

TEMA 6. TRANSISTOR BIPOLAR DE PUERTA AISLADA (IGBT)

6.1. INTRODUCCIÓN

6.2. TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN Y CURVA CARACTERÍSTICA I-V

6.3. FUNCIONAMIENTO DEL TRANSISTOR IGBT

6.3.1. Estado de Bloqueo

6.3.2. Estado de Conducción

6.4. EFECTO DE CEBADO DEL TIRISTOR PARÁSITO INTERNO DEL IGBT (LATCH UP)

6.4.1. Efecto del Latch up

6.4.2. Métodos para Evitar el Efecto del Latch up

6.5. CARACTERÍSTICAS DE CONMUTACIÓN

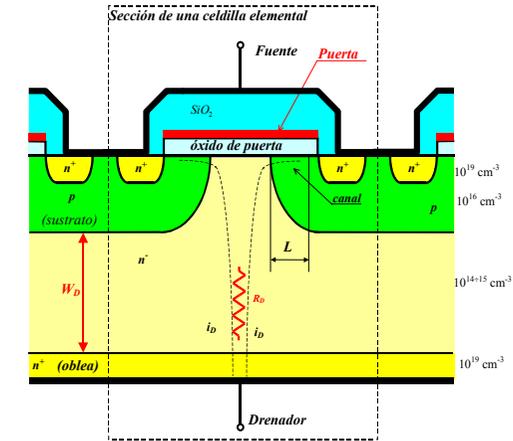
6.5.1. Encendido

6.5.2. Apagado

6.6. ÁREA DE OPERACIÓN SEGURA

6.7. CARACTERÍSTICAS Y VALORES LÍMITE DEL IGBT

INTRODUCCIÓN

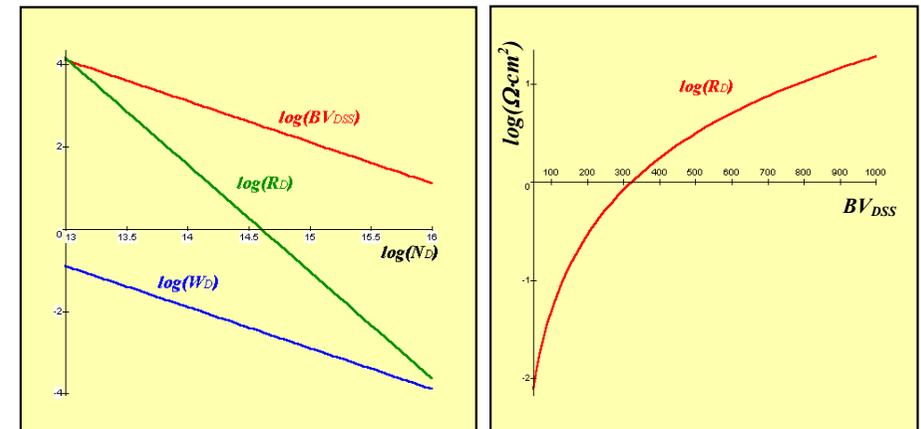


Transistor D-MOS

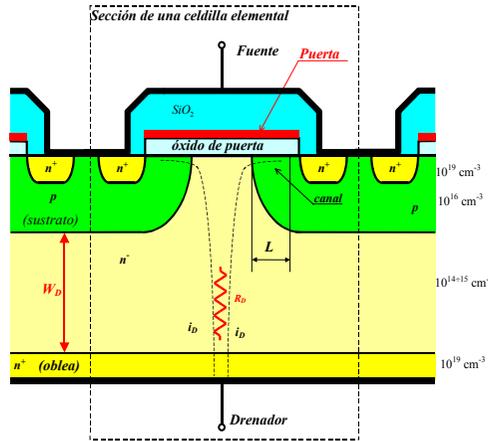
En un Transistor MOS para conseguir altas tensiones (BV_{DSS}):

- Para un dopado N_D , la máxima tensión de ruptura es: $BV_{DSS} \approx \frac{1.3 \cdot 10^{17}}{N_D}$
- La zona de depleción tiene un espesor: $W_D \approx 1 \cdot 10^{-5} \cdot BV_{DSS}$ (cm)
- La resistividad específica es: $R_D \cdot A \approx 3 \cdot 10^{-7} \cdot BV_{DSS}^{2.5+2.7}$ ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)

Gráficamente:



INTRODUCCIÓN

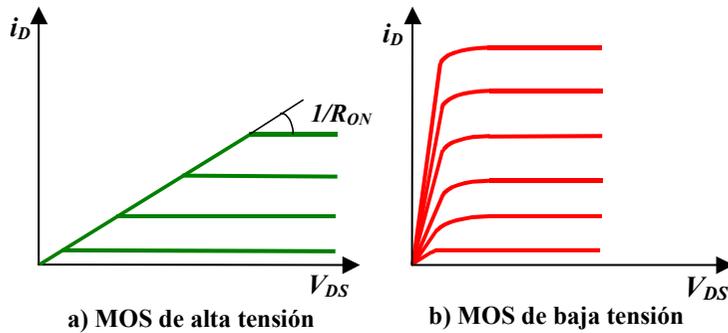


Transistor D-MOS

En un Transistor MOS para conseguir tensiones (BV_{DSS}) elevadas, R_D tendrá un valor elevado al ser N_D necesariamente bajo y el espesor W_D grande.

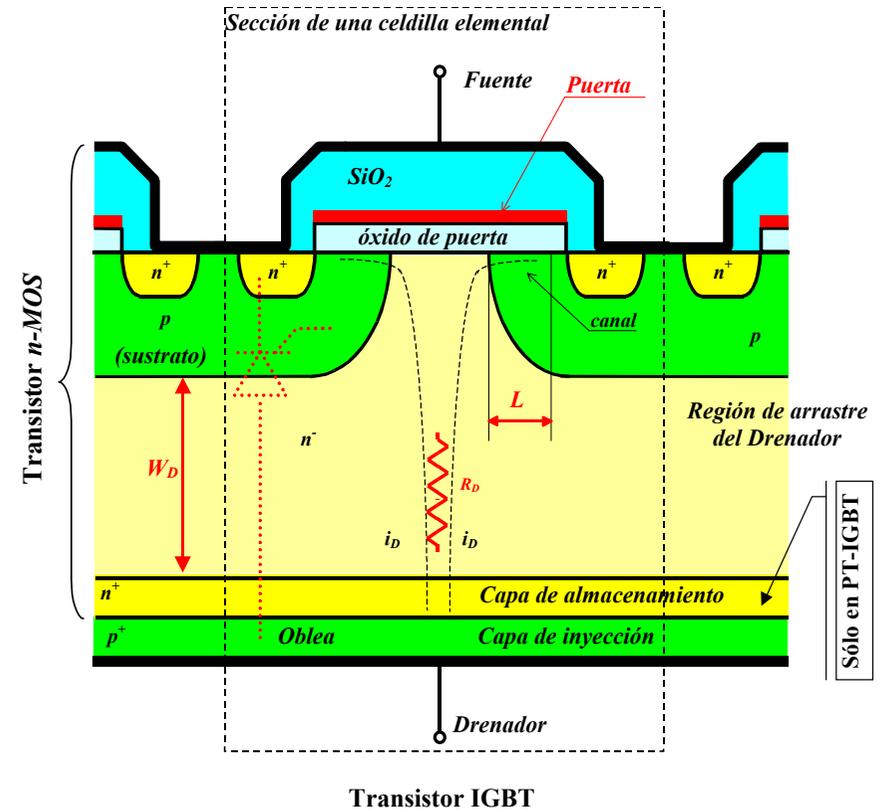
La caída en conducción será: $i_D \cdot R_{ON}$ Donde R_{ON} será la suma de las resistividades de las zonas atravesadas por la corriente de drenador (incluyendo la de canal).

Si la BV_{DSS} del dispositivo es mayor que 200 o 300 Voltios La resistencia de la capa n^- (R_D) es mucho mayor que la del canal.



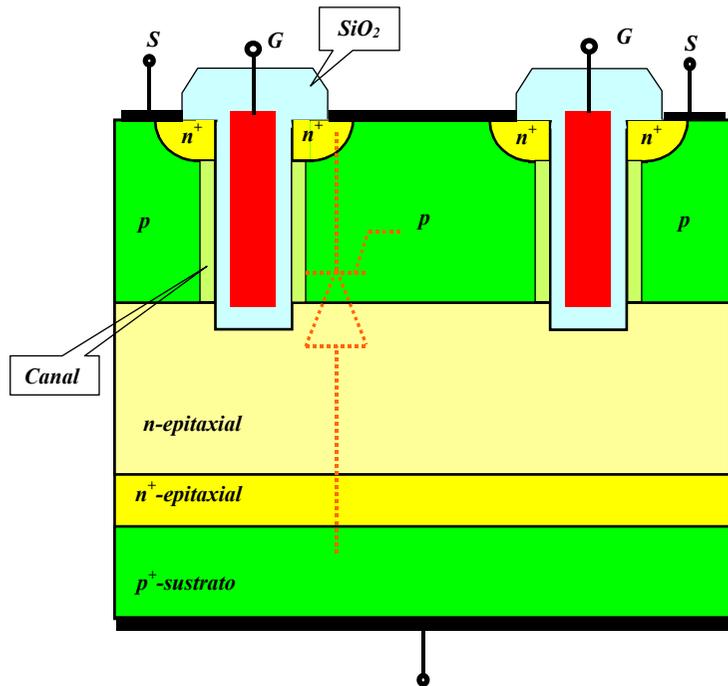
TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN

- Aparece en década de los 80
- Entrada como MOS, Salida como BJT
- Velocidad intermedia (MOS-BJT)
- Tensiones y corrientes mucho mayores que MOS (1700V-400Amp)
- Geometría y dopados análogos a MOS (con una capa n^- mas ancha y menos dopada)
- Soporta tensiones inversas (no diodo en antiparalelo). No el PT
- Tiristor parásito no deseado
- Existen versiones canal n y canal p

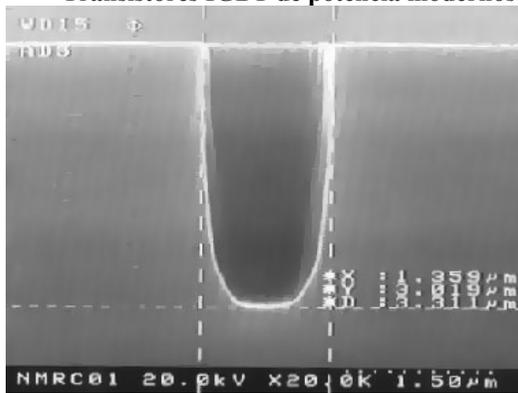


Transistor IGBT

TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN. TRANSISTOR EN TRINCHERA (TRENCHED)

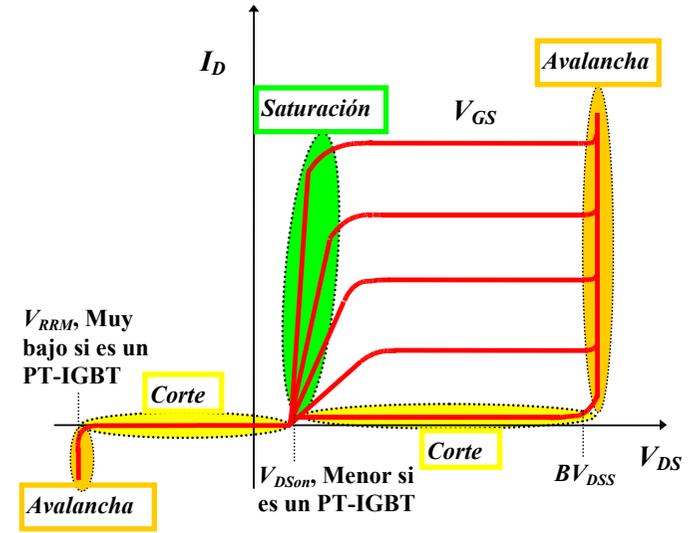


Transistores IGBT de potencia modernos: "Transistores en Trinchera"

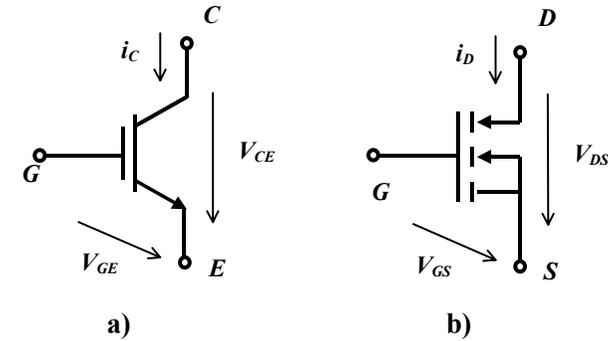


Microfotografía de una sección de la puerta de un transistor IGBT tipo Trenched

TRANSISTOR IGBT. CURVA CARACTERISTICA Y SIMBOLOS



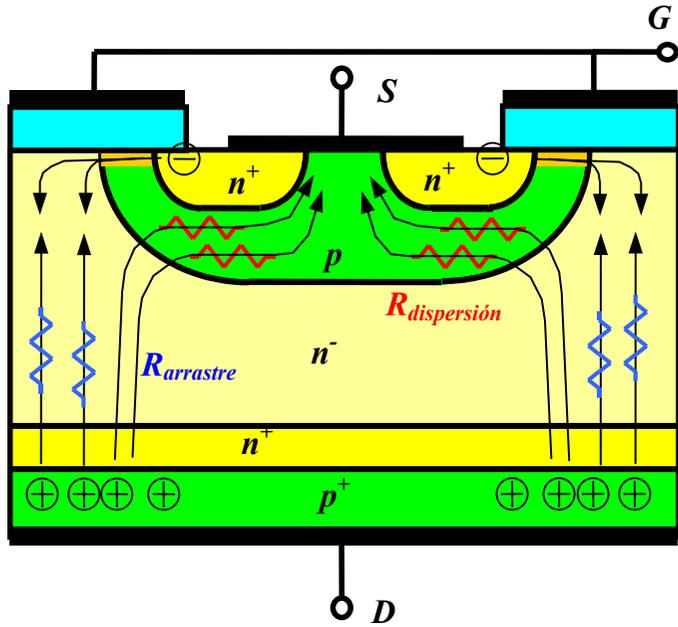
Curva Característica Estática de un Transistor IGBT de Canal n



Representación Simbólica del Transistor IGBT. a) Como BJT, b) Como MOSFET

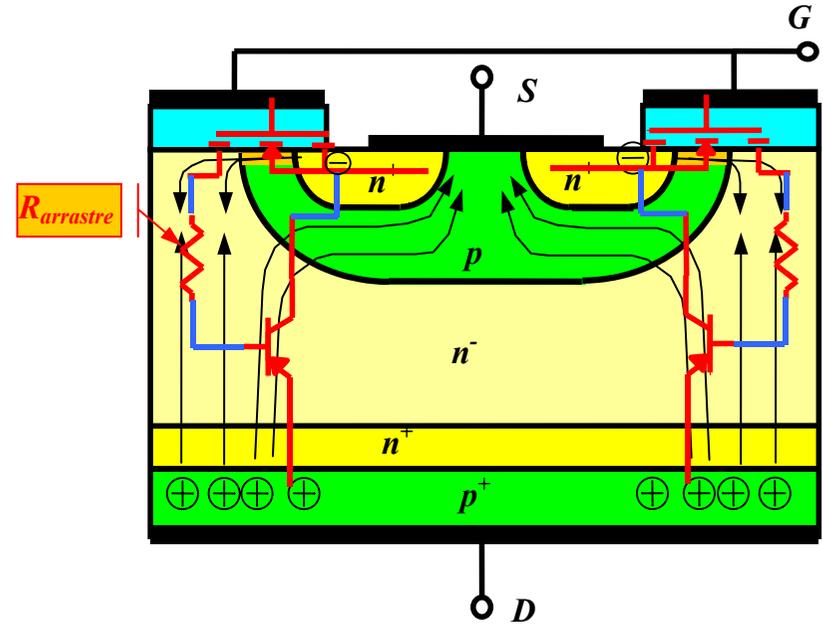
FUNCIONAMIENTO DEL TRANSISTOR IGBT

El comportamiento cortado es análogo al MOS cortado. En conducción será:

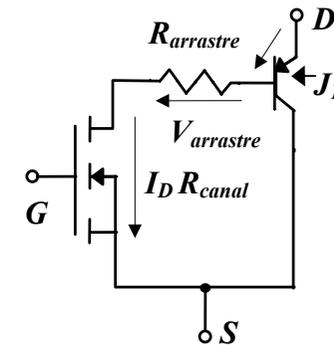


Sección Vertical de un IGBT. Caminos de Circulación de la Corriente en Estado de Conducción

FUNCIONAMIENTO DEL TRANSISTOR IGBT

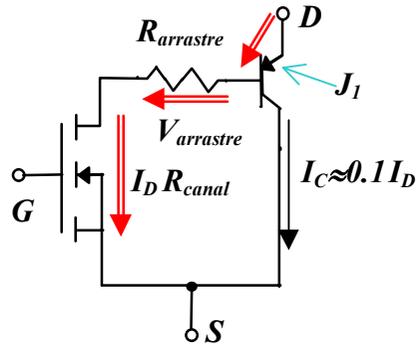


Sección Vertical de un IGBT. Transistores MOSFET y BJT Internos a la Estructura del IGBT



Circuito Equivalente aproximado del IGBT.

FUNCIONAMIENTO DEL TRANSISTOR IGBT



Circuito Equivalente aproximado del IGBT.

Comparación $V_{DS(on)}$ MOS-IGBT para la misma BV_{DSS}

$$V_{DS(on)} = V_{J1} + I_D R_{canal} + I_D R_{arrastre}$$

$$V_{J1} = 0.7 \pm 1 \text{ Volt.}$$

$$R_{canal} = R_{canal} (MOS)$$

$$R_{arrastre} (IGBT) \ll R_{arrastre} (MOS)$$

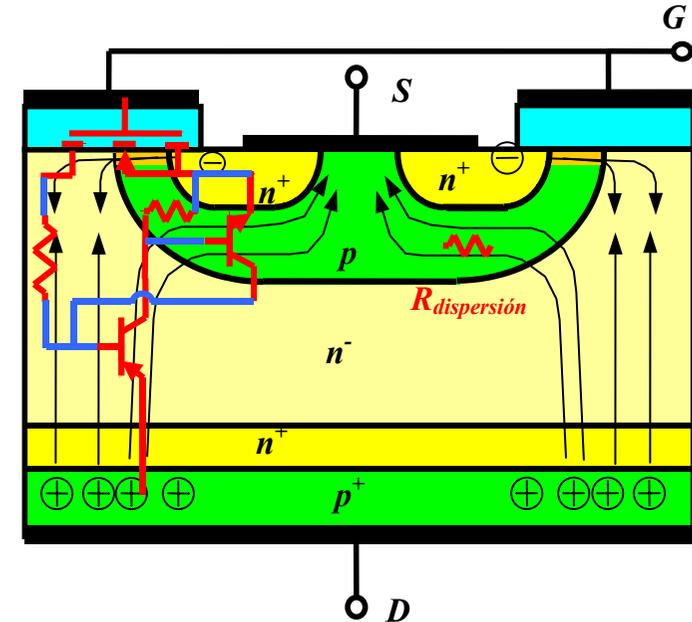
Debido a la inyección de huecos desde p^+

Esta resistencia es **menor aún si es PT-IGBT**, ya que para soportar la misma tensión puede ser casi la mitad de ancha.

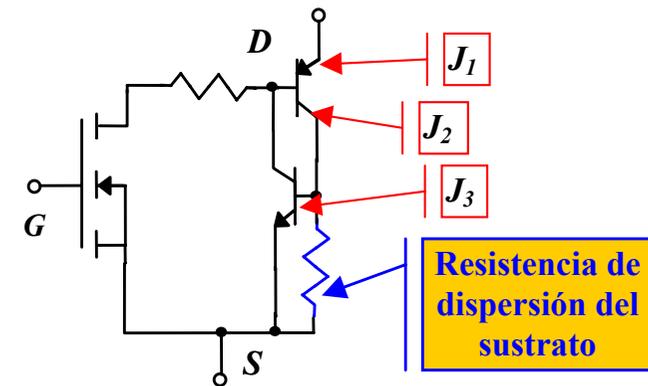
(además en los **PT-IGBT** la tensión V_{J1} es menor al estar más dopadas las capas que forman la unión)

- La caída total es menor en el IGBT para tensiones a partir de 600V. (1.6V para 1.200 Voltios)
- En el mercado existen IGBTs de 600, 1.200, 1.700, 2.200 y 3.300 Voltios
- Hay anunciados IGBTs de 6.500 Voltios

FUNCIONAMIENTO DEL TRANSISTOR IGBT

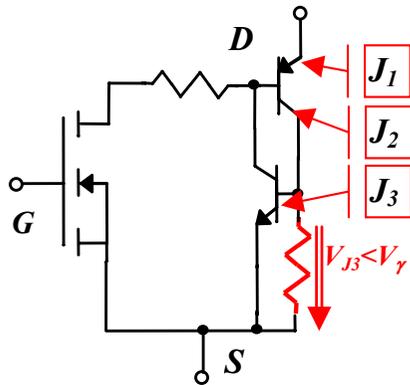


Sección Vertical de un IGBT. Transistores MOSFET y BJT Internos a la Estructura del IGBT



Circuito Equivalente del IGBT que Contempla el Tiristor Parásito

EFFECTO DE CEBADO DEL TIRISTOR PARÁSITO INTERNO DEL IGBT (LATCH UP)



- Si $V_{J3} > V_{\gamma}$ el transistor *npn* entra en conducción y activa el SCR.
 \Rightarrow Pérdida de control desde puerta
 \equiv latch-up estático ($I_D > I_{Dmax}$).
- Si se corta muy rápido, el MOS es mucho más rápido que el BJT y aumenta la fracción de la corriente que circula por el colector del *p-BJT*, esto aumenta momentáneamente V_{J3} , haciendo conducir el SCR.
 \equiv latch-up dinámico.

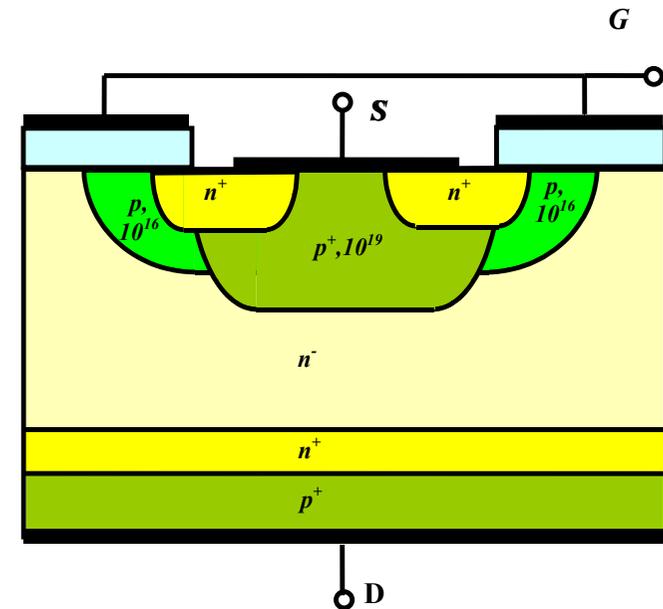
Debe evitarse porque se pierde el control del dispositivo desde la puerta

Entrada en conducción del SCR parásito

Métodos para evitar el Latch-up en IGBT's:

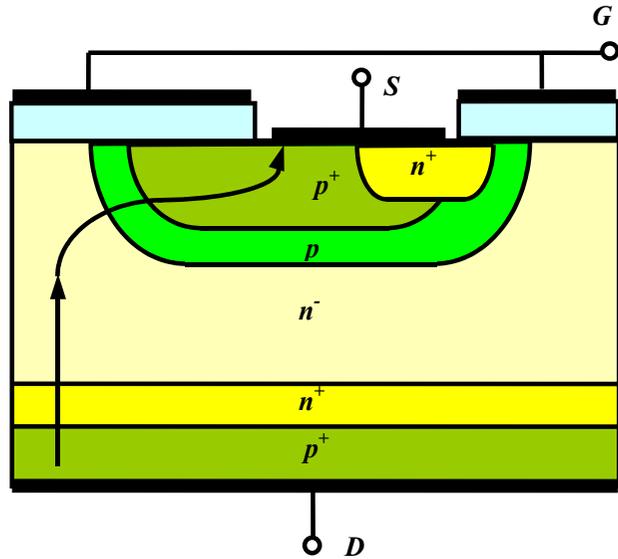
- El usuario:**
 - Limitar I_D máxima al valor recomendado por el fabricante.
 - Limitar la variación de V_{GS} máxima al valor recomendado por el fabricante (ralentizando el apagado del dispositivo).
- El fabricante:** En general intentará disminuir la resistencia de dispersión de sustrato del dispositivo:
 - Hacer L lo menor posible
 - Construir el sustrato como dos regiones de diferente dopado
 - Eliminar una de las regiones de fuente en las celdillas.

EFFECTO DE CEBADO DEL TIRISTOR PARÁSITO INTERNO DEL IGBT (LATCH UP). Métodos para Evitar el Efecto del Latch up



Técnica para evitar el Latchup en los Transistores IGBT's. Modificación del Dopado y Profundidad del Sustrato

EFFECTO DE CEBADO DEL TIRISTOR PARÁSITO INTERNO DEL IGBT (LATCH UP) . Métodos para Evitar el Efecto del Latch up

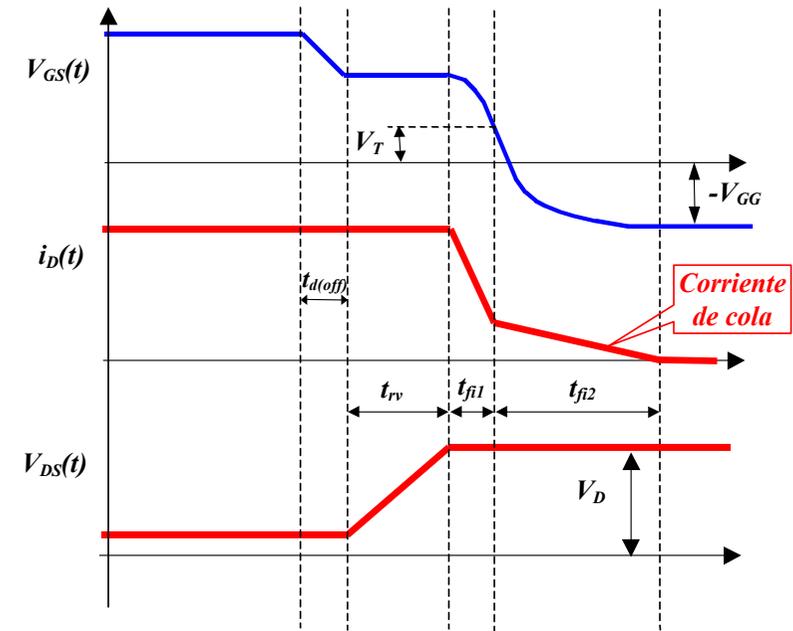


Técnicas para evitar el Latchup en los Transistores IGBT's. Estructura de bypass de la Corriente de Huecos

- Es un procedimiento muy eficaz.
- Disminuye la transconductancia del dispositivo.

CARACTERÍSTICAS DE CONMUTACIÓN

El encendido es análogo al del MOS, en el apagado destaca la corriente de “cola”:

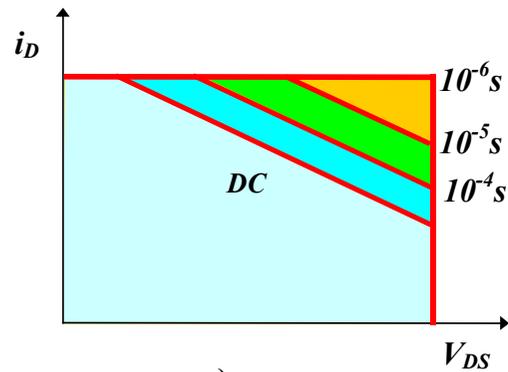


Formas de Onda Características de la Tensión y Corriente en el Apagado de un Transistor IGBT conmutando una carga inductiva (no comienza a bajar I_d hasta que no sube completamente V_d)

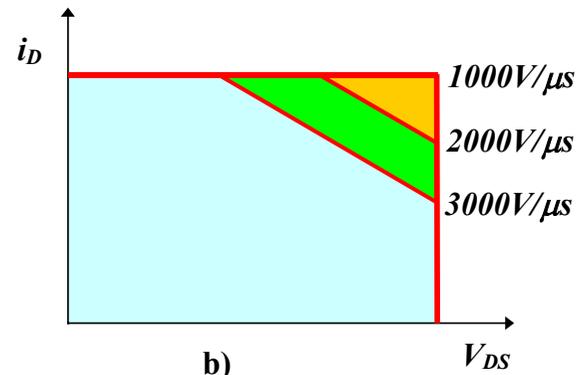
La **corriente de cola** se debe a la conmutación más lenta del BJT, debido a la carga almacenada en su base (huecos en la región n^-).

- Provoca **pérdidas** importantes (corriente relativamente alta y tensión muy elevada) y **limita la frecuencia** de funcionamiento.
- La corriente de cola, al estar compuesta por huecos que circulan por la resistencia de dispersión, es la **causa del “latch up” dinámico**.
- Se puede **acelerar** la conmutación del BJT disminuyendo la **vida media** de los huecos en dicha capa (creando centros de recombinación). Tiene el inconveniente de producir más **pérdidas en conducción**. \Rightarrow Es necesario un compromiso.
- En los **PT-IGBT** la capa n^+ se puede construir con una vida media corta y la n^- con una vida media larga, así el exceso de huecos en n^- se difunde hacia la capa n^+ dónde se recombinan (efecto sumidero), disminuyendo más rápido la corriente.

ÁREA DE OPERACIÓN SEGURA



a)



b)

Área de Operación Segura SOA de un Transistor IGBT. a) SOA directamente Polarizada (FBSOA) b) SOA Inversamente Polarizada (RBSOA)

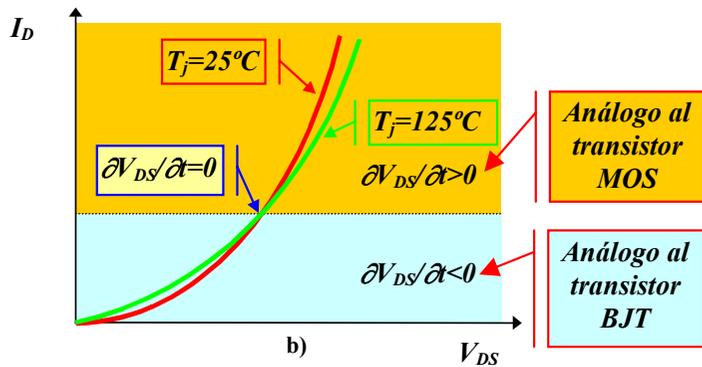
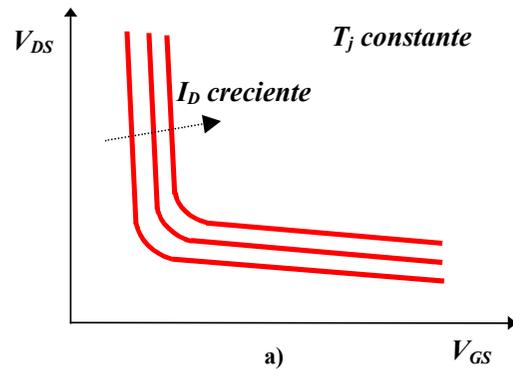
- I_{Dmax} , es la máxima corriente que no provoca latch up.
- V_{DSmax} , es la tensión de ruptura de la unión B-C del transistor bipolar.
- Limitado térmicamente para corriente continua y pulsos duraderos.
- La RBSOA se limita por la $\partial V_{DS}/\partial t$ en el momento del corte para evitar el latch-up dinámico

CARACTERÍSTICAS Y VALORES LÍMITE DEL IGBT

- I_{Dmax} Limitada por efecto **Latch-up**.
- V_{GSmax} Limitada por el **espesor del óxido de silicio**.
- Se diseña para que cuando $V_{GS} = V_{GSmax}$ la corriente de cortocircuito sea entre 4 a 10 veces la nominal (zona activa con $V_{DS}=V_{max}$) y pueda soportarla durante unos 5 a 10 μs . y pueda actuar **una protección electrónica** cortando desde puerta.
- V_{DSmax} es la tensión de ruptura del transistor *pnp*. Como α es muy baja, será $V_{DSmax}=BV_{CB0}$ Existen en el mercado IGBTs con valores de 600, 1.200, 1.700, 2.100 y 3.300 voltios. (anunciados de 6.5 kV).
- La temperatura máxima de la unión suele ser de **150°C** (con SiC se esperan valores mayores)
- Existen en el mercado IGBTs encapsulados que soportan hasta **400 o 600 Amp**.
- La tensión V_{DS} apenas varía con la temperatura \Rightarrow Se pueden **conectar en paralelo** fácilmente \Rightarrow Se pueden conseguir grandes corrientes con facilidad, p.ej. 1.200 o 1.600 Amperios.

En la actualidad es el **dispositivo mas usado** para potencias entre **varios kW** y un **par de MW**, trabajando a frecuencias desde **5 kHz** a **40kHz**.

CARACTERÍSTICAS Y VALORES LÍMITE DEL IGBT

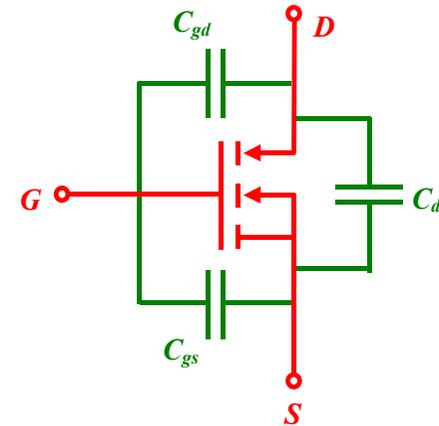


a) Efecto de V_{GS} y la corriente de drenador sobre la caída en conducción (Pérdidas en conducción). \Rightarrow Uso de V_{GS} máximo (normalmente=15V).

b) Efecto de la corriente de drenador sobre la derivada de la caída en conducción respecto a la temperatura.

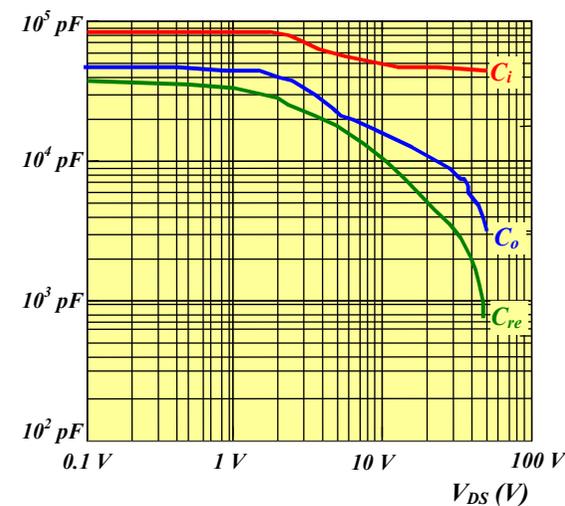
- Derivadas positivas permiten conexión en paralelo.
- Para funcionamiento de dispositivos aislados es preferible una derivada negativa, ya que al subir la corriente, sube la temperatura disminuyendo la caída de potencial (suben menos las pérdidas).
- En los **PT-IGBT**, la corriente nominal suele quedar por debajo del límite (siempre derivadas negativas) en los **NPT-IGBT**, se suele trabajar en zona de derivada positiva.

CARACTERÍSTICAS Y VALORES LÍMITE DEL IGBT



Las capacitancias que aparecen en los catálogos suelen ser:

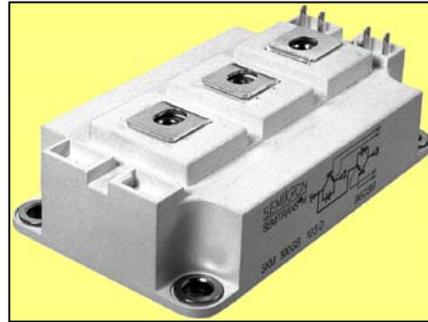
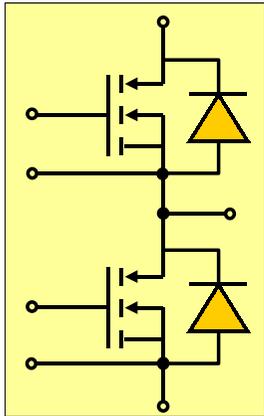
- C_{re} o C_{miller} : es la C_{gd} .
- C_i , Capacidad de entrada: es la capacidad suma de C_{gd} y C_{gs} . (Medida manteniendo V_{DS} a tensión constante).
- C_o , Capacidad de salida: es la capacidad suma de C_{gd} y C_{ds} . (Medida manteniendo V_{GS} a tensión constante).



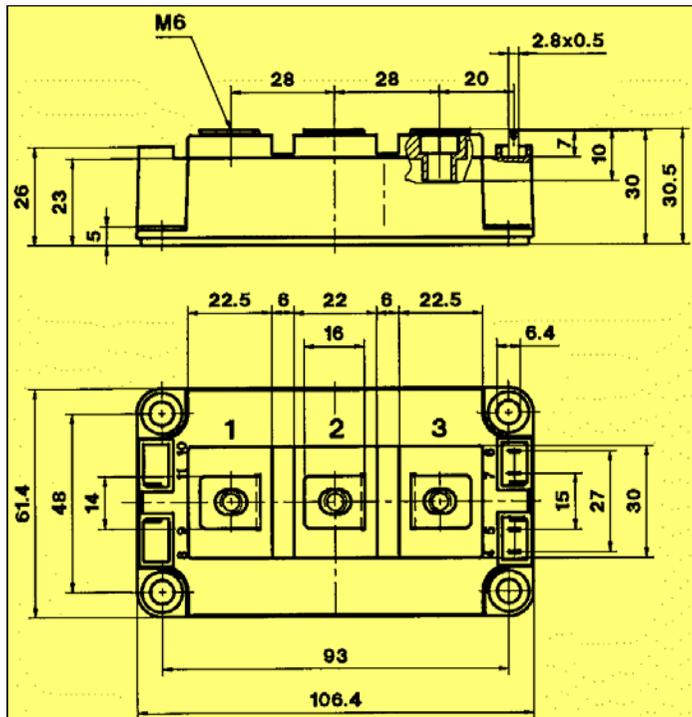
Efecto de la tensión V_{DS} sobre las capacitancias medidas en un transistor IGBT.

Puede observarse que cuando está cortado son mucho menores que cuando está conduciendo

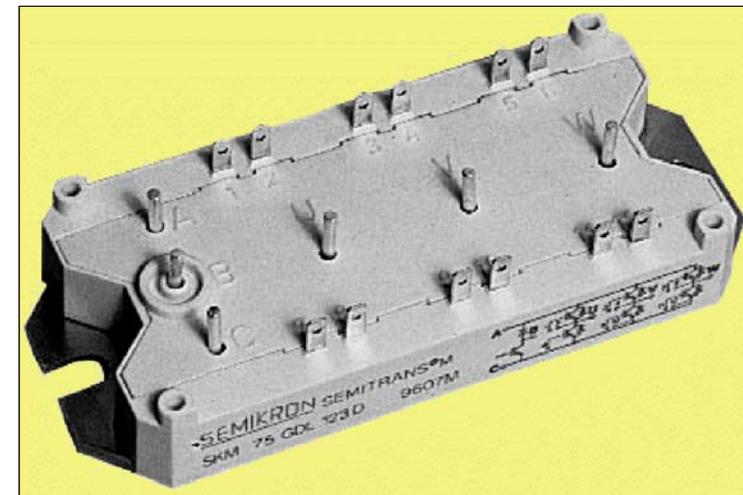
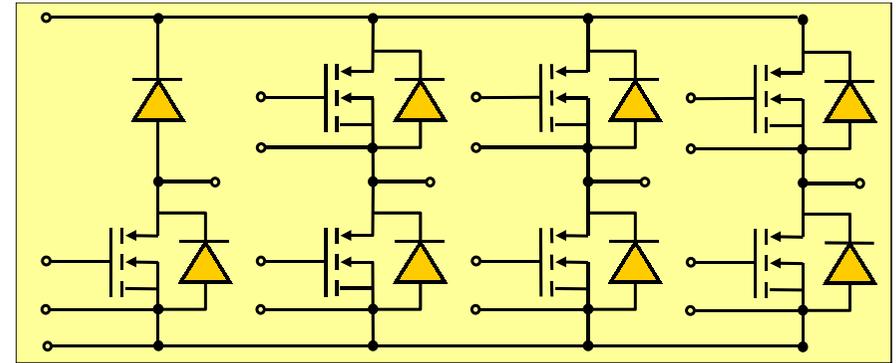
CARACTERÍSTICAS Y VALORES LÍMITE DEL IGBT



Módulo Semipuente 1200V, 400Amp



CARACTERÍSTICAS Y VALORES LÍMITE DEL IGBT



Módulo con 7 IGBT's encapsulados. 1200V, 75Amp
105x45x18mm