UNIVERSIDAD TECNOLOGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL AVELLANEDA

2011

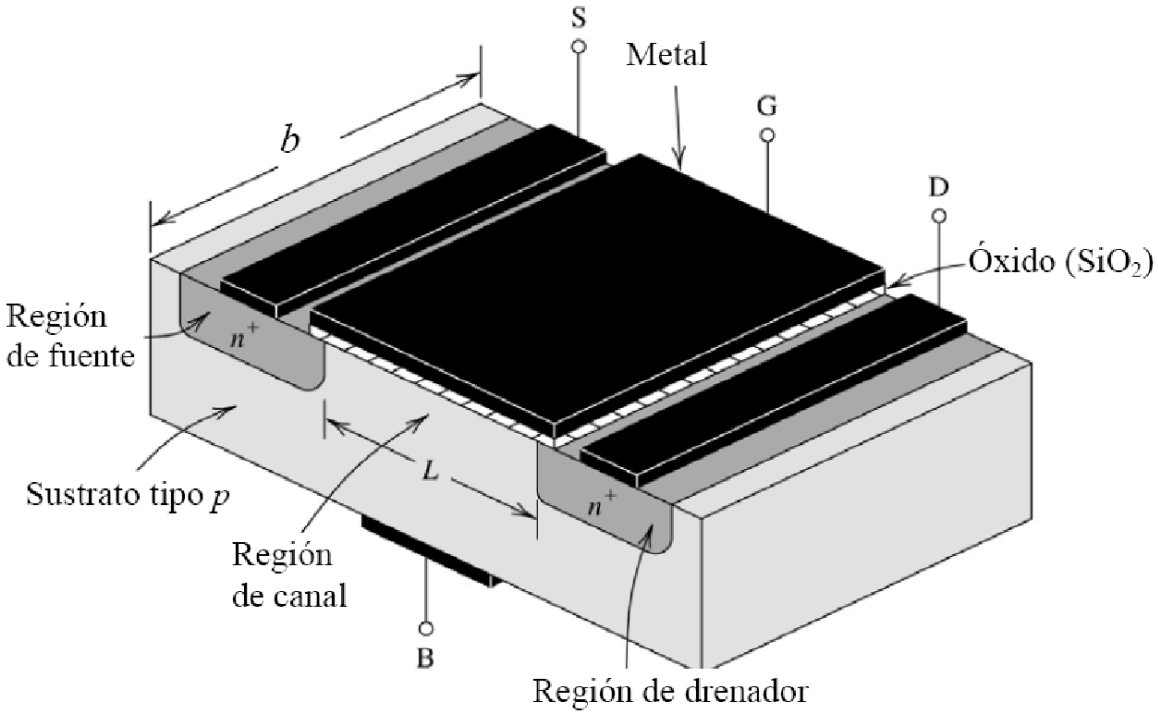
ELECTRONICA DE POTENCIA

MOSFET - IGBT

Ing. Daniel Graff
Ing. Julián Stella
Ing. Juan Pagliero
Ing. Sergio Martinez

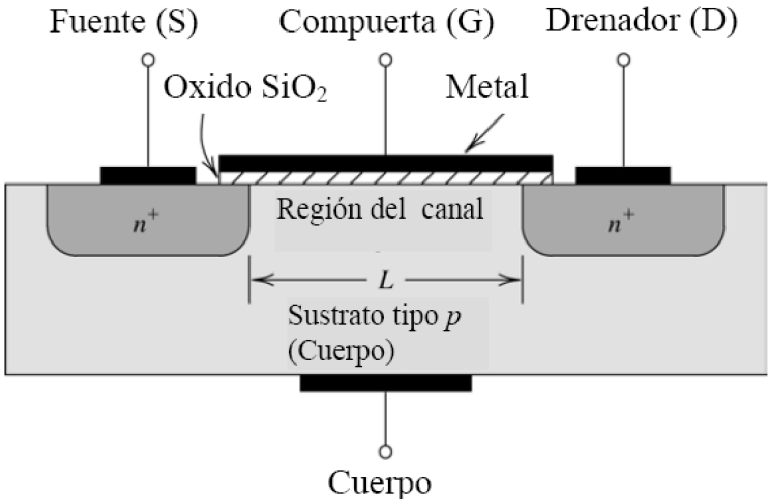
MOSFET DE POTENCIA

Un transistor MOSFET es una barra de silicio con un sector oxidado (el óxido de silicio se conoce vulgarmente como vidrio) sobre el que se produce un metalizado. Este metalizado está por lo tanto aislado de la barra de silicio pero suficientemente cercano como para cambiar la magnitud de la corriente circulante por la barra.
Existen diferentes versiones de MOSFETs en función del tipo de barra de silicio (canal tipo P y canal tipo N) y del funcionamiento del dispositivo, ya que existen MOSFET de ensanchamiento de canal y otros de estrechamiento del canal (los primeros tienen una resistencia intrínseca alta, que se reduce al aplicar tensión a la compuerta y los segundos tienen una resistencia intrínseca baja, que aumenta al aplicar tensión a la compuerta). Los cuatro tipos se individualizan por el símbolo, la flecha hacia el canal significa tipo N y la flecha hacia el lado contrario al canal significa tipo P.



El dispositivo MOSFET es perfectamente capaz de amplificar señal eléctrica y de hecho existen amplificadores de potencia basados en ellos; sin embargo *los utilizaremos como interruptor con posiciones de cierre o apertura*. El comportamiento del MOSFET es bastante distinto al de un bipolar. El MOSFET tiene sus 3 electrodos (pines) llamadas **D**RAIN, **G**ATE y **S**OURCE (drenaje, compuerta y fuente). Se utiliza aplicando tensión de entre 0 y 12V entre G y S. El G es un capacitor (del orden del pícofaradio) que tiene conectada una placa al pin y la otra placa a la pastilla interna con un dieléctrico de oxido de silicio en el medio. El D y el S se encuentran eléctricamente aislados y físicamente próximos al

capacitor de G. Al colocarle tensión entre G y S el capacitor se cargará y acumulará cargas en la pastilla interna. De esta manera, dichas cargas unirán eléctricamente al D y al S comenzando la circulación de corriente. Así con la Vgs (tensión entre G y S) se controla la ID (I de drenaje). Debido a su estructura, la característica de salida del MOSFET es una resistencia que cambia su valor en función de Vgs. Cuando el MOSFET está saturado, se especifica la RDSon en vez de la Vsat (caso de los BJT). Esto es un problema en potencias sumamente grandes. La solución dio origen a los IGBT.
La distancia entre placas del capacitor de G es de algunos pocos micrones lo que hace al G sumamente frágil a las tensiones estáticas. Por ello se obtienen los mejores resultados de los MOSFET evitando las tensiones estáticas excesivas.



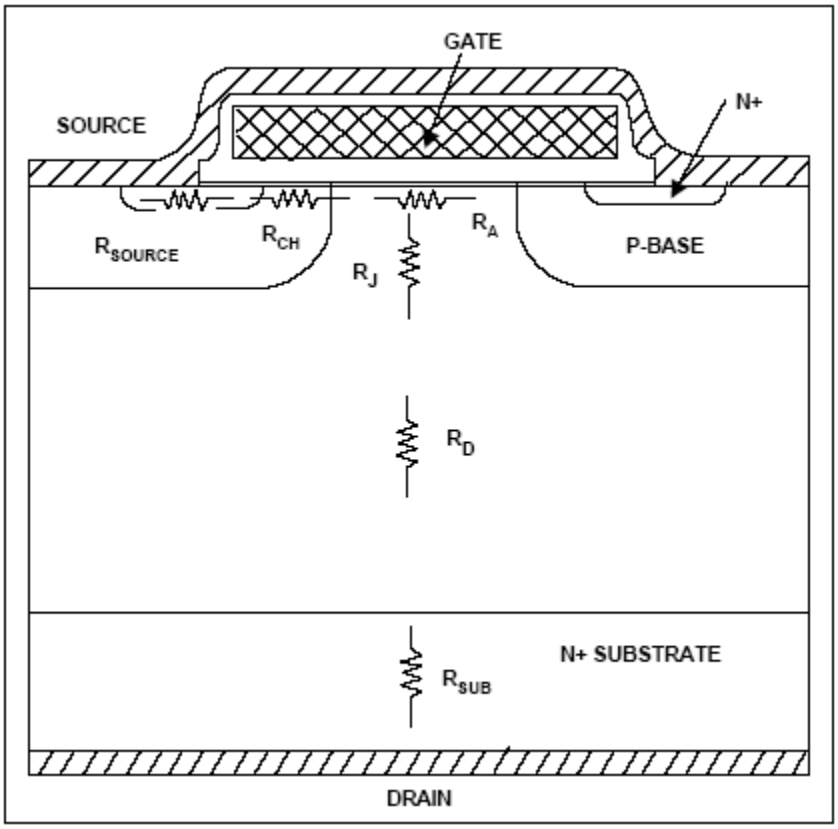
Las características de conmutación son muy buenas. El hecho que en el G se muevan pocas cargas hace que el tiempo entre encendido y apagado sea sumamente corto; al igual que a la inversa. La curva en la conmutación es una recta, ya que mientras la VDS disminuye, inyecta cargas en el G a través del capacitor DG.
Su coeficiente térmico de MOSFET es positivo, aumenta la RDSon bajando la ID. La estabilización del sistema es inmediata y sin riesgos de embalajes térmicos.



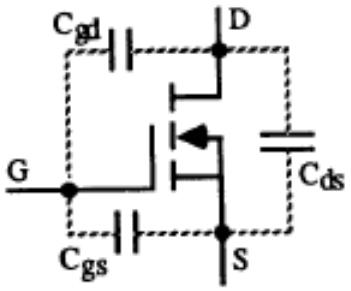
La principal ventaja del MOSFET es la prácticamente nula energía requerida en la G para manejarlo, además de su velocidad de conmutación. Si comparamos con un equivalente bipolar, que en corrientes grandes pueden tener un hfe típico de 8

o menos, el MOSFET no requiere prácticamente energía para manejarlo correctamente, mientras que en el bipolar es considerable.
Los transistores de potencia son todos de acumulación, es decir el canal de conducción no se forma hasta que no se aplica la tensión adecuada entre compuerta y fuente, no hay Mosfet de empobrecimiento, donde el canal ya esta formado, y aplicando una tensión adecuada entre compuerta y fuente lo que hacemos es estrechar el canal, aumentando la resistencia y disminuyendo de esa manera la corriente Ids.
La RDS(on) esta dada por las siguientes resistencias.

$$R_{DSon}=R_{source}+R_A+R_J+R_D+R_{sub}+R_{wcml}$$



Capacidades interelectrodicas
En la siguiente figura vemos las diferentes capacidades parásitas que pueden aparecer en un Mosfet, que son las causantes de que la conmutaciones no sean instantáneas, ya que como sabemos para que un capacitor cambie la tensión en sus bornes, es necesaria una corriente que lo cargue o lo descargue dependiendo del caso, y para ello necesitaremos cierto tiempo, que es lo que introducirá el retardo en las conmutaciones.



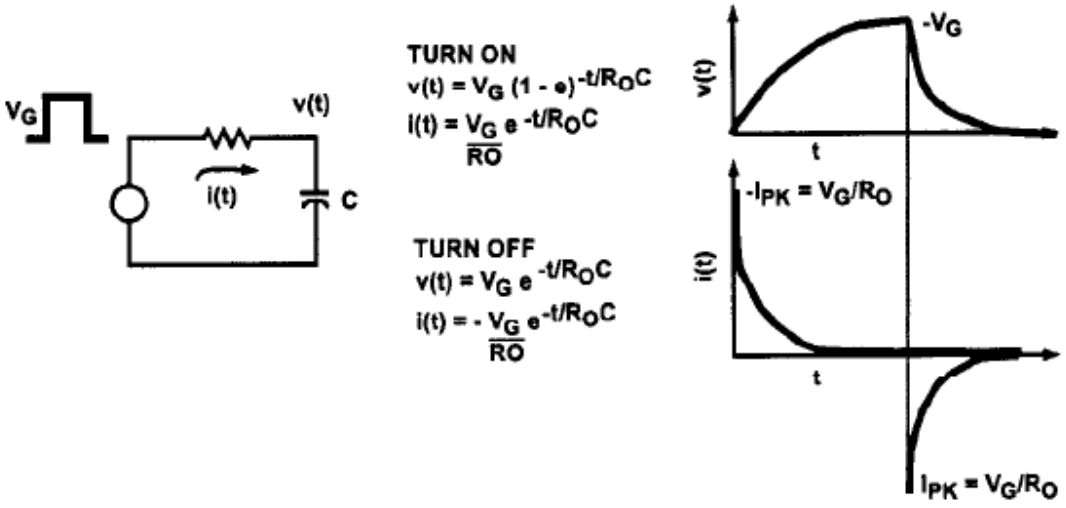
Si observamos las hojas de características de algún fabricante, vemos que los datos de las capacidades parásitas no nos los dan como las capacidades físicas: Cgd, Cds y Cgs; sino que nos los dan en forma de unas capacidades que ellos han podido medir experimentalmente. Siendo la equivalencia la siguiente:

$$Ciss = Cgs + Cgd \quad ; \text{CDS cortocircuitado}$$

$$Crss = Cgd$$

$$Coss = Cds + Cgd \quad \text{Debido a que Cgs estará cortorcicuitado}$$

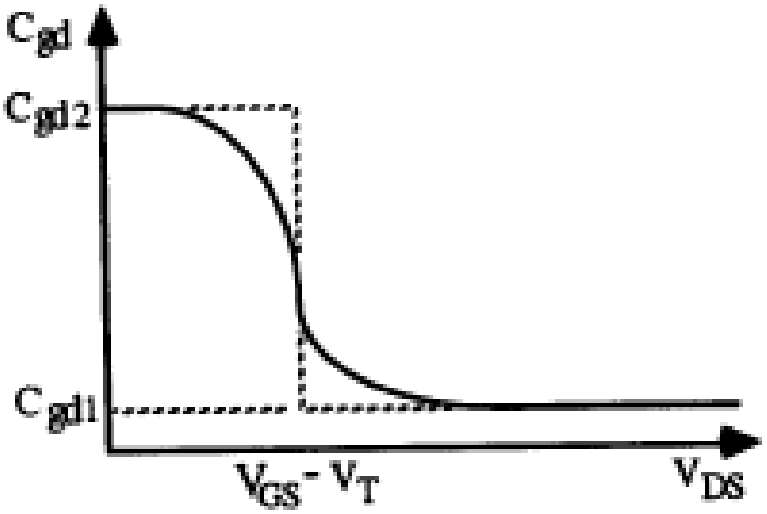
(Crss es debido al efecto Miller)



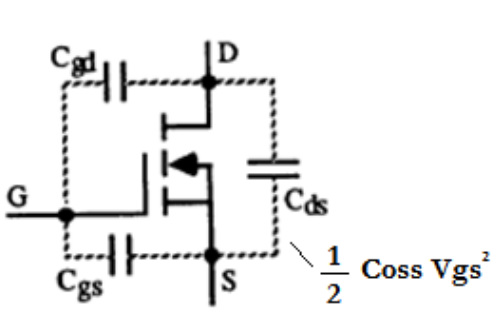
- Transistores con mucha área de silicio de alta potencia normalmente requieren un driver de mas corriente (mas complejo):

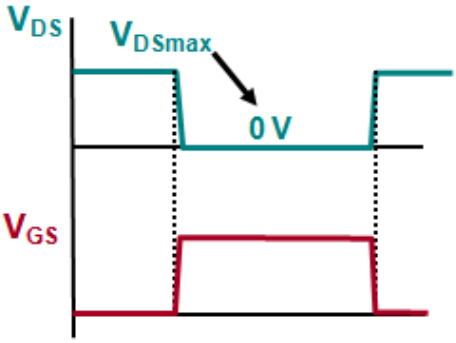
$$C_{iss} \Uparrow \rightarrow I_{G_{drive}} \Uparrow$$

- La capacidad Cgd varia con la Vgs y puede notarse que es constante alrededor de VTH

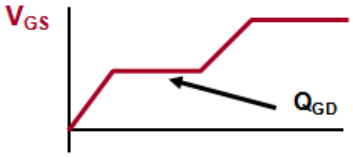


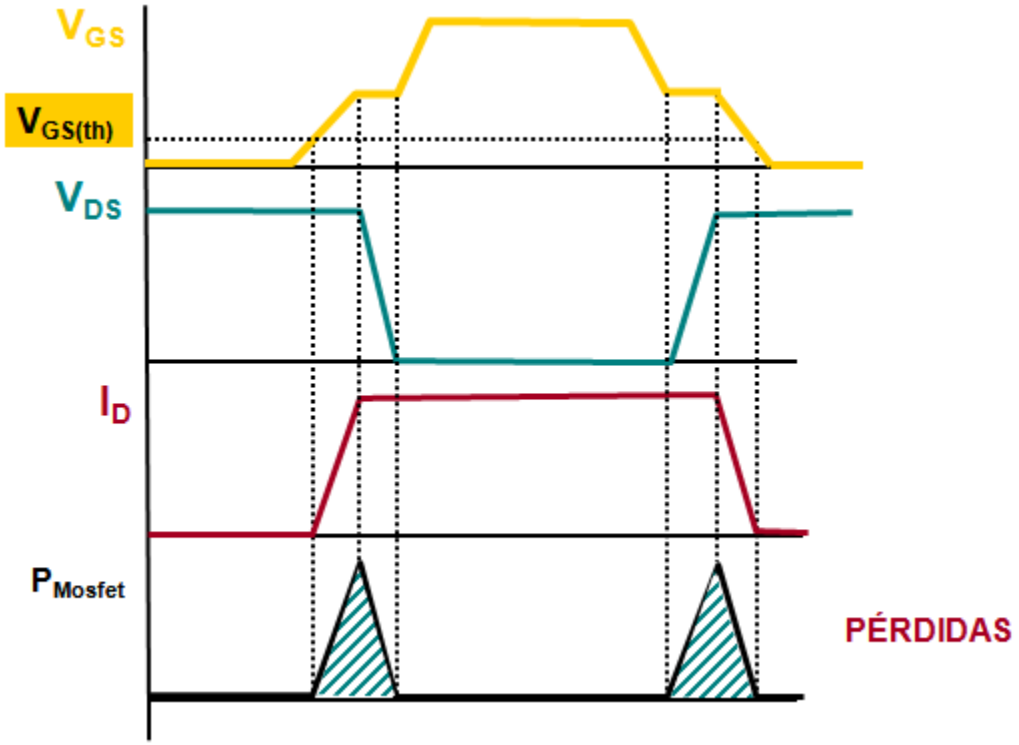
- Se necesita una cierta cantidad de energía para cargar las capacidades paracitas.



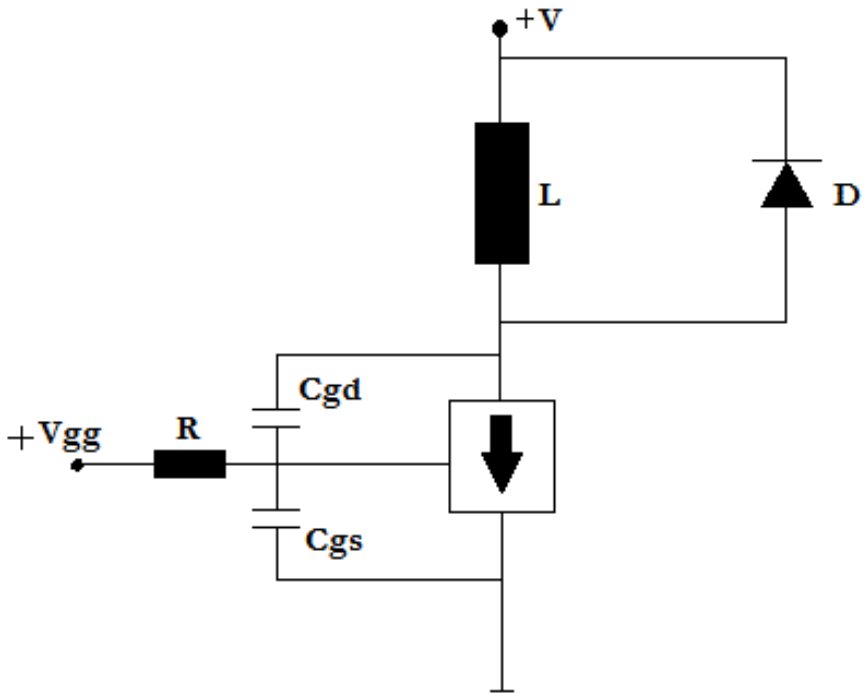


- Efecto Miller: Al cargar el capacitor de puerta se produce un cambio en Ciss debido a Crss. La forma de onda que genera este efecto es la siguiente:

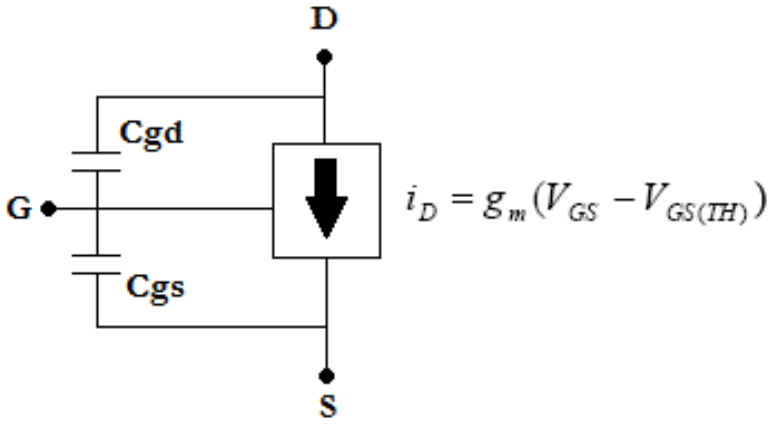




Análisis de la conmutación:
Vamos a ver en este apartado la influencia de las capacidades parásitas, como al igual que hemos comentado un poco mas arriba, vamos a necesitar un tiempo para cargar esos capacitores y la influencia que esto tendrá en las conmutaciones. El circuito mediante el cual excitaremos a la puerta lo representaremos mediante una fuente de continua y una resistencia en serie.

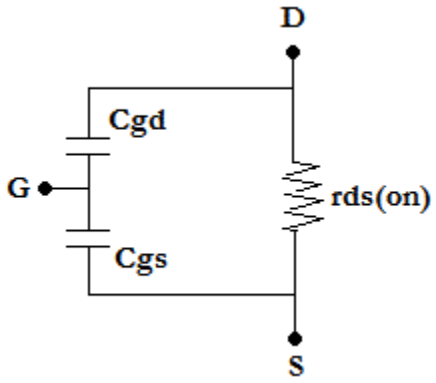


A continuación podemos ver los circuitos equivalentes para el Mosfet en las diferentes zonas de funcionamiento, esta claro que cuando la tensión Vgs no llega al nivel adecuado el Mosfet estará en off y por lo tanto se encontrara abierto, por lo que no es necesario dibujar un circuito equivalente para representarlo, ya que no será mas que un circuito abierto.
En la zona lineal, zona en la que nosotros trabajaremos lo menos posible ya que la potencia
disipada es mayor que en las otras dos zonas, el circuito equivalente es el siguiente, en el cual también colocamos las capacidades parásitas que ya hemos dicho que tiene el Mosfet. Por lo tanto vemos que el circuito equivalente para el Mosfet es una fuente de corriente, el valor de la fuente de corriente dependerá de cual sea el valor de VGS.

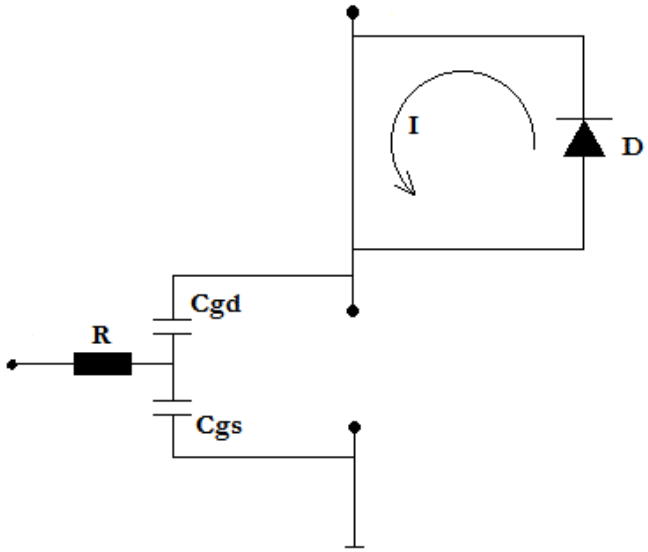


$$i_D = g_m (V_{GS} - V_{GS(TH)})$$

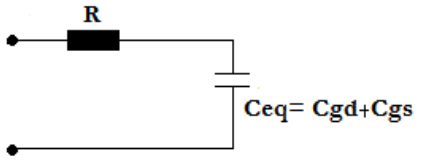
Y cuando el transistor se encuentre en la zona de On, estará en la zona Ohmica y por lo tanto se comportara como una resistencia cuyo valor es rDS(ON), y por lo tanto el circuito equivalente será:



Para realizar el estudio de la conmutación mas sencillo vamos a suponer que la capacidad
puerta drenador (Cgd), va a tener solo dos valores, uno correspondiente a cuando Vgs es pequeña, para la cual Cgd será grande, y otro para el cual Cgd es pequeña y Vgs será grande. Una vez hechas las aproximaciones oportunas para que el cálculo sea mas sencillo, vamos a suponer que nuestro Mosfet se encuentra en off, por lo tanto se encuentra abierto, y nosotros le metemos un escalón de tensión Vgs, para que pueda pasar a On. Vamos a partir de que el transistor esta en off, y por lo tanto lo sustituiremos por una rama abierta entre drenador y fuente, y por las capacidades parásitas que tiene el Mosfet, como podemos ver en la siguiente figura:



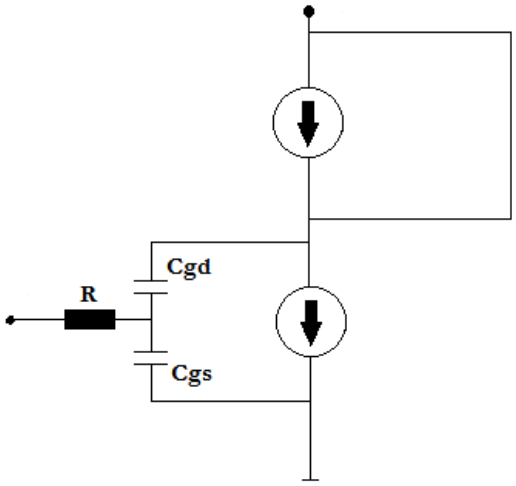
Y como sabemos hasta que la tensión Vgs no llegue a un valor mínimo Vgs(th) la corriente a través del drenador seguirá siendo nula, y seguiremos con el Mosfet abierto, pero la corriente por el terminal de puerta variara en la conmutación. Si nos damos cuenta vemos que tenemos una R correspondiente a la fuente de alimentación, y las capacidades parásitas correspondientes al Mosfet, por lo tanto tendremos un circuito RC, que se cargara de forma exponencial, lacapacidad que ve la resistencia es Cgd+Cgs, es como si ambos capacitores estarían en paralelo, por lo tanto el circuito equivalente que tendremos será:



$$\tau_1 = R_G (C_{gd} + C_{gs})$$

$$Vgg - Vgs = Rg.I$$

Con lo cual, la tensión aumentara de forma exponencial como hemos dicho, con una constante de tiempo y por lo tanto la tensión en bornes de Vgs va aumentando de forma exponencial, y cargando al capacitor Cgs, por lo tanto la corriente por la puerta ira decreciendo mediante una exponencial complementaria a con la cual aumenta la tensión, debido a que Vgg - Vgs = Rg x I. Una vez que la Vgs supera el nivel Vgs(th) la corriente por el drenador empezara a circular, en la medida que determine la característica de transferencia del Mosfet, y el nuevo circuito equivalente que tendremos será el de la siguiente figura:



Como hemos dicho la corriente por el drenador empezara a aumentar, por lo tanto como la corriente por la carga tiene que ser constante, la corriente por el diodo rueda libre deberá disminuir de manera complementaria, pero hasta que la corriente por el diodo volante no llegue a cero, o incluso al pico negativo debido a la recuperación en inversa si no lo consideramos ideal, el diodo seguirá conduciendo, por lo tanto la tensión en el drenador seguirá siendo Vd, por lo tanto nos encontramos en las señales, que la corriente entre drenador y fuente quedara

fijada a Vd mientras la corriente por el drenador aumenta, y la corriente por el diodo volante disminuya, y esta situación se dará, hasta que el diodo rueda libre se bloquee como ya hemos comentado, esta situación se mantendrá durante un tiempo tri. Por lo tanto como vemos en este punto la tensión Vds se mantiene constante, y por lo tanto la capacidad que ve la resistencia sigue siendo la misma, por lo que la evolución de la tensión Vgs seguirá con la misma exponencial que en el paso anterior.
Llegamos al tercer circuito equivalente, en el momento que la totalidad de la corriente circula por el drenador, y por lo tanto el diodo rueda libre se ha quedado sin corriente, y por lo tanto se bloquea (ver figura A).

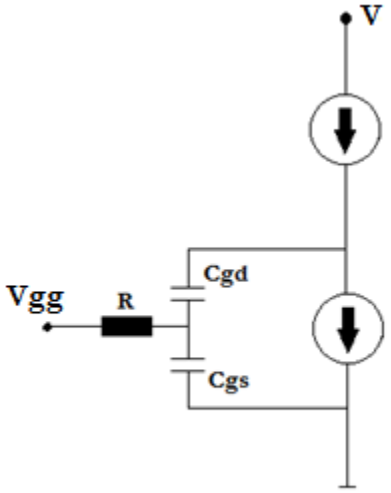


Figura A

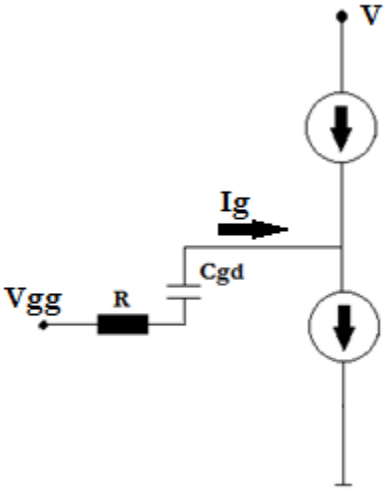
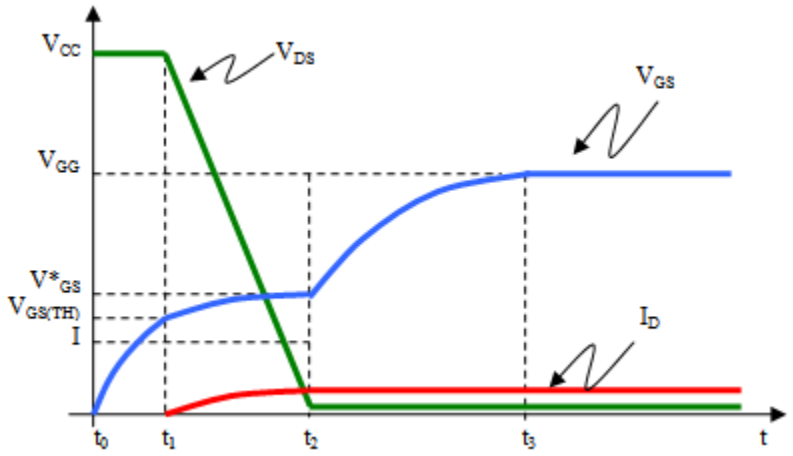


Figura B

Por lo que en este momento la tensión Vds ya no queda fijado a Vd, ya que el diodo volante ha quedado abierto, por lo tanto ahora la tensión Vds puede variar. La corriente que pasa por el Mosfet es Io, y por lo tanto si vemos en la curva característica del Mosfet vemos que para una corriente solo le puede corresponder una tensión en la entrada, eso quiere decir que si la corriente que atraviesa al Mosfet es constante, la tensión Vgs debe ser constante. Pero si una corriente circula por el capacitor parásito Cgs, estará cargando a este, y por lo tanto estará variando su tensión, pero esto hemos dicho que no puede ser, por lo tanto no puede existir corriente por el capacitor Cgs, y toda la corriente deberá ir por el capacitor Cgd (Figura B). Por lo tanto el capacitor Cgd ira cargándose, por lo tanto ira aumentado la tensión en sus bornes, y como la tensión Vgs no puede variar por que es necesario que permanezca constante para que la corriente que atraviesa al Mosfet también lo sea, eso quiere decir que la tensión Vds deberá disminuir. Pero entre puerta y fuente sigue existiendo un capacitor equivalente, y por el también deberá circular una corriente, pero sabemos que en ese capacitor no varia la tensión en sus bornes, por lo tanto la capacidad de ese capacitor tiene que ser muy grande, tendiendo a infinito, a esto se le conoce como efecto Miller, y al

capacitor equivalente que aparece entre puerta y fuente se le conoce como capacitor Miller. Por lo tanto la tensión entre drenador y fuente, ira disminuyendo hasta que tome un valor similar al de Vgs, en ese momento la capacidad de Cgd variara, teniendo así un valor mas grande, debido al cual se cargara mas lentamente y la tensión en Vds disminuirá de una manera complementaria a como sube la tensión en el capacitor Cgd, por lo tanto la pendiente con la que disminuye Vds se suavizara, pero al final la tensión Vds llegara a un valor cercano a 0V, donde permanecerá constante. En este momento nos estamos acercando al codo de la curva característica del Mosfet, es decir a la zona Ohmica con lo que la corriente por la puerta ira disminuyendo, ya que el capacitor se ira cargando a la tensión Vgg para lo que tendremos que extraer la carga que tenia y polarizarlo en sentido contrario, imaginemos que estaba cargado a 300V, tendrá que ir disminuyendo esa tensión en sus bornes mediante la extracción de carga, y luego cargarse con polaridad distinta a la tensión Vgg, y este proceso constara de varias fases que no vamos a ver. Por lo tanto una vez que se ha descargado y esta a 0V, se empezara a cargar a Vgg y la diferencia de tensión ira disminuyendo y la corriente como atraviesa a una resistencia (Rg) pues ira disminuyendo en la misma proporción, por lo que al final la corriente por la puerta tendera a cero.

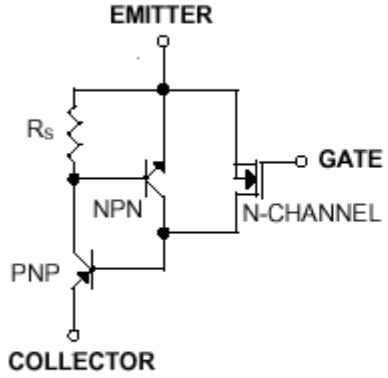


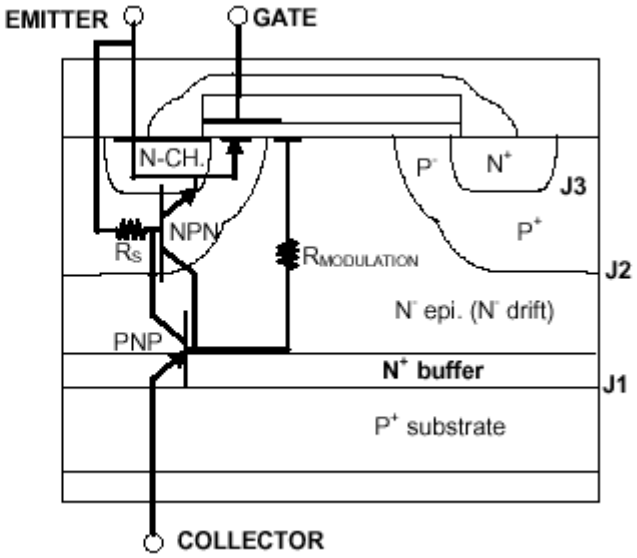
Por lo tanto como hemos visto, lo que determinan los tiempos de conmutación son Rg y las
capacidades parásitas del transistor, ya que hemos visto que los circuitos equivalentes eran
circuitos RC, por lo que para acelerar las conmutaciones deberemos disminuir estos parámetros, pero no podemos actuar sobre las capacidades parásitas, por lo que sobre lo único que podremos actuar para acelerar las conmutaciones será sobre la Rg. El fabricante nos suele dar una gráfica, en la que se nos especifica la carga que circulara por el terminal de puerta, para cargar la capacidad Cgs al valor de tensión que deseemos.

TRANSISTORES BIPOLARES DE COMPUERTA AISLADA
IGBT

Los IGBT al igual que los MOSFETs, son dispositivos de 3 terminales controlados por voltaje, transportan corriente verticalmente, ofrecen una alta impedancia de entrada y una baja resistencia de salida, tienen áreas de operación segura muy amplia, no presentan el fenómeno de avalancha térmica, son fáciles de controlar porque prácticamente no exigen corriente de entrada, toleran razonablemente picos de corriente, pueden ser conectados en paralelo para aumentar capacidad de manejo de corriente.
Los IGBT tiene características de conducción superiores y actualmente no son tan rápidos como los MOSFETs de potencia, sus características de conmutación tienden a ser muy parecidas, Estos ofrecen una resistencia de conducción [Rce(on)] típicamente inferior a 10mΩ que es significativamente más baja que la de MOSFET bajo las mismas condiciones de trabajo. Como consecuencia de esto, tiene una mayor capacidad de corriente, baja disipación de calor en conducción de altas corrientes y un alto factor de amortiguamiento con cargas inductivas como relés, solenoides, motores, parlantes etc.

Estructura





El IGBT ofrece a los usuarios las ventajas de entrada MOS, más la capacidad de carga en corriente de los transistores bipolares:

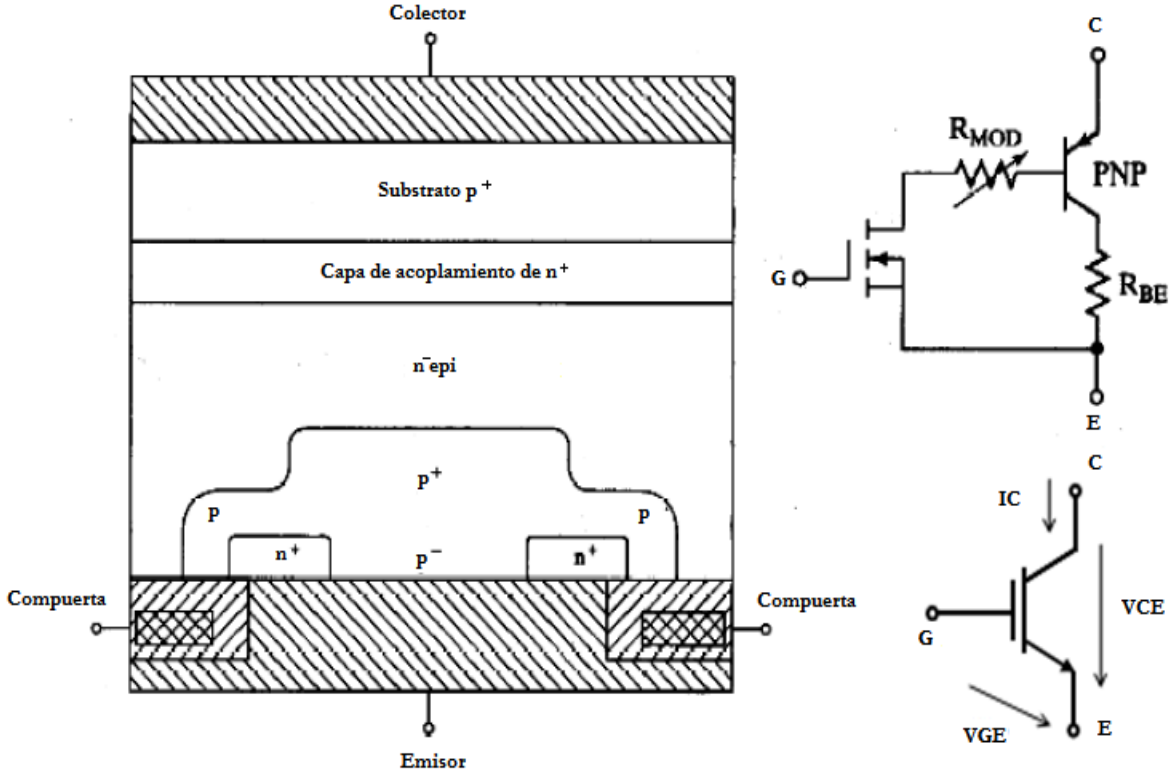
- Trabaja con tensión.
- Tiempos de conmutación bajos.
- Disipación mucho mayor (como los bipolares).

Interesa que el transistor se parezca, lo más posible, a un elemento ideal:

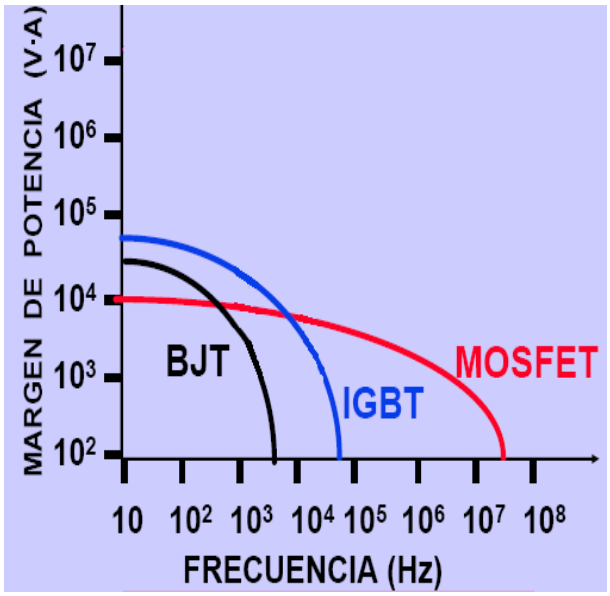
- Pequeñas fugas.
- Alta potencia.
- Bajos tiempos de respuesta (ton , toff), para conseguir una alta frecuencia de funcionamiento.
- Alta concentración de intensidad por unidad de superficie del semiconductor.
- Que el efecto avalancha se produzca a un valor elevado (VCE máxima elevada).
- Que no se produzcan puntos calientes (grandes di/dt).

Una limitación importante de todos los dispositivos de potencia y concretamente de los transistores bipolares, es que el paso de bloqueo a conducción y viceversa no se hace instantáneamente, sino que siempre hay un retardo (ton , toff). Las causas fundamentales de estos retardos son las capacidades asociadas a las uniones colector - base y base - emisor y los tiempos de difusión y recombinación de los portadores.

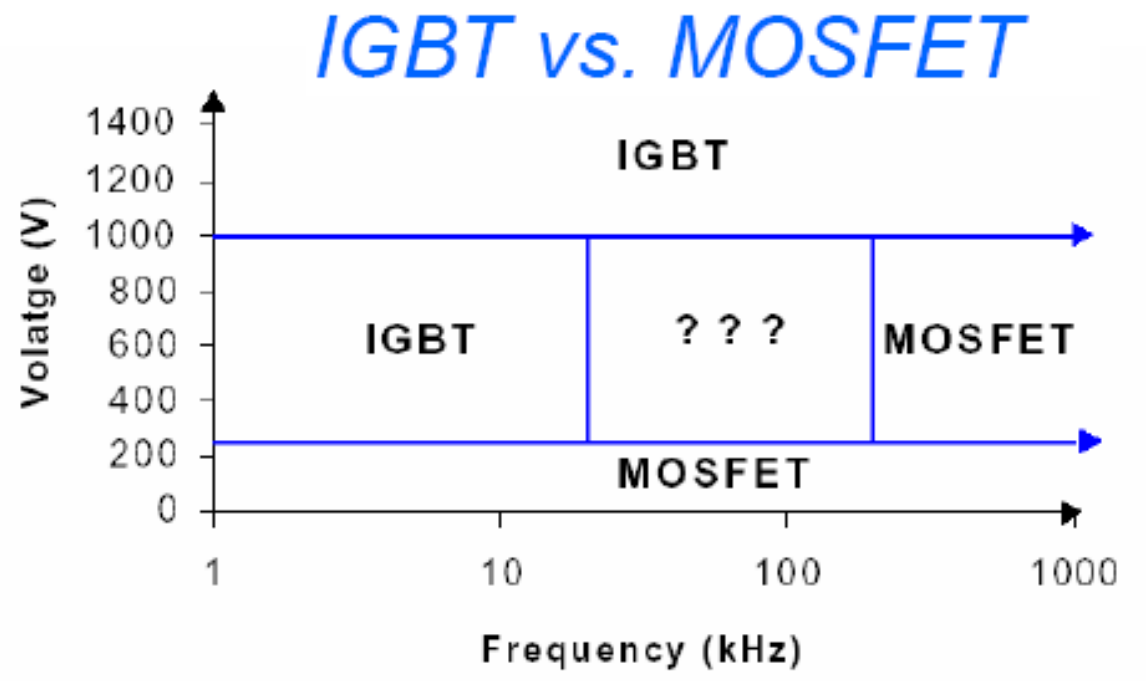
El IGBT combina las ventajas de un BJT y un MOSFET



	DIFICULTAD DE GOBIERNO (ENCENDIDO-APAGADO)	FRECUENCIA MÁXIMA DE CONMUTACIÓN	ROBUSTEZ	PROPIEDADES ESPECIALES
TRANSISTORES BIPOLARES	MEDIA: CIERTO CONSUMO DE CORRIENTE POR PUERTA	BAJA: DEL ORDEN DE 20kHz	ALTA	MANEJO DE ALTAS POTENCIAS Y TENSIONES
TRANSISTORES MOSFET	BAJA: CONSUMO POR PUERTA MUY REDUCIDO	ELEVADA: DEL ORDEN DE 1MHz	MEDIA	RESISTIVO EN CONDUCCIÓN: RESISTENCIAS MUY BAJAS
IGBTS	BAJA: CONSUMO POR PUERTA MUY REDUCIDO	MEDIA: ENTRE BIPOLARES Y MOSFET	ALTA	MANEJO ALTAS POTENCIAS Y TENSIONES. MENORES PÉRDIDAS QUE MOSFET

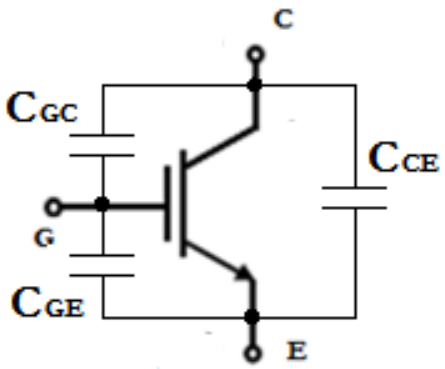


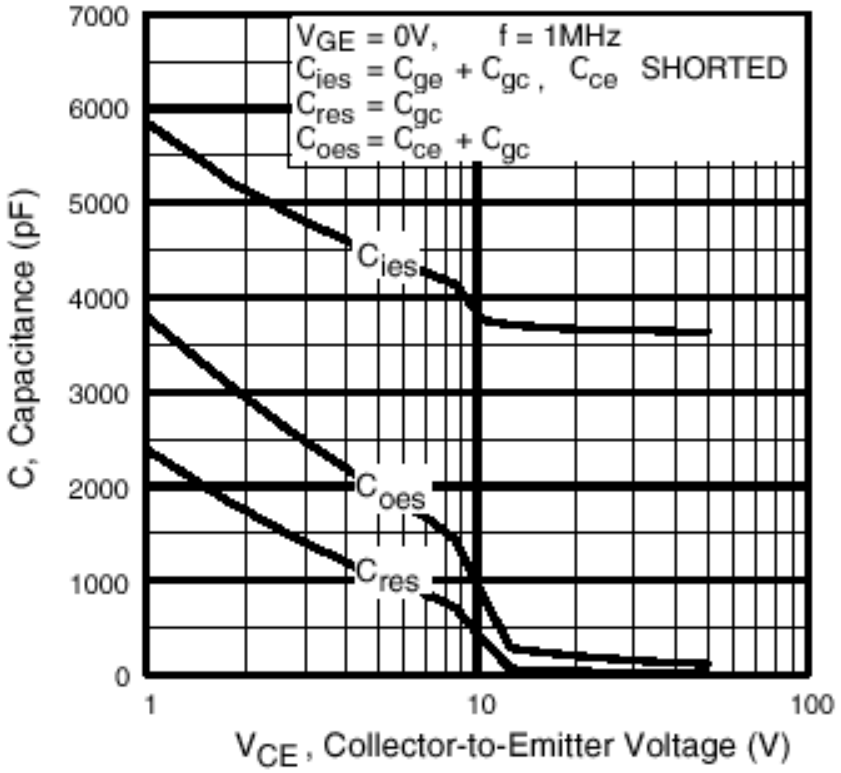




Capacitores interelectródicos del gate

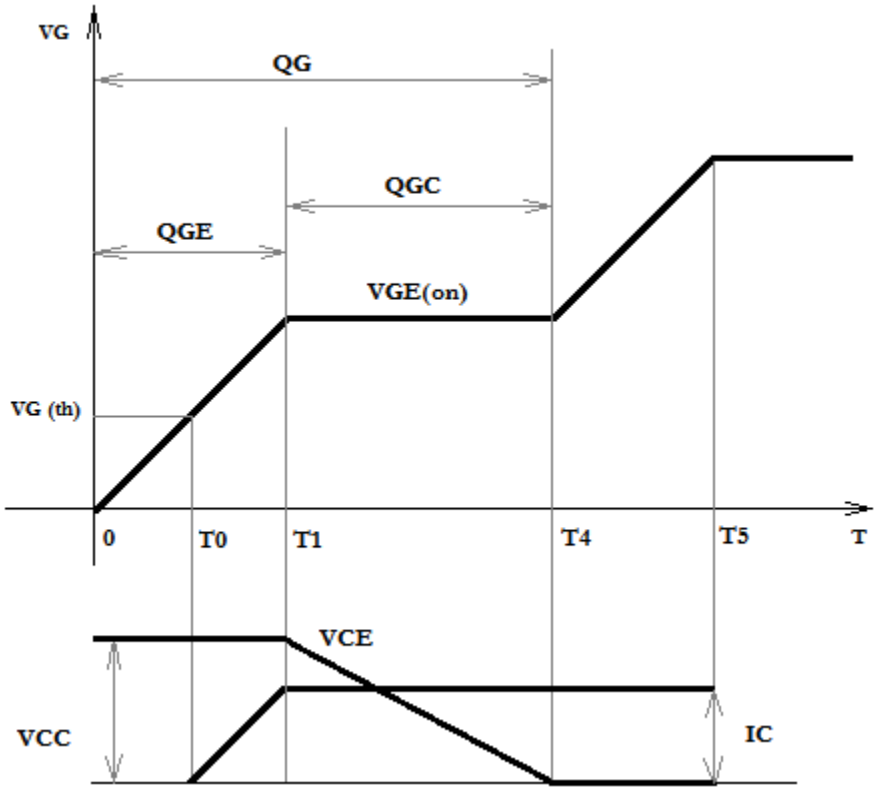
La capacitancia de salida (Coes) tiene una típica dependencia de tensión de una juntura P-N. La capacitancia de transferencia inversa (Cres) también llamada Miller es fuertemente dependiente de la tensión (inversamente proporcional), pero de una manera más compleja que la capacitancia de salida. La capacitancia de entrada (Cies) la cual es la suma de las capacitancias entre gate – emisor y entre gate - colector, muestra la misma dependencia de la tensión de la capacitancia Miller pero de una manera mas atenuada ya que Cge es mucho más grande e independiente de la tensión.





Carga del gate

Los diseñadores no familiarizados comienzan a diseñar el circuito driver basados en los valores de capacitancia de entrada listados en las hojas de datos. El capacitor entre el gate y el emisor (Cge) es afectado en función de la tensión aplicada, pero el capacitor entre el gate y el colector (Cgc) es mucho más significativo y mas dificultoso de ser tratado porque es una función no lineal afectada por la tensión. El efecto provocado por este ultimo capacitor interelectródico es llamado efecto Miller, un fenómeno por el cual un camino de realimentación existe entre la entrada y la salida de un dispositivo, esto afecta la capacitancia dinámica total de entrada generalmente mayor que la suma de los valores estáticos. El Cgc aunque es un valor más pequeño en valor estático que la Cge, tendrá una excursión de tensión 20 veces mas que este último, por lo tanto el capacitor Miller requerirá mas carga que el capacitor de entrada. Para evitar estos inconvenientes el fabricante especifica el valor de carga de gate definido como el valor que debe ser aplicado para lograr una completa conmutación durante el encendido.



La carga del gate es el producto de la corriente de entrada (Ig) y el tiempo de conmutación (tsw), este simple calculo inmediatamente le dice al diseñador cual es la cantidad de corriente necesaria que el driver necesita entregar para lograr el tiempo de conmutación requerido por la etapa de potencia. El circuito de prueba se logra aplicando una corriente constante al gate del dispositivo, para que la escala de tiempo horizontal sea directamente proporcional a la carga aplicada al gate con un factor de escala adecuado. El oscilograma obtenido de la figura 8 de la hoja de datos muestra la tensión de gate versus la carga.