

MOSFET O FET DE PUERTA AISLADA.-

El transistor FET de puerta aislada (IGFET), denominado también MOSFET (FET-METAL-OXIDO-SEMICONDUCTOR), tiene un aislante (que es dióxido de silicio), entre la puerta y los otros elementos, además de una unión P-N como el FET de unión (JFET).

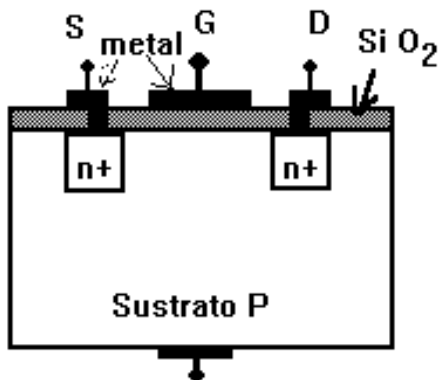
Existen dos tipos constructivos de MOSFET:

- a) De Enriquecimiento o ensanchamiento.
- b) De Agotamiento o estrechamiento.

El (b) MOSFET de Agotamiento, es similar su funcionamiento al (JFET) Sobre un sustrato de tipo P o N.

a) MOSFET DE ENRIQUECIMIENTO.-

Se parte de un sustrato P de alta resistividad (poco dopado) sobre el que se disponen dos zonas de material tipo N altamente dopado.



Posteriormente la superficie externa se cubre con una capa de Si O_2 . A continuación se abren unas ventanas en el Si O_2 ; para hacer contacto con las zonas tipo N, se deposita entonces metal sobre las ventanas, para formar los terminales, drenador y fuente y también entre la zona D y S, pero separado de estos, para formar la puerta. De este modo se obtiene una puerta aislada, del D y S, mediante la

capa de dióxido de silicio. Este electrodo de puerta (metálico) conjuntamente con la capa de Si O_2 , aislante como dieléctrico y el canal semiconductor, forman un condensador de placas paralelas. La capa de dióxido proporciona una resistencia de entrada muy elevada para el TRT MOS, del orden de $10^{15} \Omega$.

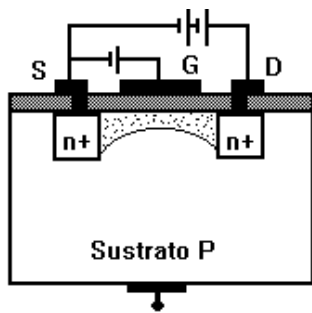
Al aplicar a esta configuración, una tensión positiva al D y negativa a la fuente, dejando la puerta aislada, se conseguirá únicamente que el sustrato tipo P, actúe como elemento resistivo permitiendo una circulación muy débil debido a la alta resistividad del sustrato (y a que se forman dos diodos en oposición D-Sustr y Sustr-S), se reconecta ahora la puerta a una tensión positiva respecto a la fuente, y el sustrato lo ponemos ahora al potencial de tierra (0v) aparecerá un E (campo eléctrico) al Si O_2 , que induce portadores de carga negativas en el sustrato, que van aumentando conforme aumenta la tensión de puerta.

Estos portadores de carga inducidos, son portadores minoritarios (electrones) dentro del sustrato P.

Es decir, se produce una redistribución de carga debido a la unión Metal - Aislante (oxido) - semiconductor.

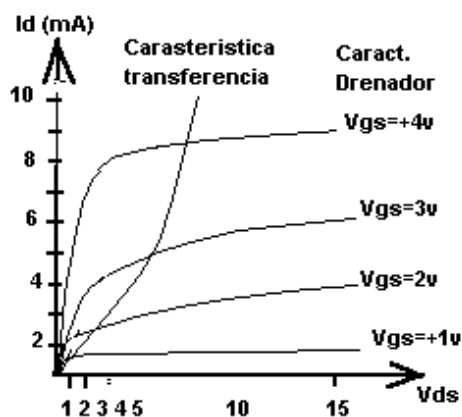
Estos e^- son atraídos hacia la placa metálica de la G debido a que tiene potencial positivo, pero sin llegar a ella debido a la capa de SiO_2 , y repelidos los huecos ó cargas positivas. El resultado es una región de agotamiento cercana al SiO_2 con ausencia de huecos.

Se forma así un canal N, debajo de la puerta debido a que esta tiene potencial positivo, y que desde D a S y que hará circular una corriente de Drenador cuya magnitud depende del nº de portadores de carga inducidos por la puerta positiva \Rightarrow que el potencial de puerta controla, de este modo la corriente de Drenador (I_D).



Como quisiera que la conductividad del canal es mejorada o enriquecida por la polarización positiva de puerta \Rightarrow se conoce con el nombre de "IGFET o MOSFET de enriquecimiento" o ACUMULACIÓN

* Las características de drenador y transferencia se muestran en la figura.

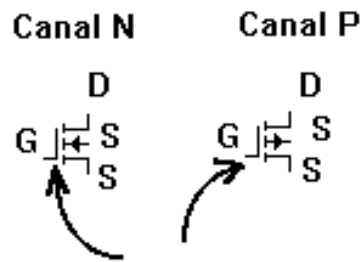


Observamos que la corriente de D se incrementa, con el aumento positivo de la tensión de polarización puerta - fuente (V_{GS}).

Debido además a que la puerta del MOSFET o IGFET está aislada no existe corriente de dispersión con el dispositivo (no existe corriente de puerta), lo que hace que tenga una alta impedancia de entrada, que en algunos casos es $> 10^{15} \Omega$.

Se pueden construir MOSFET con canal P, partiendo de un sustrato tipo N y difundiendo impurezas tipo P para formar la S y el D.

Los símbolos son:



Este espacio constituye la capa de dióxido de aislante.

Es decir : Aquí no existe canal y ni la puerta se deja flotante $V_{GS} = 0 \Rightarrow$ que de D a S \Rightarrow hay dos diodos en serie y en oposición \Rightarrow no circula corriente (o pequeña) \Rightarrow para que circule corriente de D a S hay que crear un canal n, que se hace aplicando un voltaje positivo a la fuente V_{GS} .

Si $V_{GS} = \text{cte.} \Rightarrow$ la $I_{DS} \uparrow$ aumentando V_{DS}

Si I_{DS} o I_D crece linealmente con $V_{DS} \Rightarrow$ que estará en la región óhmica (las curvas son aproximadamente lineales en esta zona) y el dispositivo se comporta como una resistencia.

La $V_{GS} > 0$ (positivo) hará que se acumulen electrones en la superficie y por debajo de la capa de dióxido.

Para atraer los suficientes electrones para crear el canal, para el cual con una V_{DS} moderada, se tiene una I_D apreciable (unos nanoamperios), estaremos en la tensión umbral $V_{GS} = V_T$ o V_P .

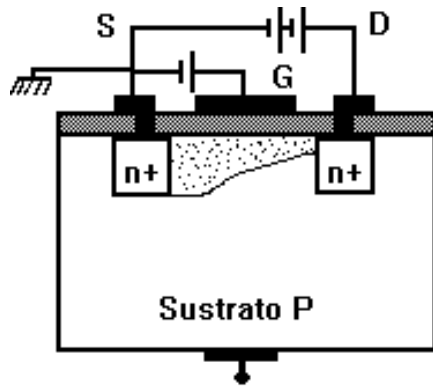
Es decir : no fluirá una corriente apreciable I_{DS} hasta que $V_{GS} = V_T$

La conductancia del canal depende de V_{GS} .

Considérese ahora el caso en donde V_{DS} es pequeño, e incrementara a V_{GS} por encima de $V_T \Rightarrow V_{GS} > V_T \Rightarrow$ que el canal creado se ensanche y su resistencia decrecerá, la I_D irá aumentando \Rightarrow estará en la región dinámica, (resistencia controlada por tensión "VCR").

Consideramos ahora que ocurrirá si se mantiene a $V_{GS} = \text{cte.}$ a $V_{GS} = V_T + V$ donde V es un voltaje positivo y se incrementa $V_{DS} \Rightarrow$ el canal se mantendrá con un ancho cte. en el extremo de la fuente, ya que V_{GS} es cte.

Sin embargo ya que $\uparrow V_{DS} \Rightarrow V_{DG} \uparrow$ ó en forma equivalente $V_{GD} \downarrow \Rightarrow$ que el canal se volverá más estrecho en el extremo de Drenaje.



La V_{DS} hace que esta unión D(N)-Sustr(P) se polariza inversamente por lo que la Z.T. de esta unión, debilita el canal en las proximidades de la zona N de drenador y llega un momento en que se produce el estrangulamiento del canal, es decir la conductancia del canal disminuye e I_D crece pero más lentamente \Rightarrow nos acercamos a la zona de saturación.

De hecho el canal va a tener una forma piramidal mas ancha en el extremo de la fuente y más estrecha en el extremo de drenaje $\Rightarrow \uparrow V_{DS} \Rightarrow \uparrow$ Resist. del canal dando lugar a una curva no lineal $I_D - V_{DS}$ en la región ohmica.

Este proceso continuará hasta que finalmente el ancho del canal llegue a cero en el extremo del drenaje.

Esta condición de estricción o estrangulación o de saturación se alcanzará cuando $V_{GD} \leq V_T$.

Para apreciar este hecho, recuérdese que el voltaje de puerta tuvo que aumentarse hasta V_T con el fin de crear el canal. Se considera que para hacer que el canal desaparezca en el extremo del Drenaje, tiene que reducirse el voltaje de puerta a Drenaje V_{GD} , por debajo de V_T .

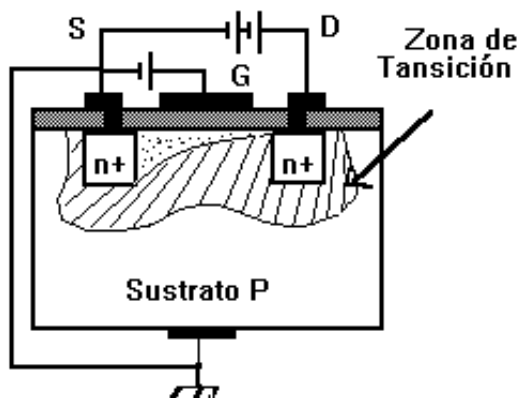
En nuestro caso $V_{GS} = V_T + V$; de esta manera ocurrirá el estrangulamiento cuando :

$$V_{GD} \leq V_T \quad \text{ó} \quad V_{DS} \geq V$$

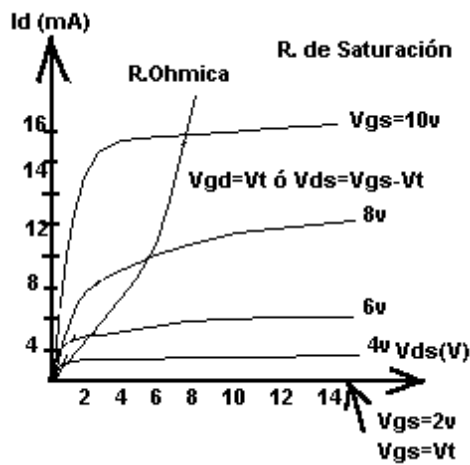
$$V_{DS} = V_{DG} + V_{GS} \quad \text{ó} \quad V_{DS} = V_{GS} - V_{GD}$$

$$\text{Si } V_{GD} = V_T \Rightarrow V_{DS \text{ sat}} = V_{GS} - V_T = V_T + V - V_T = V$$

$$\text{Si } V_{GD} < V_T \Rightarrow V_{DS} = V_T + V - (\downarrow V_T) \Rightarrow V_{DS} \geq V$$



El incremento del voltaje de Drenaje por encima del valor para estricción \Rightarrow no cambiará la forma del canal; por lo tanto la corriente I_D se mantendrá cte. al valor alcanzado en el arranque de la estricción o saturación.



La figura muestra las características (I_D - V_{DS}) donde existen dos regiones:

- Región óhmica.
- Región de estricción o saturación.

La frontera entre estas dos regiones se determina por $V_{GD} = V_T$ ó de forma equivalente :

$$V_{DS} = V_{GS} - V_T$$

es decir

$$V_{DS} \leq V_{GS} - V_T \quad \text{Región óhmica} \Rightarrow \text{hay canal}$$

y

$$V_{DS} \geq V_{GS} - V_T \quad \text{Región de Saturación}$$

En la Región óhmica las características I_D - V_{DS} , se describen mediante la relación parabólica :

$$I_D = (2 \cdot I_{DSS}) / V_T^2 \cdot ((V_{GS} - V_T) - (V_{DS} / 2)) \cdot V_{DS}$$

$$I_D = \beta ((V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{1}{2} (V_{DS})^2)$$

la β cte. depende entre otras cosas de la geometría del dispositivo:

$$\text{aquí } V_{GD} < V_T \quad \text{y} \quad V_{DS} < V_{GS} - V_T$$

En la región saturada la $I_D = \text{cte.}$ para un valor dado de V_{GS}

$$\text{la } I_D = \frac{1}{2} \beta (V_{GS} - V_T)^2$$

donde $V_{GD} \geq V_T$ y $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$

Cuando $V_{GS} = 0 \Rightarrow I_D \approx 0$; y para que el dispositivo conduzca V_{GS} , tiene que exceder al voltaje de umbral V_T .

La estricción ó estrangulamiento ocurre cuando:

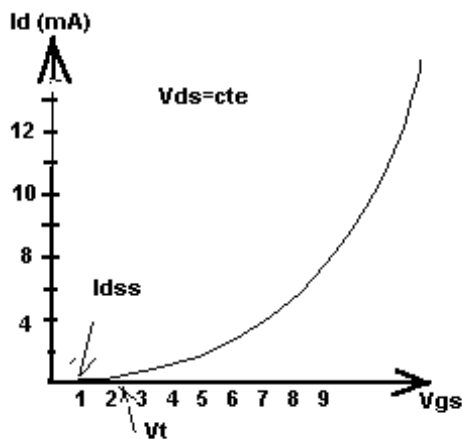
$$V_{DS} = V_{GS} - V_T$$

sustituyendo en a) da como resultado la ecuación de la línea de la frontera (que es la línea de puntos)

$$I_D = \frac{1}{2} \beta (V_{DS})^2$$

Para la terminología moderna de MOS al voltaje umbral V_T , que es un número positivo para los dispositivos del canal N, es de 1 ó 3 voltios.

CARACTERISTICA DE TRANSFERENCIA



Tal característica estará trazada evidentemente como puede deducirse de la característica de salida a una $V_{DS} = \text{cte.}$; se observa la tensión umbral V_T por debajo de la cual, la corriente es prácticamente nula.

Sobre esta tensión umbral, vemos de

las características del MOSFET, que V_{DS} no tiene prácticamente ninguna influencia.

Una vez separada la tensión umbral I_D crece lentamente al principio y después con mayor rapidez.

El valor de la corriente para V_T es muy pequeño como hemos dicho (μA) y se llama I_{DSS} .

La capa de SiO_2 es extremadamente delgada por lo que puede dañarse fácilmente por exceso de tensión. Con frecuencia las MOS traen un diodo zener entre la puerta y sustrato como protección.

El MOSFET que hemos estudiado es de canal N y se llama también NMOS.

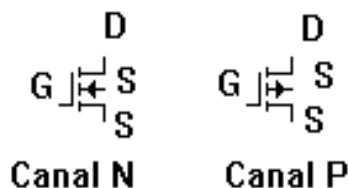
También existen de canal P, y se llaman PMOS son idénticos al N, pero intercambiando las zonas N y de sustrato P.

Las tensiones y corrientes son opuestas:

V_{GS} por V_{SG}

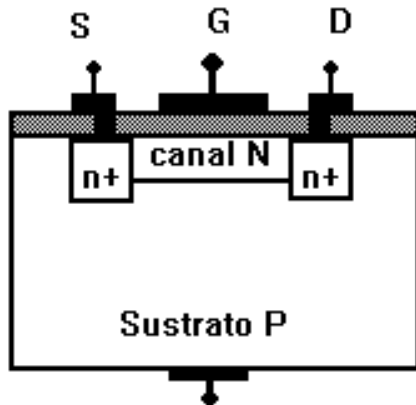
V_{DS} por V_{SD} y V_T por $|V_T|$

símbolo:



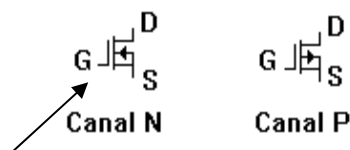
MOSFET TIPO AGOTAMIENTO, ESTRECHAMIENTO Ó DEPLEXIÓN .-

Su construcción es similar, a la del tipo de enriquecimiento, pero ahora se introduce un canal tipo N, ligeramente dopado, entre dos zonas fuertemente dopadas que forman el drenador y la fuente.



Mientras el JFET, se controla por la unión P-N de puerta a canal, tal unión no existe en el MOSFET la capa de dióxido actúa como un aislador, que ocasiona que la corriente de puerta sea despreciable por pequeña, de 10^{-12} a 10^{-15} A, este hecho le da al transistor MOS su resistencia de entrada extremadamente alta bajo cualquier condición.

Símbolo del circuito :



Este espacio constituye la capa de dióxido de aislante.

Con el JFET, al terminal de puerta se dibuja mas cerca de la fuente que del drenaje y la flecha sobre el sustrato apunta en sentido directo de la unión P-N, del sustrato al canal y en consecuencia indica el tipo ó polaridad del dispositivo (de canal N ó P).

En la mayor parte de las aplicaciones, el sustrato se encuentra directamente (eléctricamente) a la fuente.

Ya que el voltaje de drenaje será positivo, respecto de la fuente, la unión sustrato a canal, tendrá siempre polarización inversa, y la corriente de sustrato será casi cero, en adelante se ignorará el papel del sustrato en la descripción de la operación del MOSFET.

El símbolo simplificado del MOSFET de canal N



La polaridad del dispositivo se indica mediante la dirección de la punta de flecha sobre la línea de fuente, esta flecha apunta en la dirección normal del flujo de la corriente en la conexión de la fuente.

COMPARACIÓN ENTRE TRANSISTORES PMOS Y NMOS.

Cronológicamente se emplearon los transistores de canal P (PMOS), por ser de fabricación más fácil, tener mejor rendimiento y ser más fiable que los de canal N.

Hoy modernamente, las mejoras en la fabricación, han hecho imponerse a los NMOS y salvo la tecnología CMOS, los dispositivos PMOS han quedado obsoletos por lo siguiente:

*La movilidad de los huecos en el silicio con campos eléctricos, normales, de $500 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{seg}$, es menor que la de los electrones $1.300 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{seg}$, en dispositivos de iguales dimensiones, por lo que la corriente en un transistor PMOS es menor de la mitad de un NMOS, y la resistencia ON de un MOSFET de canal P es casi tres veces la de un N.

Por lo que para tener los mismos valores de resistencia y corriente que en un NMOS debe de aumentarse la relación W/L de un PMOS para tener en cuenta la menor movilidad de los huecos.

Superficie PMOS > NMOS al menos tres veces.

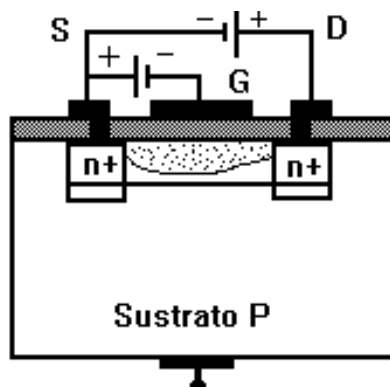
FUNCIONAMIENTO DEL MOSFET.

Este MOSFET de agotamiento opera en mucho como el JFET la diferencia fundamental estaría en que en el JFET el canal se agota por la unión de puerta a canal, de polarización inversa, y en el MOSFET en ancho del canal se efectúa mediante un campo eléctrico, creado por el voltaje en la puerta.

Cuando el D se hace positivo respecto de S, fluirá una corriente de D (I_D), aunque la puerta se encuentre a potencial cero.

Con $V_{GS} = 0 \Rightarrow I_{DS} = I_{DSS}$ entre D y S.

Si la G se hace negativa respecto al sustrato se inducirá portadores de carga positivos en el canal tipo N, estos portadores de carga positivos, absorberán portadores negativos, haciendo aumentar la resistencia del canal.

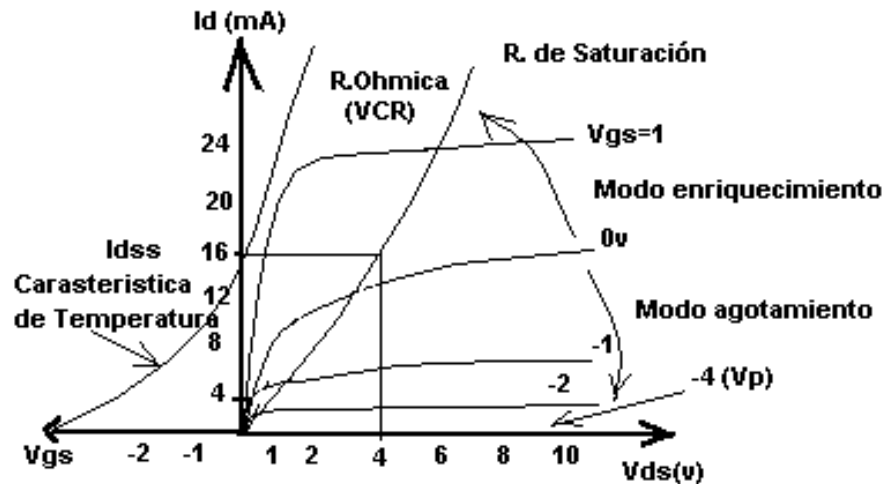


La corriente de drenador, se reduce y el efecto que se produce es similar al JFET de canal N. Es decir es el campo eléctrico de la G al sustrato, es el que provoca una redistribución de cargas (acumulación), de huecos en las proximidades del SiO_2 ó como quiera que la acción de la tensión negativa de la puerta es “AGOTAR” el canal, de portadores de carga tipo N, el dispositivo se define como “MOSFET tipo

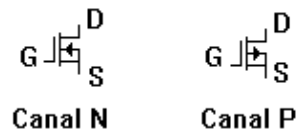
AGOTAMIENTO” ó depleción.

Si aplicamos a la puerta un potencial positivo, en el canal N, se inducirán portadores de carga adicionales tipo N, lo que provocará una reducción de la resistencia

del canal y un posterior aumento de la corriente de Drenador \Rightarrow que el MOSFET de AGOTAMIENTO, puede funcionar también en modo de ENRIQUECIMIENTO.



Los símbolos :

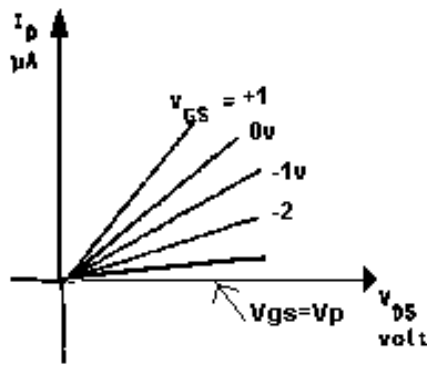


MAS DETALLE DE LAS CURVAS $I_D - V_{DS}$

Región óhmica (VCR)

Si V_{DS} es pequeño, mientras que V_{GS} es negativo o positivo (en el JFET siempre V_{GS} negativo ó a lo más 0,5 v)

Si V_{GS} negativo, se atraerán n^+ o se repelerán e^- , se crea la región de agotamiento por debajo de la capa de oxido, canal más estrecho y el canal tiene un ancho uniforme ya que $V_{GS} \approx V_{GD} \Rightarrow$ el canal más estrecho $\Rightarrow \uparrow R_{DS}$ dando lugar al conjunto de características de línea recta que tenemos en la figura :



Cuando V_{GS} se hace más negativa, se alcanzará en que el canal queda completamente agotado de portadores de carga, el valor de V_{GS} en que esto ocurre se llama voltaje de estricción ó estrangulamiento V_P .

$$V_P = V_{GS} \mid I_D = 0, V_{DS} = \text{pequeño};$$

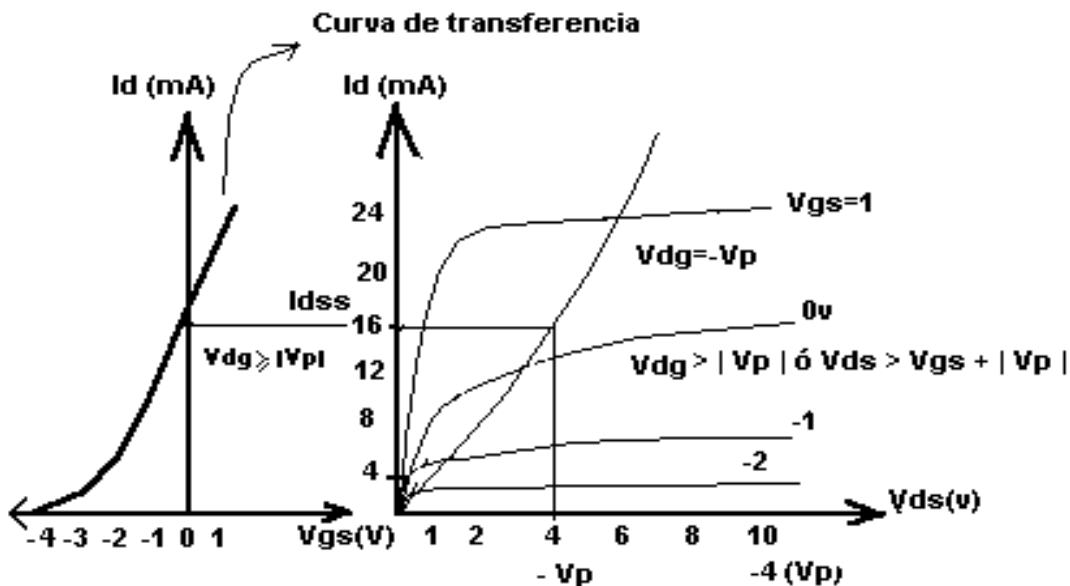
Obviamente, para un dispositivo de canal N, V_P es un número negativo. A diferencia con el JFET, V_{GS} se puede hacer positivo, el canal se vuelve más ancho y su resistencia disminuye.

Si ahora $\uparrow V_{DS}$ y $V_{GS} = \text{cte.}$, la región de agotamiento tendrá un ancho cte. en el extremo de la fuente, pero se hará progresivamente más ancha cuando se mueve hacia el Drenaje, de esta manera el canal tendrá una forma piramidal, y su ancho será el más estrecho en el extremo del Drenaje dando lugar a una curva:

$I_D - V_{DS}$, no lineal.

Finalmente si V_{DS} se incrementa al valor en el que $V_{GD} = V_P \Rightarrow$ que el canal quedará estrangulado en el extremo del Drenaje.

Cualquier incremento adicional en V_{DS} no altera la forma del canal, y por lo tanto la corriente en él se mantiene cte. en el valor alcanzado por $V_{GD} = V_P$ (o en correspondencia $V_{DS} = -V_P + V_{GS}$).



Viendo las curvas características, en saturación ó estricción, el dispositivo actúa como una fuente Ideal de corriente cte.

Los MOSFET reales, sin embargo, tiene una resistencia finita, de salida, con el resultado que las curvas tiene en saturación, tienen una pendientes finitas distintas de cero.

Más aún la resistencia de salida, descenderá según aumenta el nivel de corriente en el dispositivo.

Es de particular interés que en la curva de transferencia la ecuación de Shokley, continua aplicándose en el Mosfet de Deplexión, tanto para la región de acumulación como de la agotamiento.

Para ambas simplemente es necesario, que en la ecuación se incluya la V_{GS} , con el signo apropiado y que dicho signo se siga en todas las operaciones matemáticas.

MOSFET DE DEPLEXIÓN DE CANAL P.

Es exactamente el inverso del anterior.

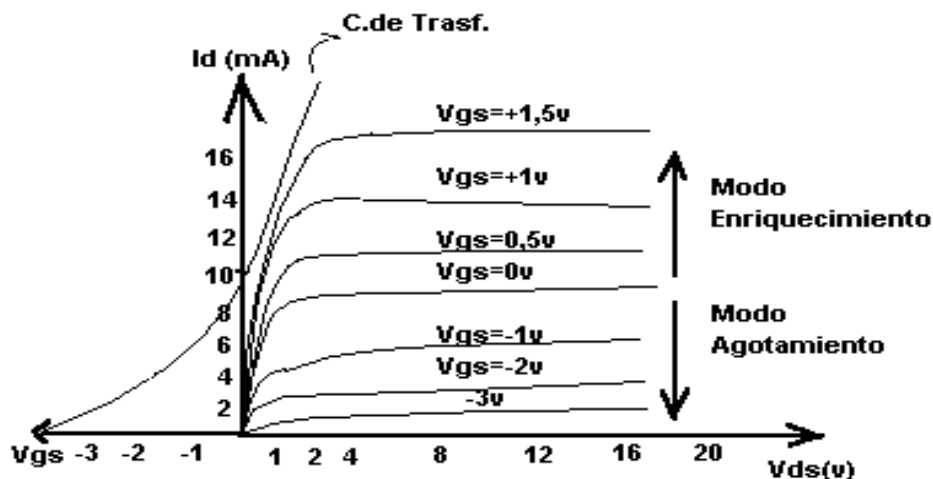
Sustrato N y un canal tipo P.

Todas las polaridades y corrientes están invertidas.

POLARIZACIÓN DEL MOSFET.

Esta es una rencilla como la de los JFET, y todo lo visto es valido para el MOSFET de deplexión.

Las resistencias asociadas al circuito de puerta pueden ser más elevadas, con lo que se obtienen impedancias de entrada muy altas.



En el caso de dispositivos tipo deplexión AGOTAMIENTO - ENRIQUECIMIENTO, la V_{GS} puede ser positiva ó negativa.

Para el MOSFET de ENRIQUECIMIENTO \Rightarrow la V_{GS} debe tener la misma polaridad que V_{DD} , es decir que :

$$V_{GS} > 0 \text{ para dispositivos Canal N}$$

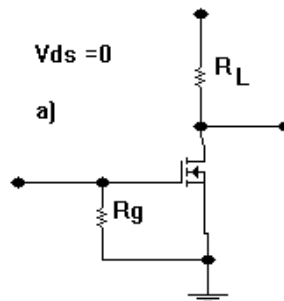
y

$$V_{GS} < 0 \text{ para dispositivos Canal P}$$

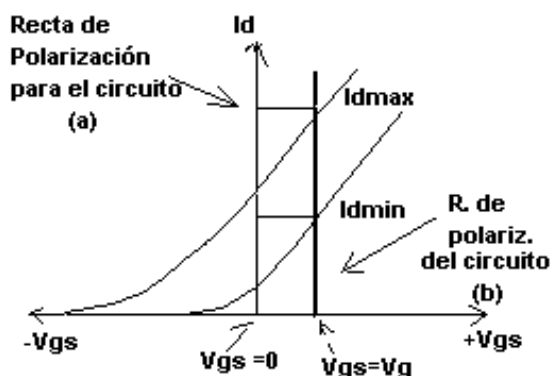
Consideremos los dos circuitos y el análisis gráfico, mostrado en la figura.

Ambos circuitos emplean un dispositivo agotamiento - ensanchamiento, ya que V_{GS} puede ser positivo, negativo ó cero.

El circuito siguiente:

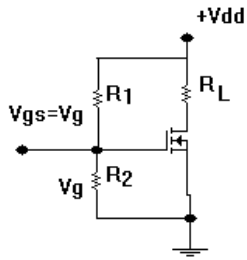


Este circuito tiene la puerta conectada a masa, por medio de la resistencia R_G y el terminal fuente está unido directamente a masa $V_{GS} = 0$ de la característica de transferencia. I_{dmax} e I_{dmin} se leen perfectamente y directamente en la intersección de la recta. $V_{GS} = 0$ con las curvas de transferencia máxima y mínima.

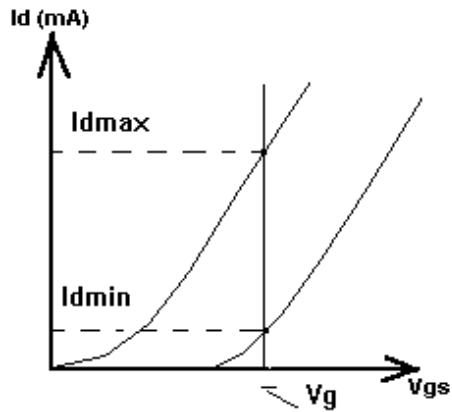


En el circuito (b) $\Rightarrow V_{GS}$ tiene un valor positivo (V_G), determinado por la tensión de alimentación V_{DD} y el divisor de tensión formado por R_1 y R_2 .

Ahora trazando la vertical por $V_{GS} = V_G \Rightarrow$ la intersección con la interferencia determinan I_{dmax} y I_{dmin} .



Este circuito utiliza un MOSFET de ENRIQUECIMIENTO canal N, este dispositivo debe tener su tensión de puerta positiva respecto a la fuente, para que pueda fluir corriente por el Drenador.



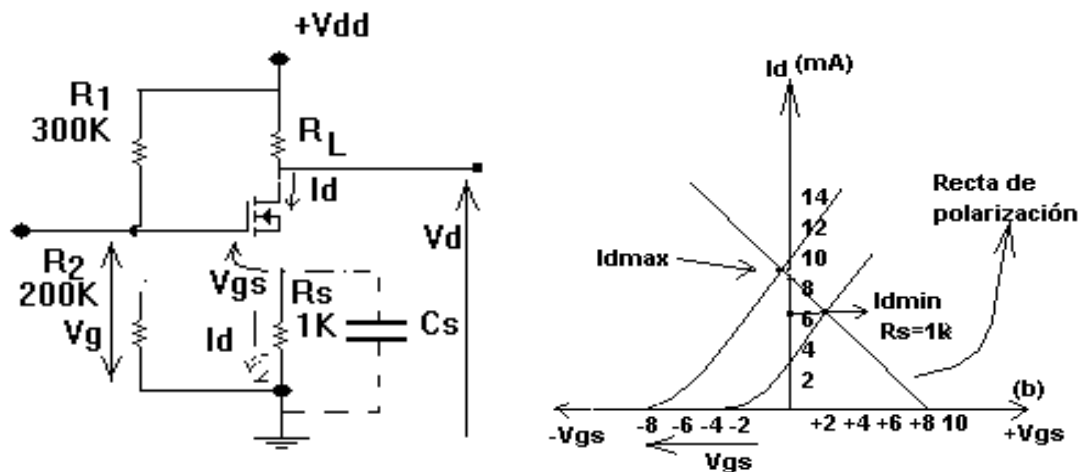
El divisor de tensión formado por V_{DD} , R_1 y R_2 suministran la tensión V_G , requerida.

El valor $I_{Dmáx}$ y I_{dmin} , se obtienen como intersección de la vertical en $V_{GS} = V_G$ con las curvas de transferencia.

También se pueden utilizar en los MOSFET, los circuitos de autopolarización que se estudiaron en los JFET Y TRT BJT, siguiendo su diseño, un procedimiento similar.

Ejemplo:

El Mosfet de la Fig., tiene unas características de transferencia con la indicada en la fig. Determinar los valores máximo y mínimo de I_D en el circuito.



Solución : La tensión de puerta del TRT vale :

$$V_G = (V_{DD} \cdot R_2) / (R_1 + R_2) = 20 \cdot (200 / (300 + 200)) = 8 \text{ v}$$

y la recta de polarización será : $V_{GS} = V_G - I_D R_S$

Para dibujar esta recta, se observa que cuando $I_D = 0$ se tiene

$$V_{GS} = 8 - 0 = 8 \text{ v (punto A)}$$

Cuando $V_{GS} = 0$ se tiene : $0 = 8 - I_D \Rightarrow I_D = 8 \text{ mA (parte B)}$

$$I_{Dmax} = 8,5 \text{ mA} ; I_{Dmin} = 7,2 \text{ mA.}$$