



UNIVERSIDAD
DE BURGOS

Semiconductores de potencia

José M. Cámara

V 1.0

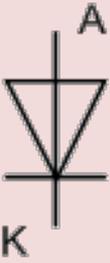


Introducción

- Vamos a estudiar dispositivos semiconductores que se emplean en electrónica de potencia.
- Se caracterizan porque trabajan con tensiones y corrientes medias y altas.
- Algunos de ellos solamente existen como componentes de potencia.
- Otros son análogos a sus equivalentes de señal, pero manejando tensiones y corrientes superiores.
- A diferencia de ellos, van a trabajar habitualmente en conmutación.
- Vamos a considerar los siguientes:
 - Diodos
 - Transistores
 - Tiristores
 - Otros componentes

Diodos de potencia

Introducción



- Pertenece a la categoría de componentes que sí tienen equivalente en señal.
- Están formados por una unión p-n igualmente.
- En ellos el área de pastilla y la corriente soportada son mayores.
- Las características que se persiguen en ellos son:
 - Que en polarización directa sean capaces de conducir una elevada corriente con una baja caída de tensión.
 - Que en polarización inversa soporten una elevada tensión con una pequeña corriente de fugas.
 - Que sean capaces de recuperar el estado de bloqueo tras la conducción de manera rápida y con baja corriente inversa.



Diodos de potencia - Bloqueo

- Se produce al aplicar una tensión inversa en los terminales del diodo de manera que el ánodo sea más negativo que el cátodo.
- Esto provoca:
 - Migración de portadores mayoritarios a los extremos de la pastilla.
 - Ensanchamiento de la zona de carga espacial.
 - Aparición de una barrera de potencial en la unión aprox. Igual a la tensión aplicada.
 - Corriente de minoritarios dependiente de la temperatura y no de la tensión.
- Parámetros asociados:
 - Tensión inversa de trabajo: puede ser soportada de forma continuada sin peligro .
 - Tensión inversa de pico repetitivo: puede ser soportada en periodos de 1ms repetidos cada 10ms.
 - Tensión inversa de pico no repetitivo: puede ser soportada cada 10' durante un periodo de 10ms.
 - Tensión de ruptura: puede producir la ruptura del diodo.



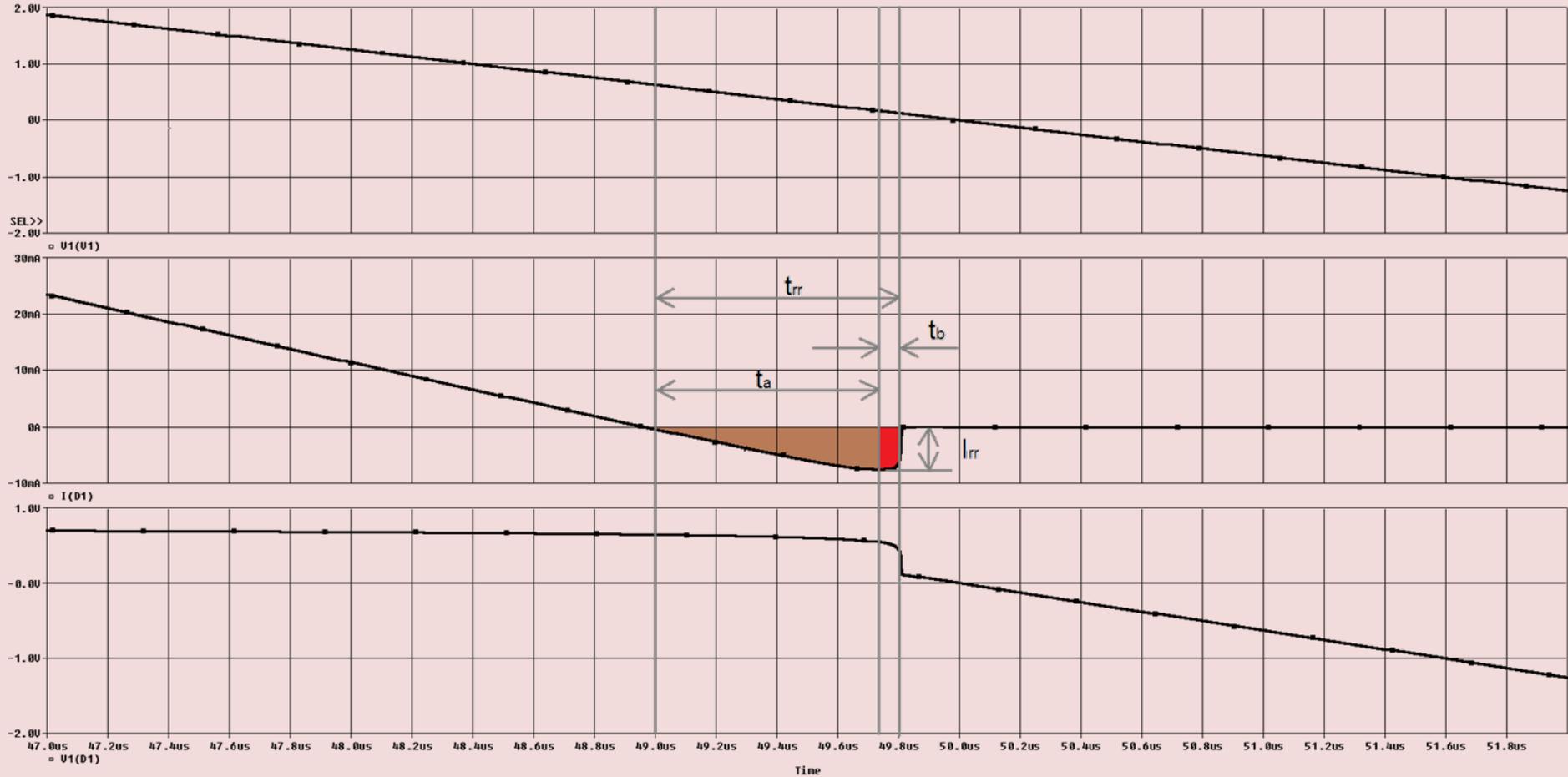
Diodos de potencia - Conducción

- Se produce al aplicar una tensión directa en los terminales del diodo de manera que el ánodo sea más positivo que el cátodo.
- Esto provoca:
 - Migración de portadores mayoritarios hacia la unión.
 - Estrechamiento de la zona de carga espacial.
 - Corriente de mayoritarios dependiente de la tensión.
- Parámetros asociados:
 - Intensidad media nominal: valor medio de la máxima intensidad de impulsos senoidales de 180° que el diodo puede soportar con la cápsula mantenida a una determinada temperatura (110°C).
 - Intensidad de pico repetitivo: puede ser soportada cada 20ms con una duración de 1ms.
 - Intensidad de pico no repetitivo: puede ser soportada cada 10' durante un periodo de 10ms.
- Pérdidas en conducción: $P_c = \int_0^T V_{ak} i_a dt$

Diodos de potencia – Comportamiento dinámico

- Recuperación inversa: recuperación de la situación de bloqueo tras un estado de conducción al ser sometido a tensión inversa.
 - Forzada: si la reducción de corriente es excesivamente rápida, tras el paso por cero una cierta cantidad de portadores cambia su sentido de movimiento y permite que el diodo conduzca en inversa durante un tiempo.
 - Tiempo de almacenamiento : desde el paso por cero hasta la máxima corriente inversa.
 - Tiempo de caída: desde que se alcanza la máxima corriente inversa hasta que se reduce a su 25%.
 - Tiempo de recuperación inversa: suma de los anteriores.
 - Intensidad de recuperación: corriente de pico inversa alcanzada.
 - Natural: si la velocidad de reducción de corriente es baja, los parámetros anteriores pueden ser despreciables.

Recuperación inversa forzada



$$Q_{rr} \approx I_{rr} \times t_{rr}/2$$



[Contenido multimedia disponible](#)



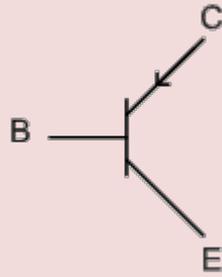
Diodos de potencia – Comportamiento dinámico

- Recuperación directa: en el paso a conducción se necesita también cierto tiempo para que los portadores inunden la zona de carga espacial, lo que provoca la aparición de una tensión ánodo – cátodo anormalmente elevada.
 - Tensión ánodo - cátodo de pico.
 - Tiempo de recuperación directa: tiempo necesario para estabilizar la tensión ánodo – cátodo de conducción.
- La recuperación directa es un fenómeno más corto y que provoca menos pérdidas.



Transistor bipolar de potencia

Introducción



- Se trata de transistores BJT capaces de conducir elevadas corrientes y soportar altas tensiones.
- Para ello habitualmente adoptan la configuración Darlington con el fin de que la corriente de excitación de base no tenga que ser excesivamente elevada.
- La aparición de nuevos dispositivos ha relegado a los BJT a una gama de potencias medias y bajas.
- En aplicaciones de potencia los transistores trabajan habitualmente en las zonas de corte y saturación (conmutación), evitando la región activa.

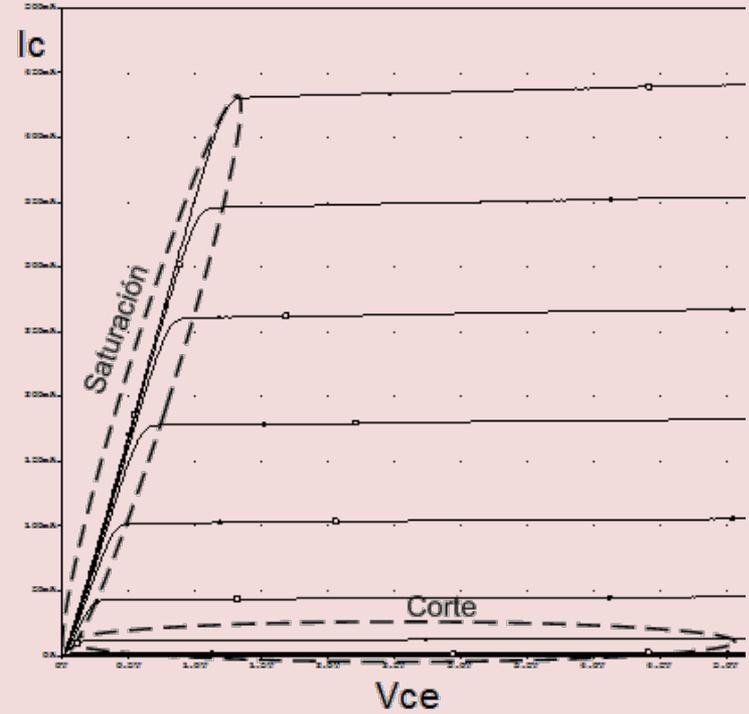
Transistor bipolar de potencia – Comportamiento estático

En corte la corriente de base ha de hacerse muy pequeña. Con el fin de que la corriente de colector sea la menor posible y que el transistor soporte la mayor tensión colector – emisor posible, la base se puede incluso cortocircuitar con el emisor o se le puede suministrar una tensión ligeramente negativa.

- En corte, la corriente de colector es muy pequeña y crece ligeramente con la tensión colector – emisor. El comportamiento del transistor es próximo a un circuito abierto.

En saturación se ha de suministrar una corriente suficiente a la base. La tensión colector – emisor es pequeña pero crece proporcionalmente a la corriente de colector.

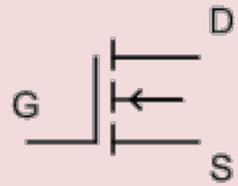
- El transistor se comporta como una resistencia de bajo valor, aunque el objetivo es que se asemeje a un cortocircuito.





Transistor bipolar de potencia – Comportamiento dinámico

- Las capacidades parásitas de las uniones y el tiempo de difusión de portadores a través de la base hacen que la conmutación (paso de corte a saturación y viceversa) no sean inmediatos.
 - Tiempo de retardo: el que transcurre desde que se polariza la base hasta que la corriente de colector alcanza el 10% de su valor final.
 - Tiempo de subida: tiempo que tarda la corriente de colector en pasar del 10% al 90% de su valor final.
 - Tiempo de excitación: la suma de los dos anteriores.
 - Tiempo de almacenamiento: el que transcurre desde que se despolariza la base hasta que la corriente de colector alcanza el 90% de su valor de saturación.
 - Tiempo de caída: tiempo que tarda la corriente de colector en pasar del 90% al 10% de su valor de saturación.
 - Tiempo de apagado: la suma de los dos anteriores.
- Tanto en el proceso de excitación como en el de apagado, se produce la coincidencia en el tiempo de valores de tensión y corriente significativos que provocan la aparición de picos de disipación de potencia. La potencia media disipada dependerá de la proximidad en el tiempo de esos picos, es decir, de la frecuencia de operación.



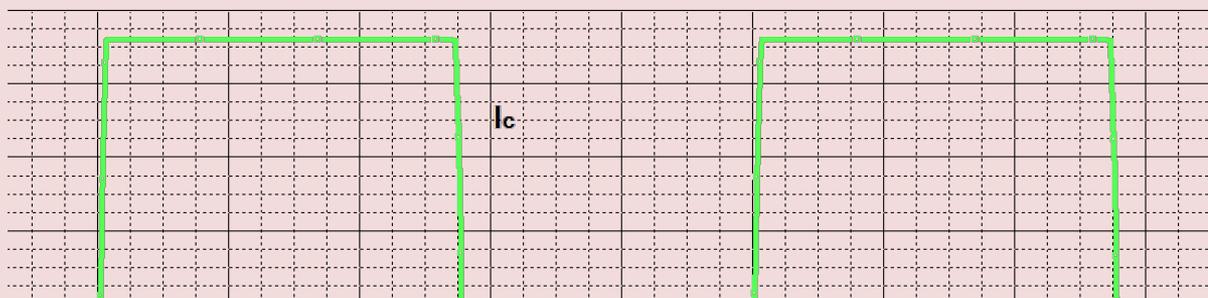
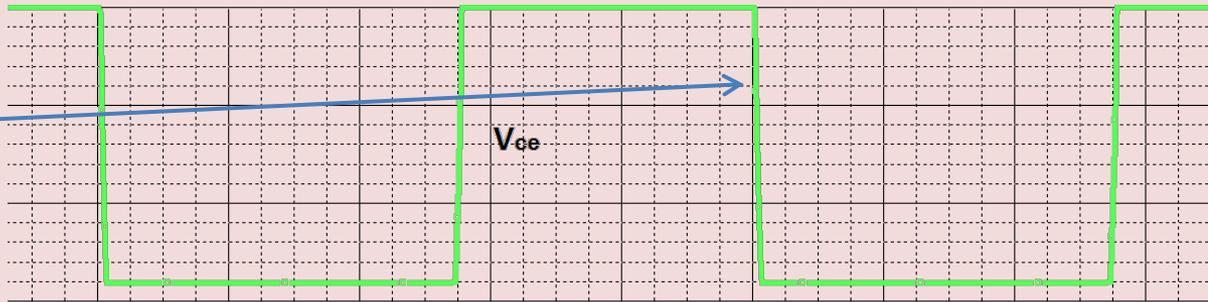
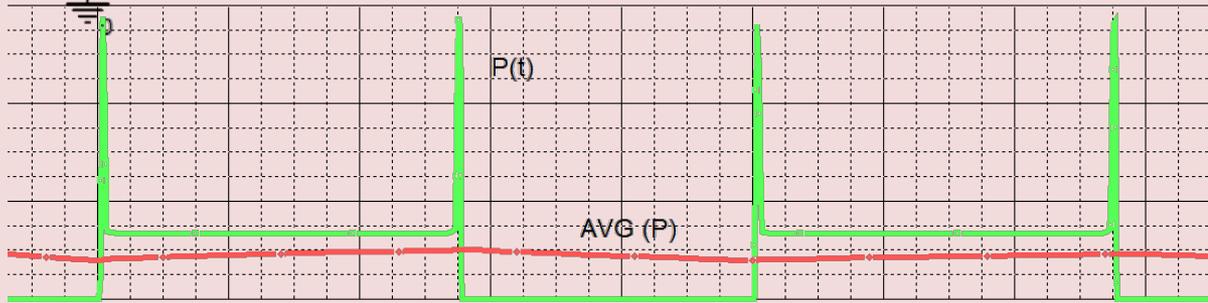
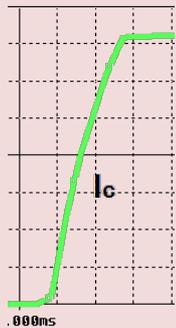
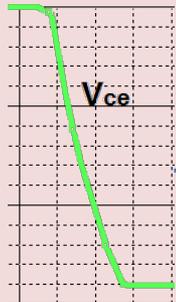
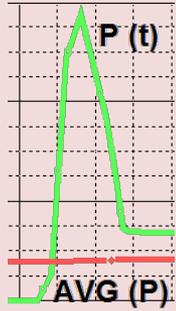
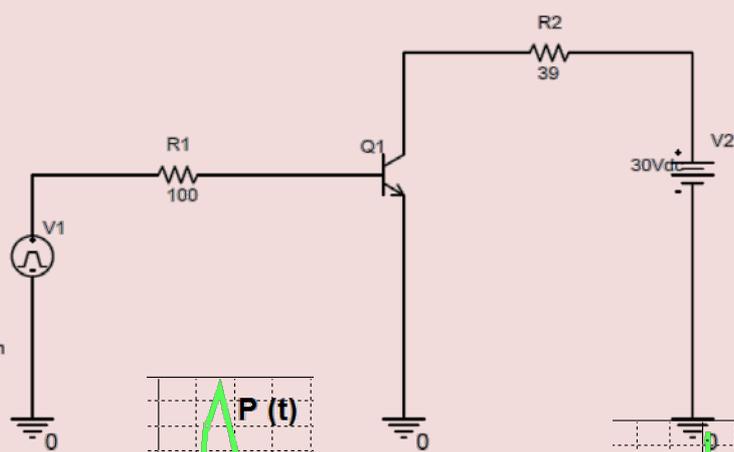
Transistor FET de potencia

Introducción

- Se trata de transistores FET capaces de conducir elevadas corrientes y soportar altas tensiones.
- Para ello les dotan de unas características constructivas encaminadas a incrementar la influencia de la puerta y reducir la resistencia fuente-drenador.
- En aplicaciones de potencia los transistores trabajan habitualmente en las zonas de corte y saturación (conmutación), evitando la región activa.
- En potencia se emplean dispositivos de enriquecimiento.



V1 = 0
V2 = 5
TD = 0
TR = 0
TF = 0
PW = 10m
PER = 20m

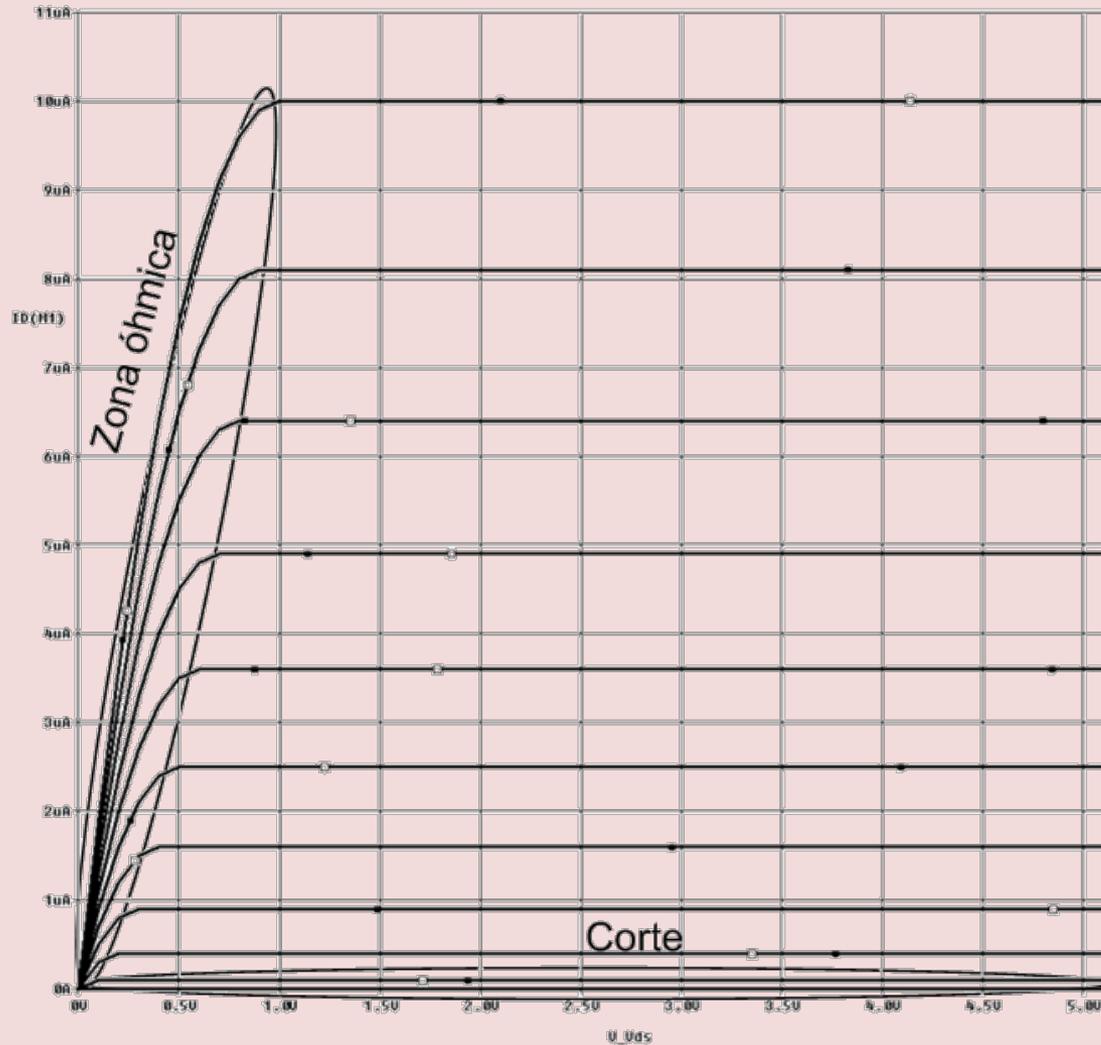


Time

Transistor FET de potencia – Comportamiento estático

- La saturación se consigue aplicando una tensión suficiente a la puerta para la creación del canal. La tensión fuente – drenador es pequeña, pero se incrementa proporcionalmente a la corriente de drenador.
 - El transistor se comporta como una resistencia de bajo valor, aunque el objetivo es que se asemeje a un cortocircuito.
 - La corriente de puerta es despreciable.
- El corte se consigue retirando la tensión de puerta, lo que provoca la desaparición del canal. La corriente de drenador es muy baja, menor que la corriente de fugas en los transistores bipolares.
 - El comportamiento en corte es muy próximo al circuito abierto ideal.

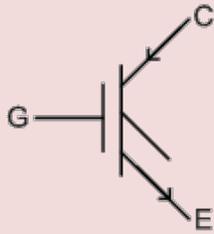
Transistor FET de potencia – Comportamiento estático



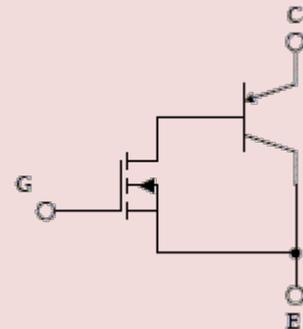
Transistor FET de potencia – Comportamiento dinámico

- La conmutación en el FET es más rápida que en el transistor bipolar debido a que no se producen fenómenos de difusión de portadores minoritarios.
- La capacidad parásita puerta-fuente limita la respuesta de tensión de la puerta a la excitación, tanto hacia el corte como hacia la saturación:
 - Tiempo de retardo: tiempo transcurrido desde que se aplica la excitación hasta que la corriente de drenador alcanza el 10% de su valor de saturación.
 - Tiempo de subida: tiempo que tarda la corriente de drenador en pasar del 10% al 90% de su valor final.
 - Tiempo de excitación: la suma de los dos anteriores.
 - Tiempo de descarga: tiempo transcurrido desde que se retira la excitación hasta que la corriente de drenador alcanza el 90% de su valor de saturación.
 - Tiempo de caída: tiempo que tarda la corriente de drenador en pasar del 90% al 10% de su valor de saturación.
 - Tiempo de apagado: la suma de los dos anteriores.
- Tanto en el proceso de excitación como en el de apagado, se produce la coincidencia en el tiempo de valores de tensión y corriente significativos que provocan la aparición de picos de disipación de potencia. La potencia media disipada dependerá de la proximidad en el tiempo de esos picos, es decir, de la frecuencia de operación.

IGBT - Introducción



- Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT): se trata de un componente que pretende combinar las ventajas de los transistores bipolares (bajas pérdidas en conducción) con las de los FET (baja corriente de excitación y alta velocidad de conmutación).
- Por sus características constructivas, equivale a una combinación de FET a la entrada (Puerta) y bipolar a la salida (Colector-Emisor). Éstos son los nombres que reciben sus terminales.
- No tiene equivalente en señal a diferencia de los anteriores.
- Sus características de funcionamiento se asemejan a las de un FET desplazadas en el eje de tensión colector – emisor aproximadamente un voltio a la derecha (mayor tensión colector – emisor para la misma corriente de colector), pero con una curva de saturación más vertical (menor resistencia equivalente).



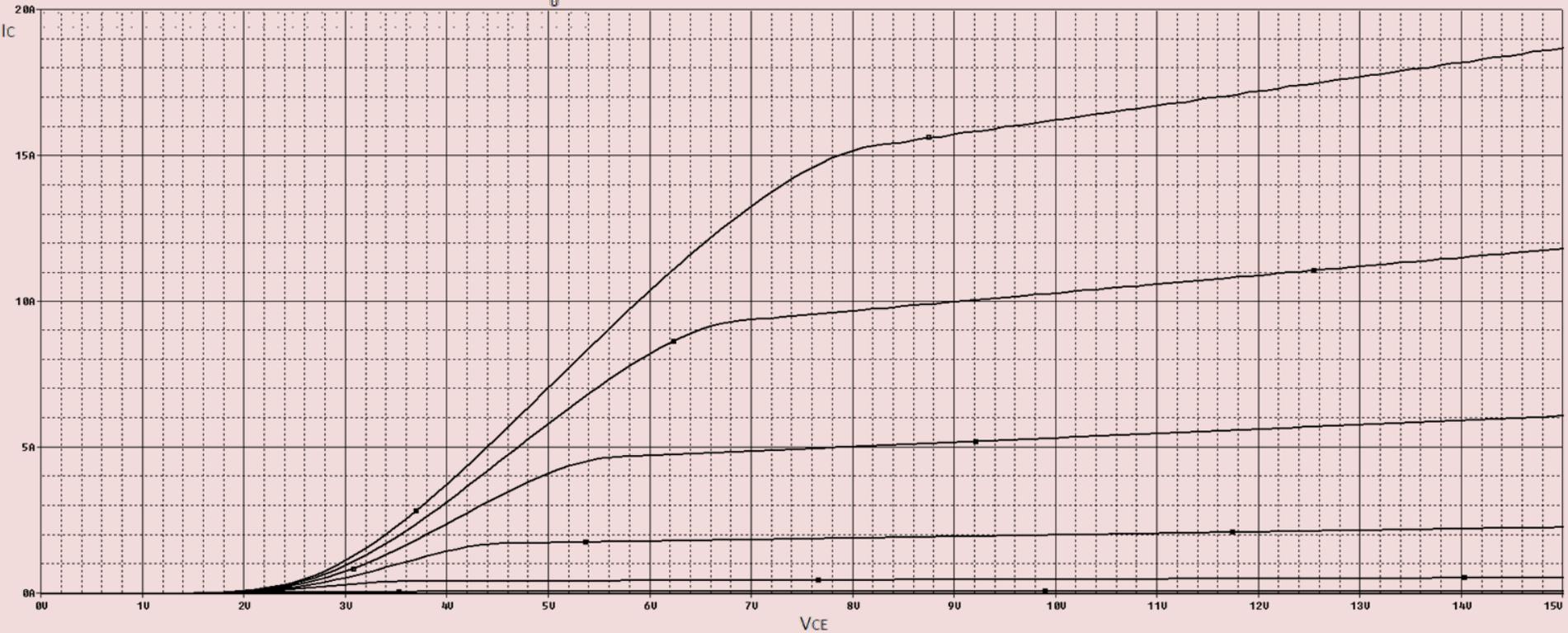
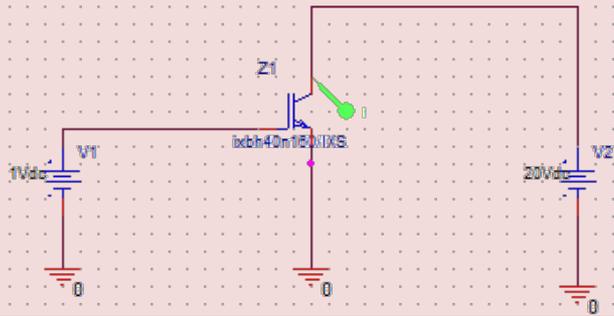


IGBT – Comportamiento estático

- El IGBT en saturación se ve afectado por una mayor tensión colector – emisor que el FET que sin embargo se ve compensada a corrientes altas por una menor resistencia equivalente.
- En corte se comporta aproximadamente como un FET.
- Las pérdidas en saturación son menores que en un FET, pero mayores que en un bipolar.
- Un gradiente de tensión V_{ce} origina a través de la capacidad parásita C_{CG} una corriente que hace que la capacidad parásita C_{GE} se cargue, si la tensión de esta capacidad, V_{GE} , supera el valor de umbral del transistor MOS de entrada, el IGBT se hará conductor en instantes no deseados, con la consiguiente pérdida de control y originando además pérdidas de potencia.



IGBT – Comportamiento estático





IGBT – Comportamiento dinámico

- El tiempo de excitación del IGBT es similar al del FET.
- El tiempo de apagado se encuentra entre el del FET y el bipolar.
- La velocidad de conmutación, por tanto, se encuentra entre los dos dispositivos que le preceden, pero más cercana al FET.
- La potencia disipada también se encuentra en un lugar intermedio.
- En conjunto, el IGBT combina las características de potencia y velocidad de los dos tipos de transistores, pero acercándose al mejor de los casos y, por tanto, al objetivo de alcanzar lo mejor de cada uno.
- Un gradiente de tensión excesivo encontraría cargas atrapadas que no se han extraído totalmente, por esta razón, el gradiente permitido para este caso será inferior a el que se permite en régimen estático.

Tiristor (SCR) Introducción



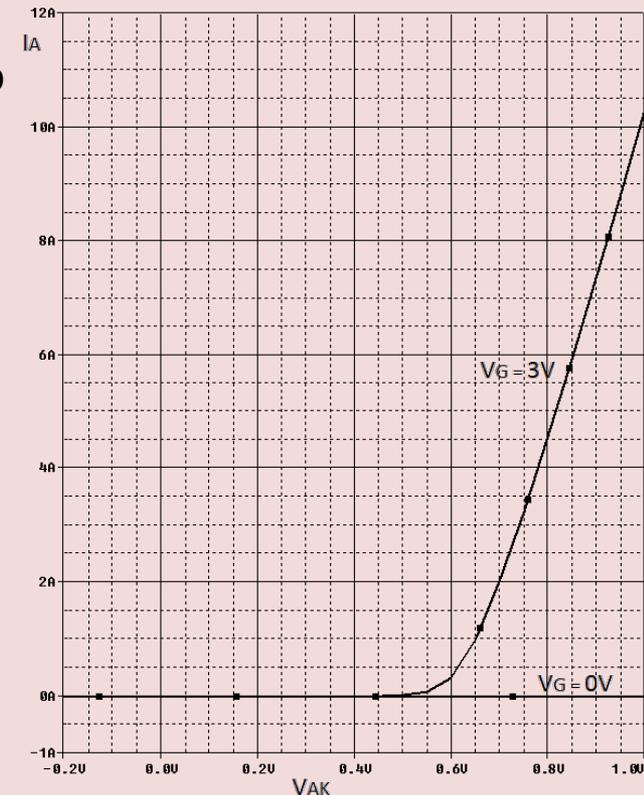
- Se trata de un componente únicamente destinado a aplicaciones de potencia.
- SCR (Silicon Controlled Rectifier): el nombre indica que funciona como un rectificador (diodo), pero con la posibilidad de ser controlado.
- Para ello incorpora un terminal de control (puerta) que permite que un circuito externo lo ponga en conducción, siempre que la tensión ánodo – cátodo sea positiva y suficiente.

Tiristor (SCR) – Comportamiento estático – estado de bloqueo

- El tiristor se encuentra bloqueado cuando:
 - La tensión ánodo – cátodo es positiva pero la puerta no lo es respecto al cátodo (bloqueo directo).
 - La tensión ánodo – cátodo es negativa (bloqueo inverso) independientemente del estado de la puerta.
- En bloqueo solamente circula la corriente de fugas del dispositivo, que crece ligeramente con la tensión ánodo – cátodo y más significativamente con la temperatura.
 - En bloqueo directo, puede llegar a alcanzar la intensidad de ruptura directa de la unión de control y hacer que el tiristor entre en conducción (no destruye el tiristor).
- Se proporcionan parámetros de tensión análogos a los del diodo, pero para ambos sentidos:
 - Tensión de trabajo directo / inverso.
 - Tensión de pico repetitivo directo / inverso.
 - Tensión de pico no repetitivo directo / inverso.
 - Tensión de ruptura directa / inversa.

Tiristor (SCR) – Comportamiento estático – estado de conducción

- La corriente de ánodo es controlada por el circuito externo (no tiene que ver con la de puerta) y debe mantenerse por encima del valor de corriente de mantenimiento para que no se bloquee de forma espontánea.
- La tensión ánodo – cátodo se mantiene en torno a 1'5 – 2V.
- Se proporcionan parámetros asociados análogos a los del diodo:
 - Intensidad media nominal (en ocasiones aparece como Intensidad eficaz nominal).
 - Intensidad de pico repetitivo.
 - Intensidad de pico no repetitivo.
- Pérdidas en conducción: $P_c = 1,3 * I_{Am} + r I_A^2$
 - 1,3V: tensión de codo.
 - I_{Am} : corriente media de ánodo.
 - r : resistencia dinámica del tiristor.
 - I_A : corriente eficaz de ánodo.

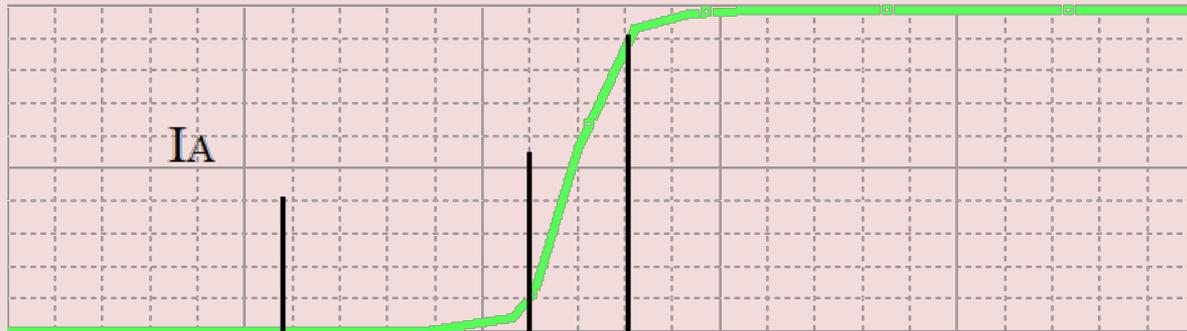
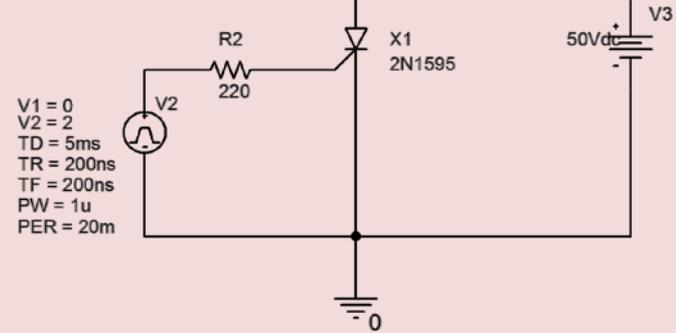


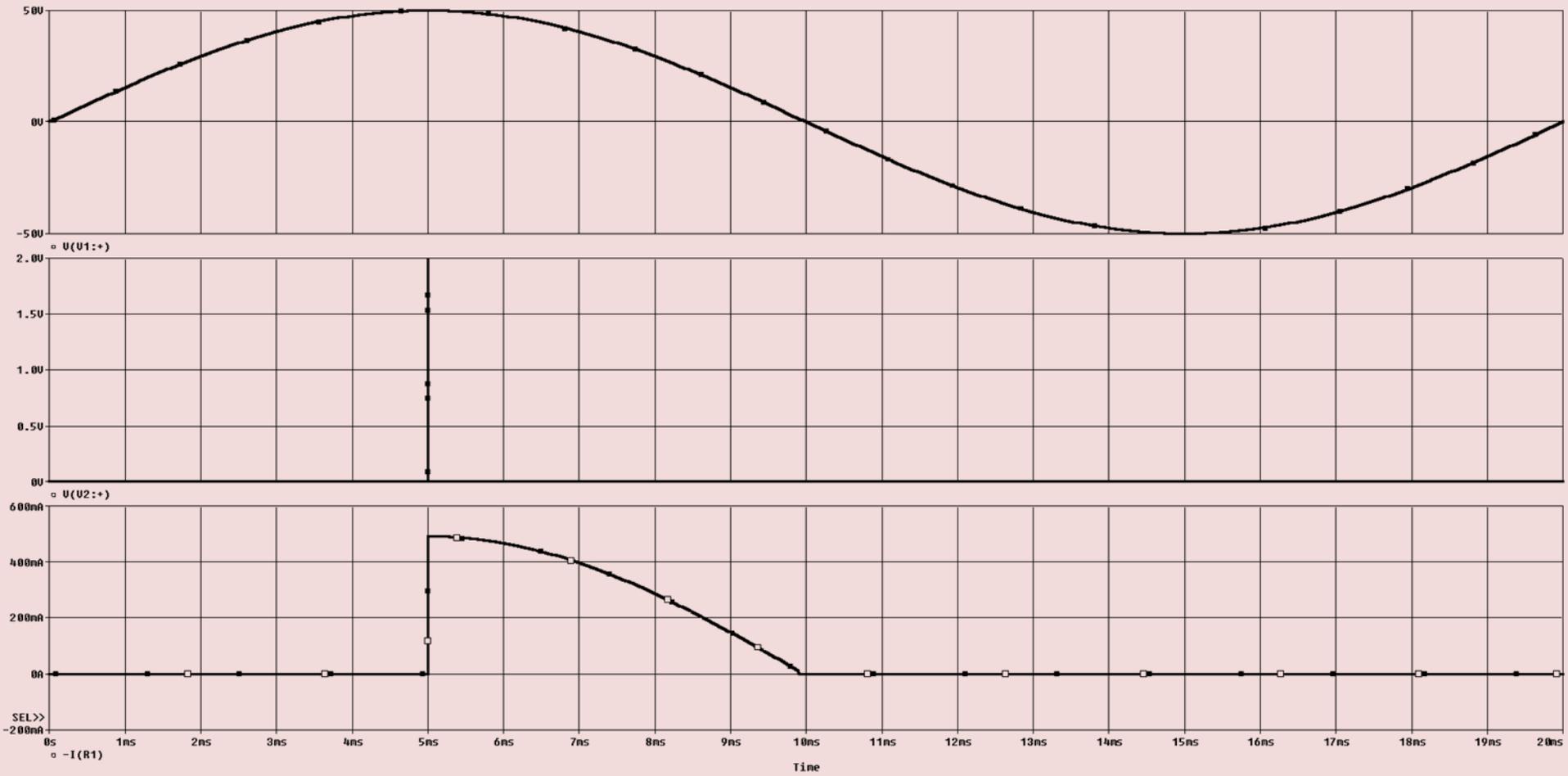
Tiristor (SCR) – Disparo

- El disparo es el paso del tiristor del estado de bloqueo al de conducción de manera estable.
- Disparo accidental:
 - Por tensión excesiva: un exceso de tensión directa ánodo – cátodo provoca que se sobrepase la corriente de ruptura directa.
 - Por derivada de tensión: es posible que una tensión ánodo – cátodo no demasiado alta provoque el paso a conducción si se aplica de una manera muy rápida. La pendiente de subida dV_{AK}/dt necesaria depende de la tensión final y la temperatura (menor, cuanto mayores sean éstas). Se suele proporcionar el parámetro $(dV_{AK}/dt)_{m\acute{a}x}$ para un determinado valor de tensión final (2/3 de la tensión de pico repetitivo directo).
- Disparo por impulso de puerta: es el procedimiento habitual de disparo y consiste en suministrar un impulso eléctrico a la puerta del tiristor (con tensión ánodo – cátodo positiva).
 - Tiempo de retardo a la excitación (t_d): tiempo transcurrido desde que se aplica el impulso en la puerta del tiristor hasta que la corriente de ánodo comienza a elevarse (10% del valor final).
 - Tiempo de subida (t_r): desde que la corriente alcanza el 10% del valor final hasta que 90%.
 - Tiempo de disparo (t_{on}): la suma de los dos anteriores.
- El incremento de corriente en el ánodo en el momento del disparo no debe superar un valor máximo $(di_A/dt)_{m\acute{a}x}$. Esto es debido a que, tras el disparo, el área de conducción se reduce a una pequeña parte de la unión pn, próxima al terminal de puerta. De este modo, la densidad de corriente es temporalmente elevada y puede producir la destrucción del tiristor.



2N1595
 $V_{gt} \text{ (typ)} = 0.7 \text{ V}$
 $I_{gt} \text{ (typ)} = 2 \text{ mA}$
 $t_{gt} \text{ (typ)} = 0.8 \text{ us}$
 $V_{rsm} = 50 \text{ V}$



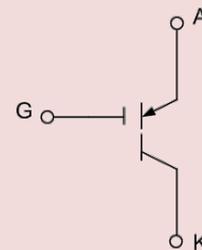


Tiristor (SCR) – Características de disparo

- Los impulsos aplicados a la puerta del tiristor deben cumplir unas condiciones determinadas para asegurar el disparo del mismo:
 - Deben tener una duración mínima que permita a la corriente de ánodo alcanzar el denominado **valor de enclavamiento (I_H)**.
 - La corriente de puerta debe superar el **valor de corriente mínima con disparo (I_{GT})** a la temperatura de trabajo.
 - La tensión puerta – cátodo debe superar el **valor de tensión mínima con disparo (V_{GT})** a la temperatura de trabajo. Esta tensión generará la corriente anterior que es la que realmente produce el disparo.
- Para evitar disparos accidentales, el fabricante proporciona también:
 - Tensión de puerta – cátodo máxima sin disparo (V_{GD}).
 - Corriente de puerta máxima sin disparo (I_{GD}).
- Se producen las siguientes circunstancias:
 - Un valor de tensión/corriente por encima del mínimo con disparo asegura el disparo.
 - Un valor de tensión y corriente por debajo de los máximos sin disparo asegura que no se produce un disparo indeseado.
 - Cualquier otro valor produce un resultado incierto.

Tiristor (SCR) – Bloqueo

- No es posible forzar el bloqueo del tiristor a través del terminal de puerta.
- Una caída de la corriente de ánodo por debajo del **valor de mantenimiento** provoca el **bloqueo natural** del tiristor.
- Si la velocidad de reducción de la corriente de ánodo (di_A/dt) es excesiva, al igual que ocurre en un diodo, el tiristor puede conducir temporalmente en sentido inverso.
 - Tiempo de apagado dinámico (tiempo de bloqueo(t_q)): mínimo tiempo que debe transcurrir desde que la corriente de ánodo se invierte hasta que una tensión ánodo cátodo positiva no puede poner al tiristor en conducción sin disparo.
- Es posible realizar un **bloqueo forzado** del tiristor:
 - Mediante la aplicación de una tensión inversa suficiente entre ánodo y cátodo.
 - Mediante la aplicación de una fuente de corriente opuesta a la corriente directa ánodo – cátodo.



MCT (MOS Controlled Thyristor)

- Se trata de un dispositivo híbrido, al igual que el IGBT.
- Dispone de dos transistores MOS. Uno de ellos pone al tiristor en conducción; el otro lo apaga.
- En este caso el ánodo es el terminal de referencia.
- En estado de bloqueo directo, una tensión puerta-ánodo negativa pone al MCT en conducción.
- En conducción, una tensión puerta-ánodo positiva apaga el MCT.
- El apagado es posible si la corriente se encuentra por debajo de un valor denominado **corriente controlable de pico**. Por encima de ese valor, un intento de apagado puede destruir el componente. En tal caso, el MCT funcionaría como un tiristor normal.
- La anchura de los impulsos de puerta depende de la corriente. Resulta aconsejable su mantenimiento durante toda la duración de los periodos de encendido/apagado.
- Están contruidos a base de múltiples celdas en paralelo, por lo que admiten gradientes de corriente más altos.

Otros dispositivos

- GTO (Gate Turn-off Thyristor): se trata de un tiristor que puede ser bloqueado desde el terminal de puerta.
- DIAC: dispositivo autoprotegido que se vuelve conductor en corriente directa o inversa, cuando se alcanza la tensión de ruptura.
- TRIAC: DIAC dotado de un terminal de control que le permite entrar en conducción antes de alcanzar la tensión de ruptura.
- Dispositivos híbridos: además del IGBT y al MCT, los fabricantes proporcionan múltiples dispositivos híbridos de similares características.

Referencias

- Electrónica de Potencia. Salvador M. García, Juan A. Gualda Gil. Thomson Editores Spain, Paraninfo S.A., 2006
- Thyristor Theory and Design Considerations. Handbook. HBD855/D Rev. 1, Nov-2006. ON Semiconductor