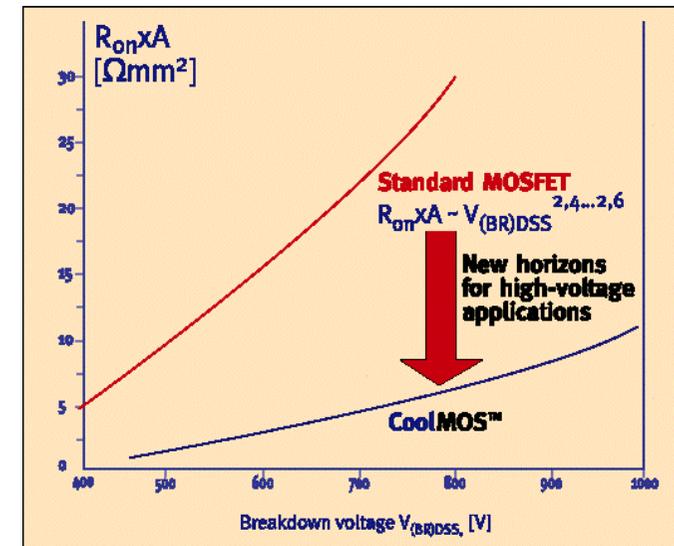
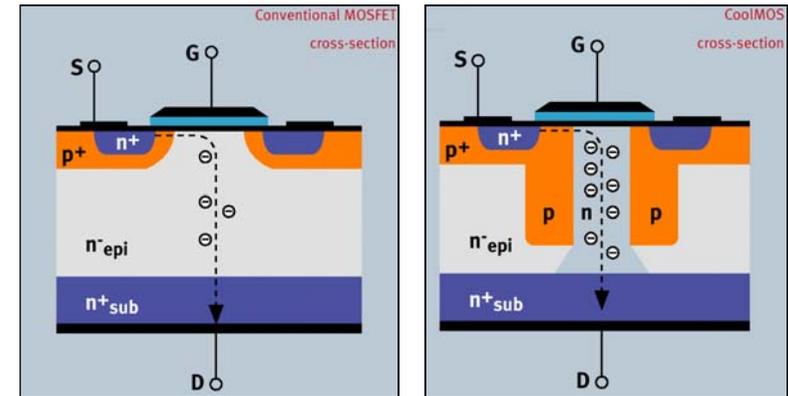


Evolución de la máxima potencia controlable con GTO e IGBT. (Fuente ABB)



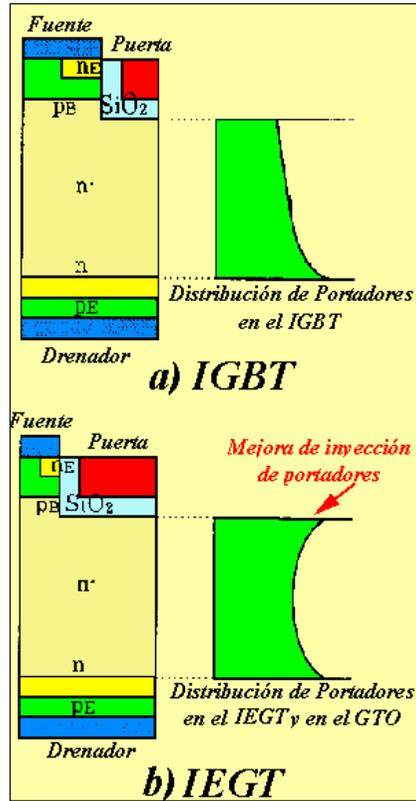
Máximas tensiones, corrientes y frecuencias alcanzables con transistores MOS, IGBT y GTO

## ULTIMAS TENDENCIAS EN LA FABRICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE POTENCIA: COOL-MOS



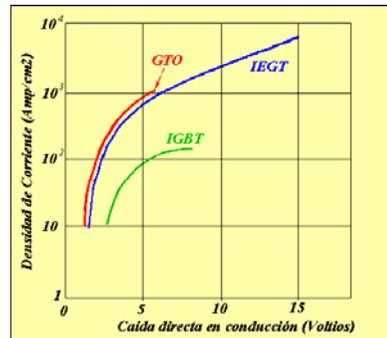
- Consiguen que la resistencia en conducción **crezca casi linealmente** con la tensión de ruptura del dispositivo en vez de crecer con una potencia 2.6. Esto los hace interesantes para **tensiones altas** (600 a 1500V).  
Existen comercialmente (Infineon).

## ULTIMAS TENDENCIAS EN LA FABRICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE POTENCIA: IEGT



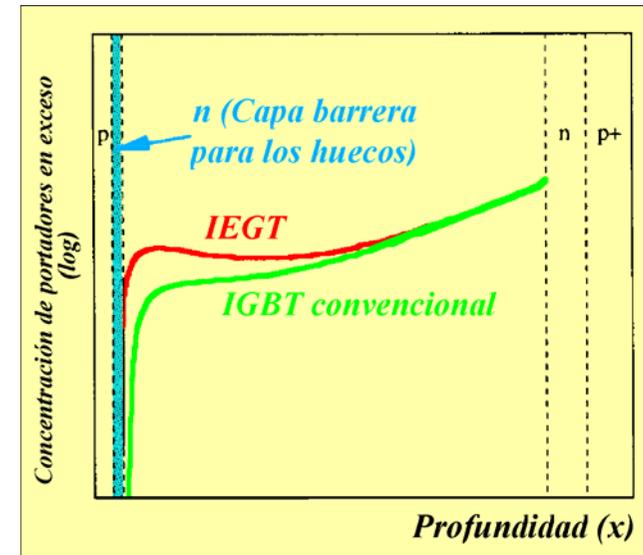
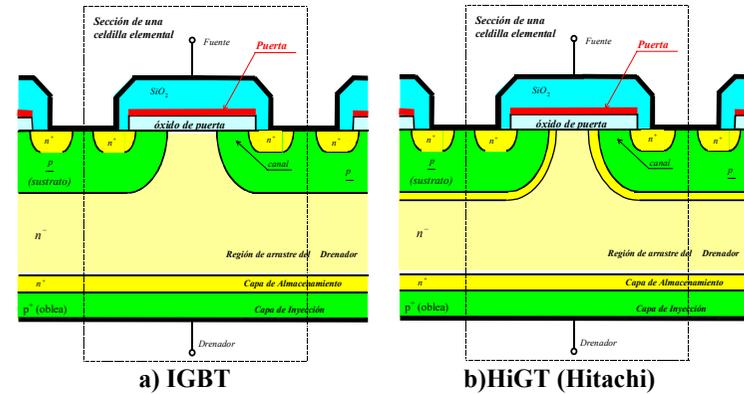
### Injection Enhanced Gate Thyristor: IEGT

- La razón por la que la caída en conducción de un SCR o GTO es menor que en el IGBT radica en la **doble inyección de portadores** (desde el cátodo y desde el ánodo).
- En el IGBT la inyección desde la fuente es muy limitada.
- En el IEGT, se consigue que la capa de fuente tenga una eficiencia muy alta (optimizando los perfiles de los dopados)



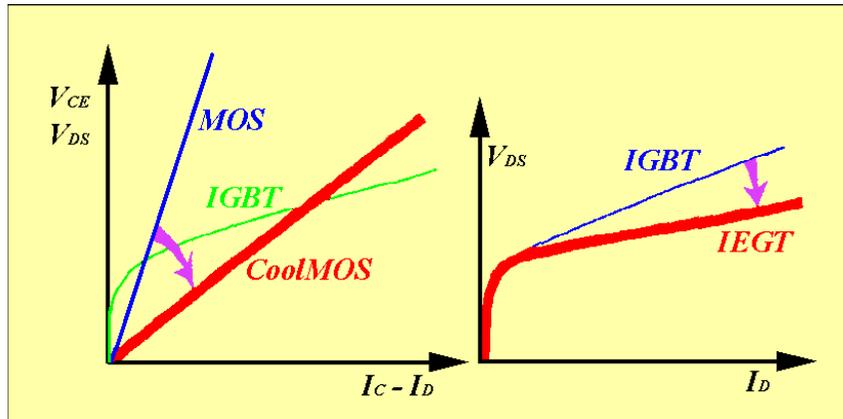
- La caída en conducción puede ser comparable a la del GTO para los dispositivos existentes de 4.500V y 1.500Amp.
- En investigación (Toshiba)
- Existen variantes (HiGT Hitachi)

## ULTIMAS TENDENCIAS EN LA FABRICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE POTENCIA: HiGT



El efecto es parecido al obtenido en el IEGT.

**ULTIMAS TENDENCIAS EN LA FABRICACIÓN DE  
LOS DISPOSITIVOS DE POTENCIA: COMPARACIÓN  
ENTRE LOS DISPOSITIVOS NUEVOS Y LOS  
CONSOLIDADOS**



**Comparación de la caída en conducción de dispositivos nuevos y consolidados**