



**Centro Universitario
de la Defensa** Zaragoza

TRANSISTOR MOS: TEMA 3.1

Zaragoza, 4 de abril de 2011



TRANSISTOR MOSFET

Tema 3.1

- Introducción
- El MOSFET en gran señal



TRANSISTOR MOSFET

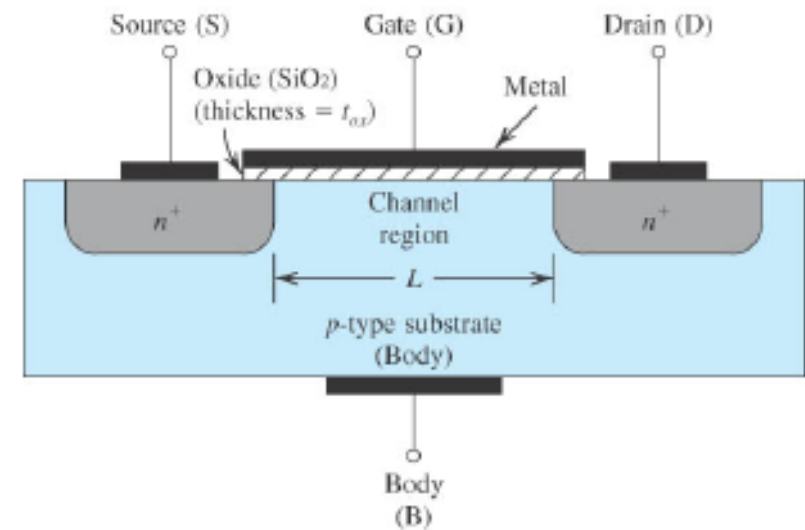
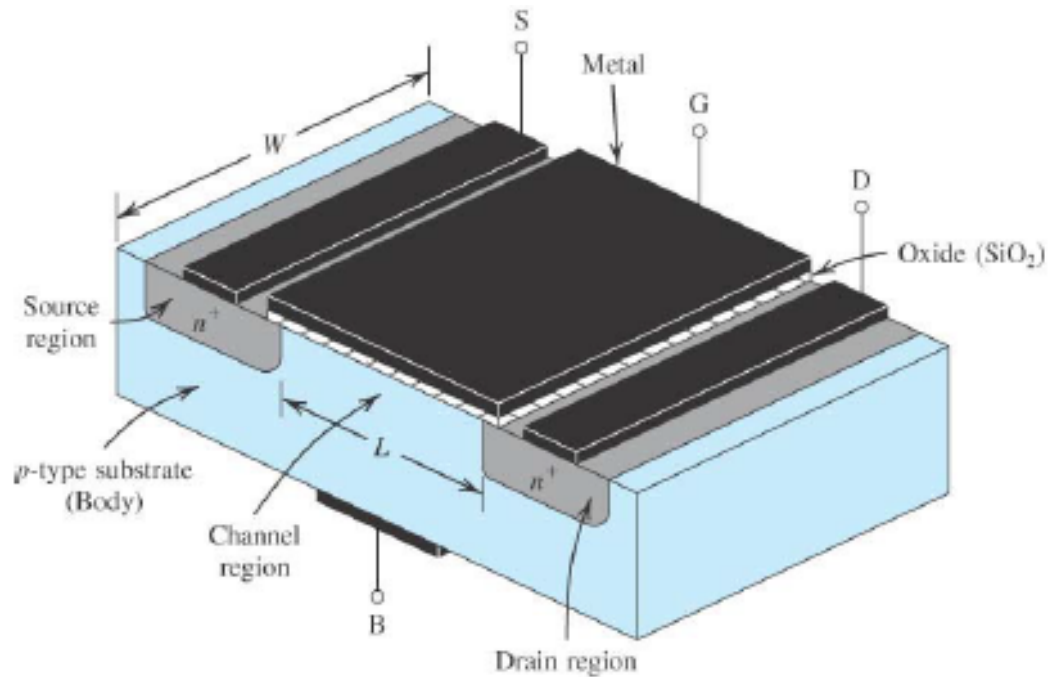
Tema 3.1

- Introducción
- El MOSFET en gran señal

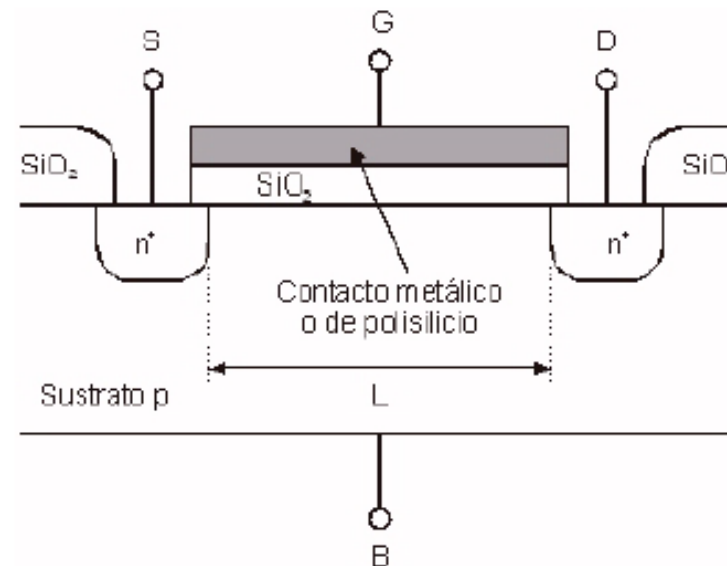


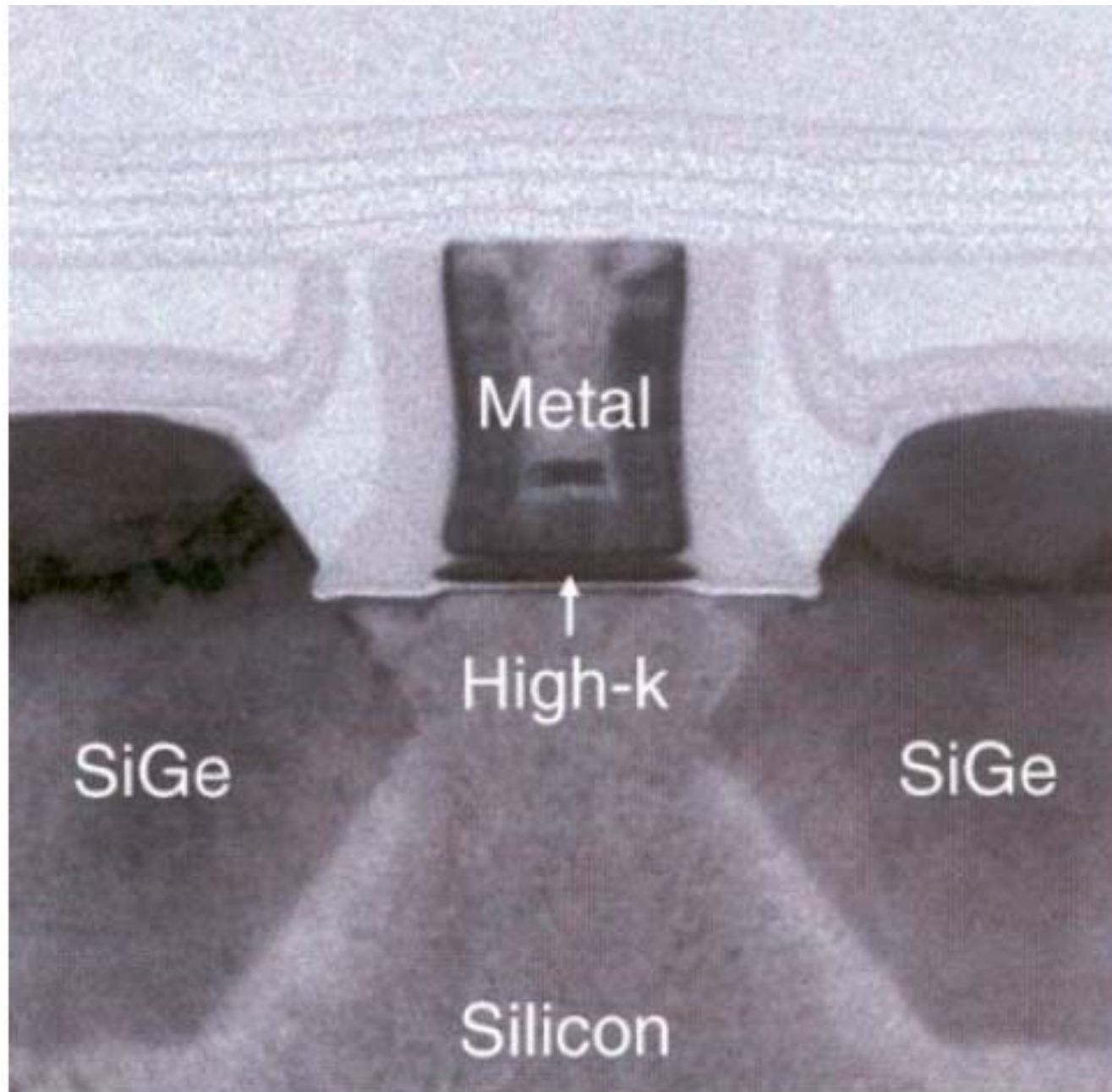
MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)

- Puerta (G, gate)
- Drenador (D, drain)
- Fuente (S, source)
- Sustrato (B, bulk)

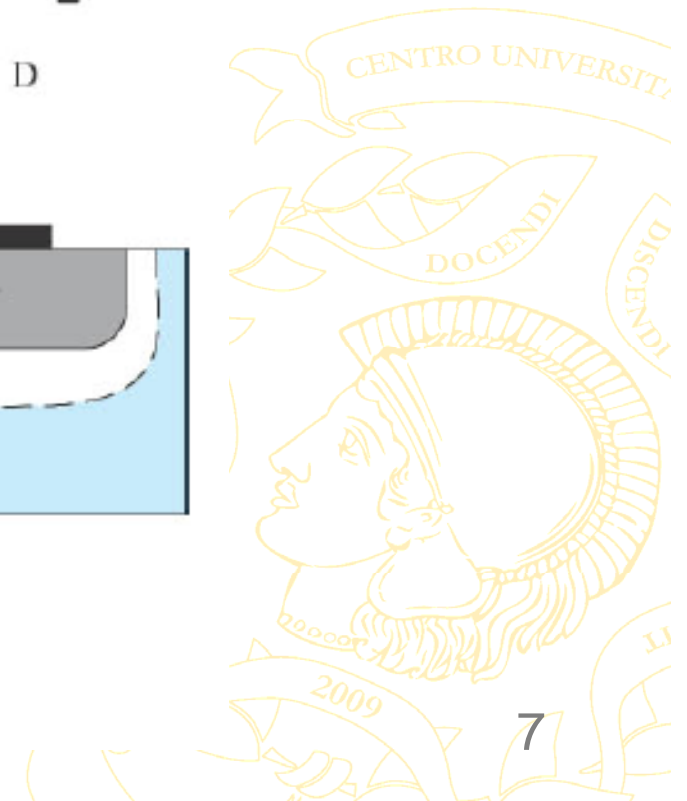
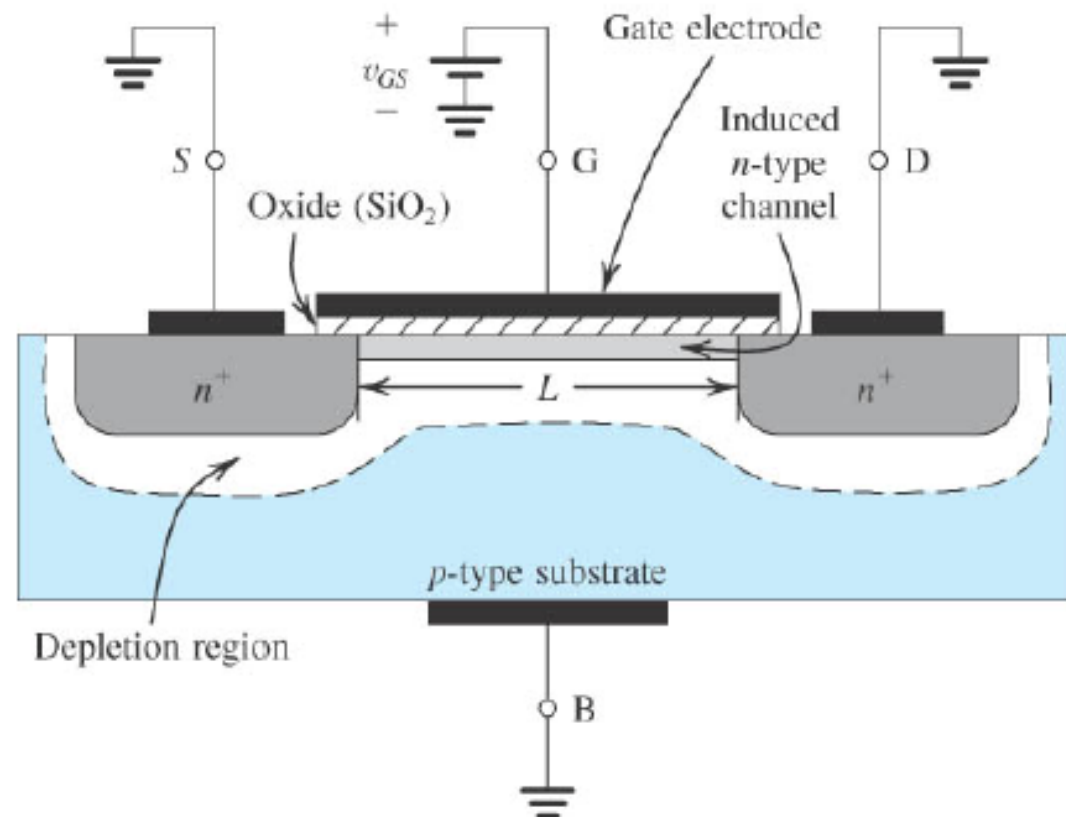


- MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)
- Los transistores de efecto campo (FET) son dispositivos electrónicos con, al menos, tres terminales, llamados puerta (G, gate), drenador (D, drain) y fuente.(S, source)
- La corriente que fluye entre la fuente y el drenador se controla con la tensión aplicada en la puerta.
- En (B, bulk) se establece una tensión fija de referencia.





- Para que exista corriente entre fuente y drenador es necesario establecer un camino por el cual fluya la misma
- Esto sólo es posible si se crea una lámina de inversión de carga de electrones que una las dos regiones N^+ (D y S)



- Cuando se aplica una tensión positiva al terminal de puerta se crea un campo eléctrico entre las placas del condensador que incide perpendicularmente sobre la superficie del semiconductor.
- Este campo eléctrico atrae cargas negativas hacia la superficie y repele las positivas.
- Si el campo eléctrico tiene la intensidad suficiente logra crear, en la proximidad de la superficie del semiconductor, una región muy rica en cargas negativas que se denomina canal N. Este canal, de longitud L y anchura W , conecta las dos regiones N y permite el paso de corriente entre drenador y fuente.
- Si el campo eléctrico transversal se hace más intenso, el canal se hace más rico en cargas negativas, disminuye su resistencia, y permite el paso de una corriente mayor entre drenador y fuente.

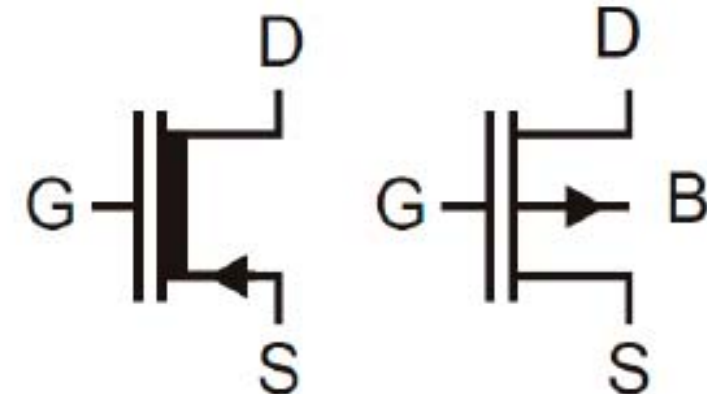
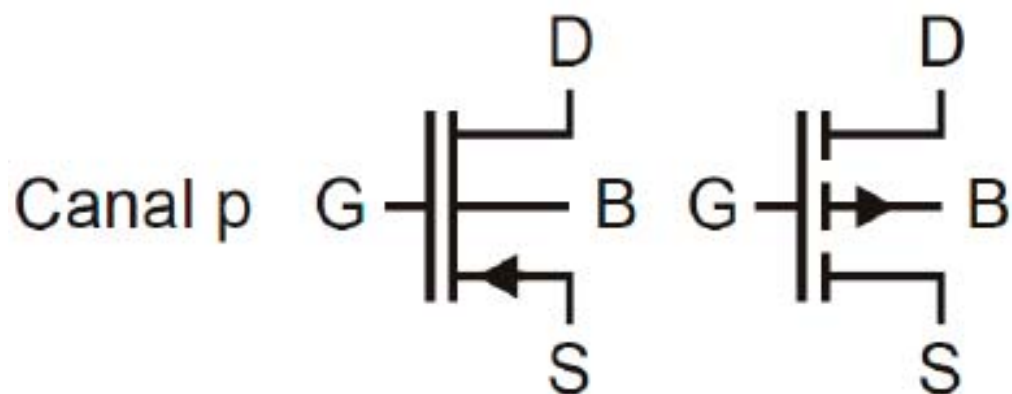
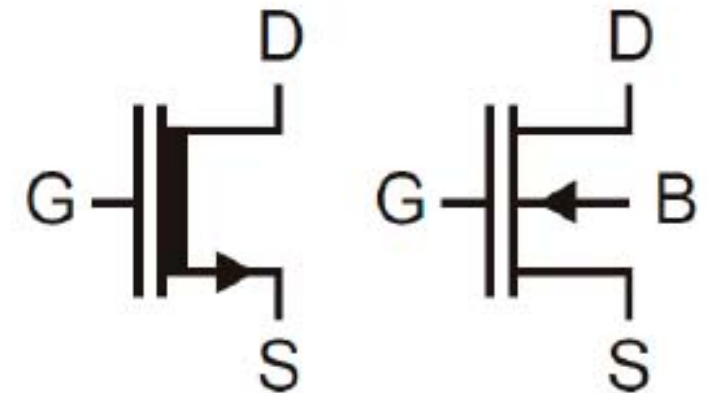
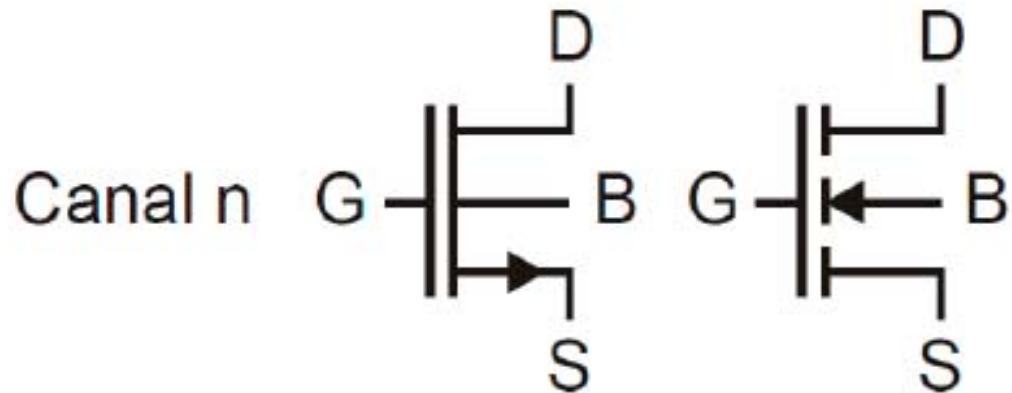
- El transistor MOS se denomina de *efecto de campo* porque la corriente que circula entre los terminales de drenador y fuente está controlada por este campo eléctrico perpendicular a la superficie del semiconductor entre las regiones de drenador y fuente.



- **MOSFET de canal N de enriquecimiento (normally off):** el sustrato semiconductor es tipo P y no existe canal a menos que apliquemos la tensión necesaria a la puerta para que esto ocurra.
- **MOSFET de canal P de enriquecimiento (normally off):** el sustrato semiconductor es tipo N y no existe canal a menos que apliquemos la tensión necesaria a la puerta para que esto ocurra.
- **MOSFET de canal N de deplexión (normally on):** el sustrato semiconductor es tipo P y existe canal a tensión de puerta nula. Se puede hacer desaparecer al canal con la aplicación una tensión apropiada a la puerta.
- **MOSFET de canal P de deplexión (normally on):** el sustrato semiconductor es tipo N y existe canal a tensión de puerta nula. Se puede hacer desaparecer al canal con la aplicación una tensión apropiada a la puerta.

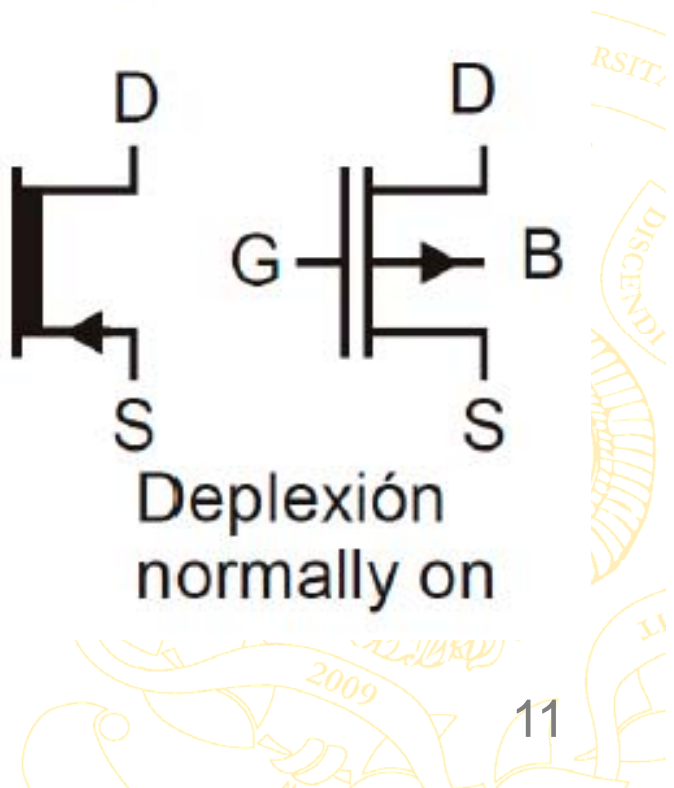
INTRODUCCIÓN

TIPOS DE MOSFET



Enriquecimiento
normally off

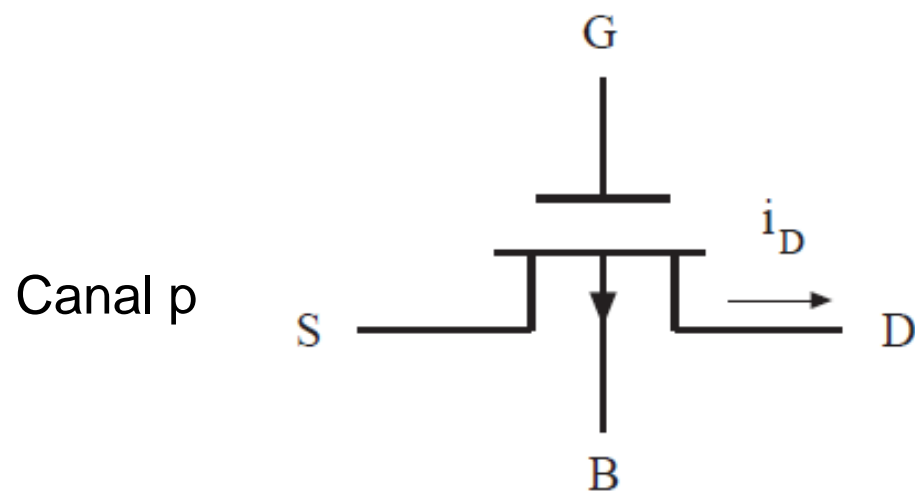
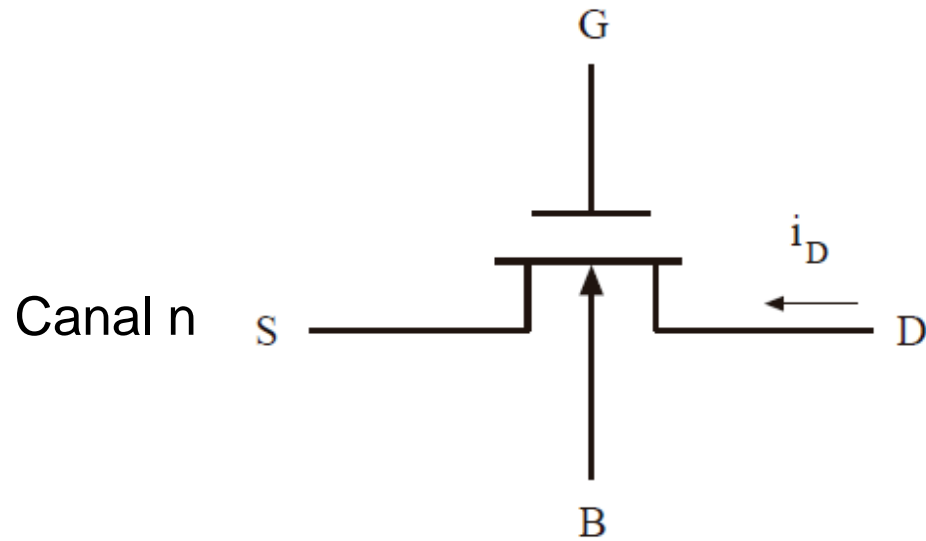
Deplexión
normally on



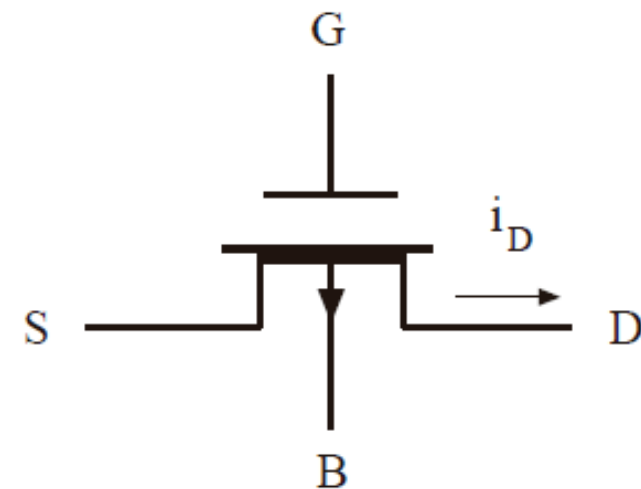
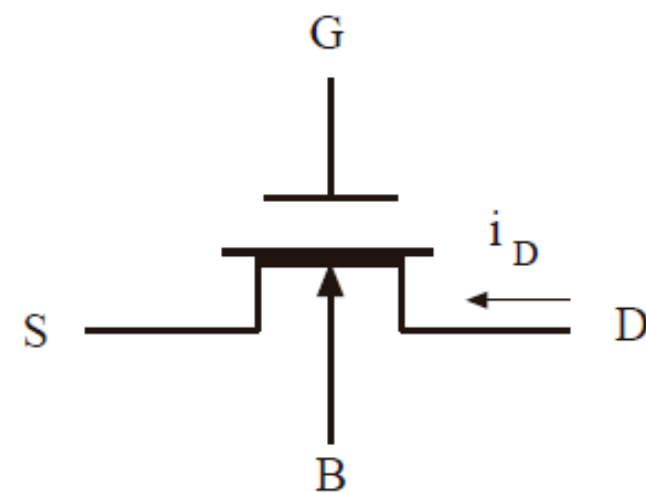
INTRODUCCIÓN

TIPOS DE MOSFET

Enriquecimiento



Deplexión



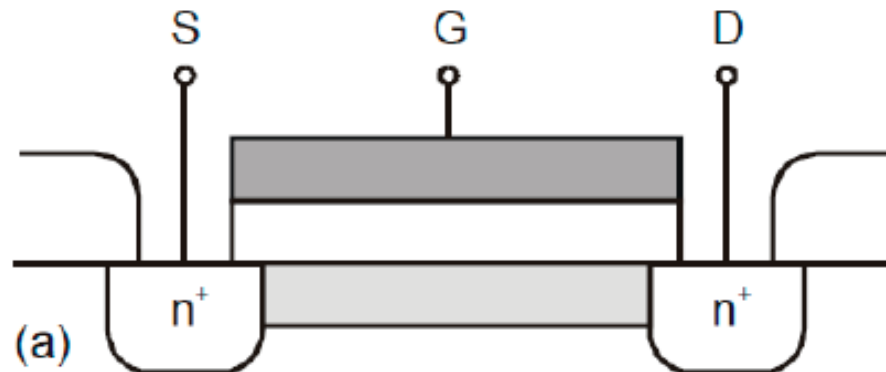
TRANSISTOR MOSFET

Tema 3.1

- Introducción
- El MOSFET en gran señal

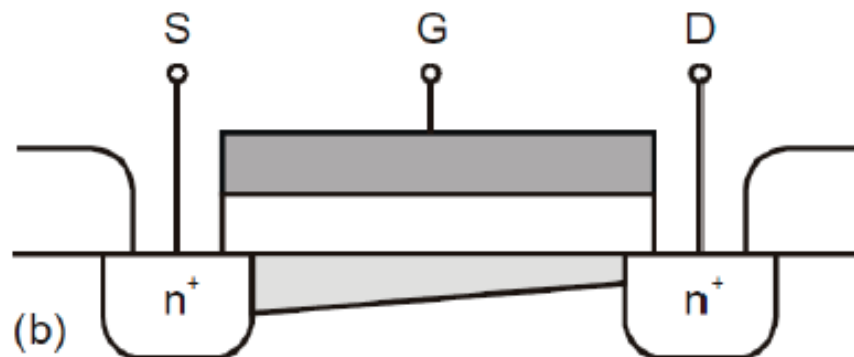


a) Canal uniforme. Comportamiento parecido al de una resistencia

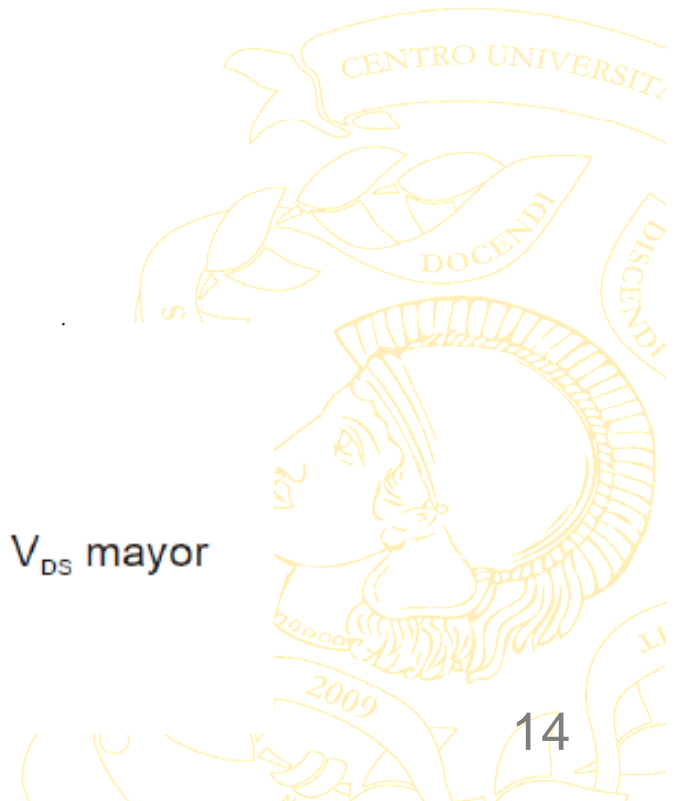


V_{DS} bajo

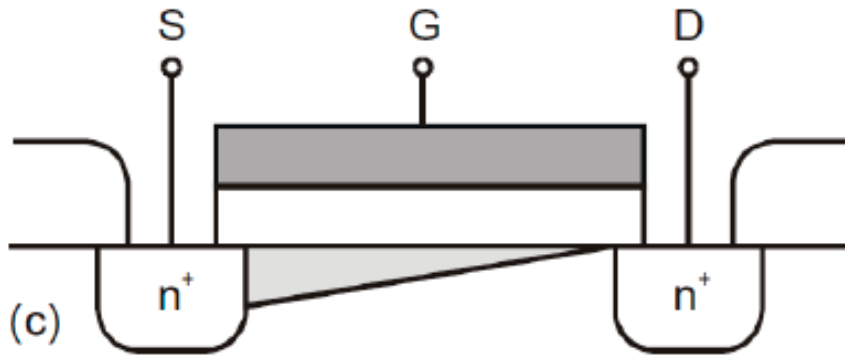
b) Canal no uniforme. La resistencia aumenta con V_{DS}



V_{DS} mayor

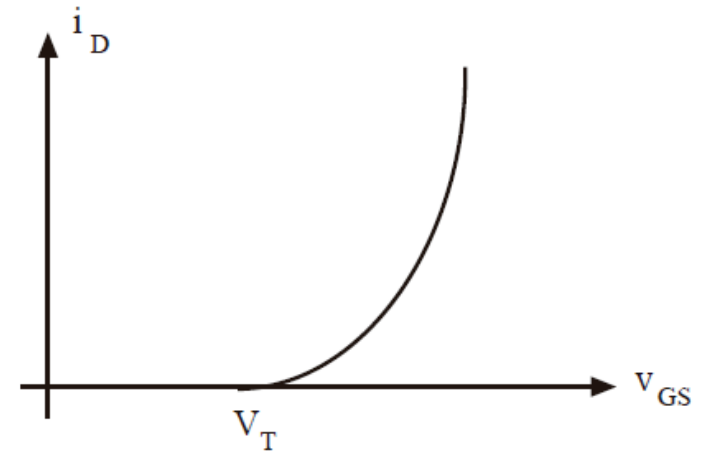


- c) Agotamiento del canal. Pendiente nula en $I_{DS} - V_{DS}$. V_t es la tensión V_{GS} a partir de la cual el canal conduce.

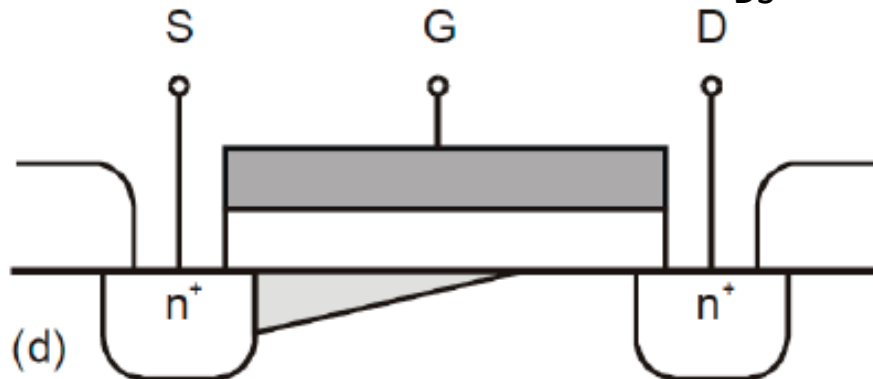


$$V_{GS} - V_{DS} = V_t$$

$$V_{DSsat} \equiv V_{GS} - V_t$$



- d) Agotamiento del canal lejos del drenador. Saturación del canal. Canal no uniforme. La resistencia aumenta con V_{DS}



$$V_{DS} > V_{DSsat}$$

La línea se curva porque la resistencia del canal aumenta con v_{DS}

a) Casi una línea recta con pendiente proporcional a $v_{GS} - v_t$

b) y a) Triodo:

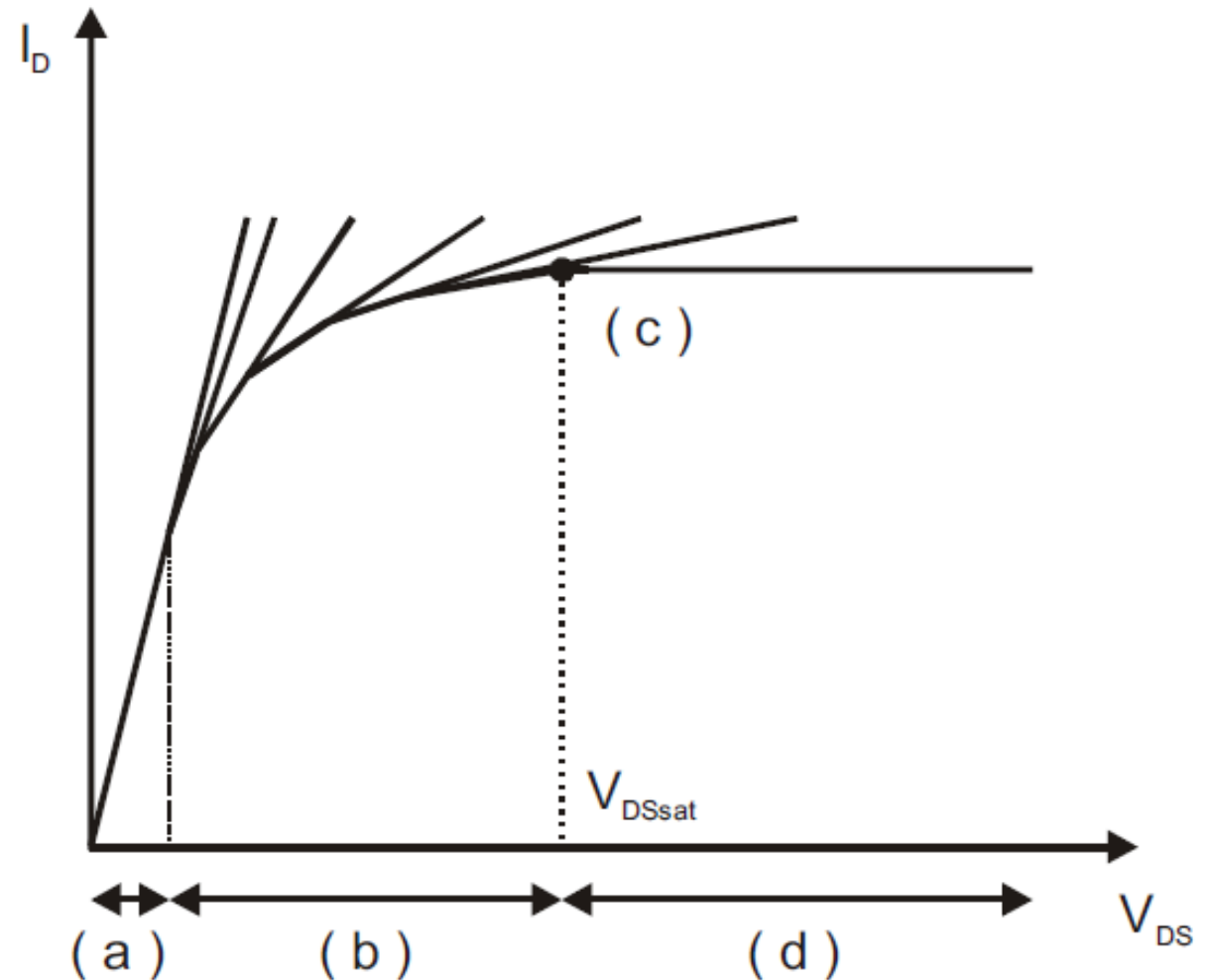
$$v_{DS} < v_{GS} - v_t$$

c) Saturación:

$$v_{DS} \geq v_{GS} - v_t$$

Limite entre regiones:

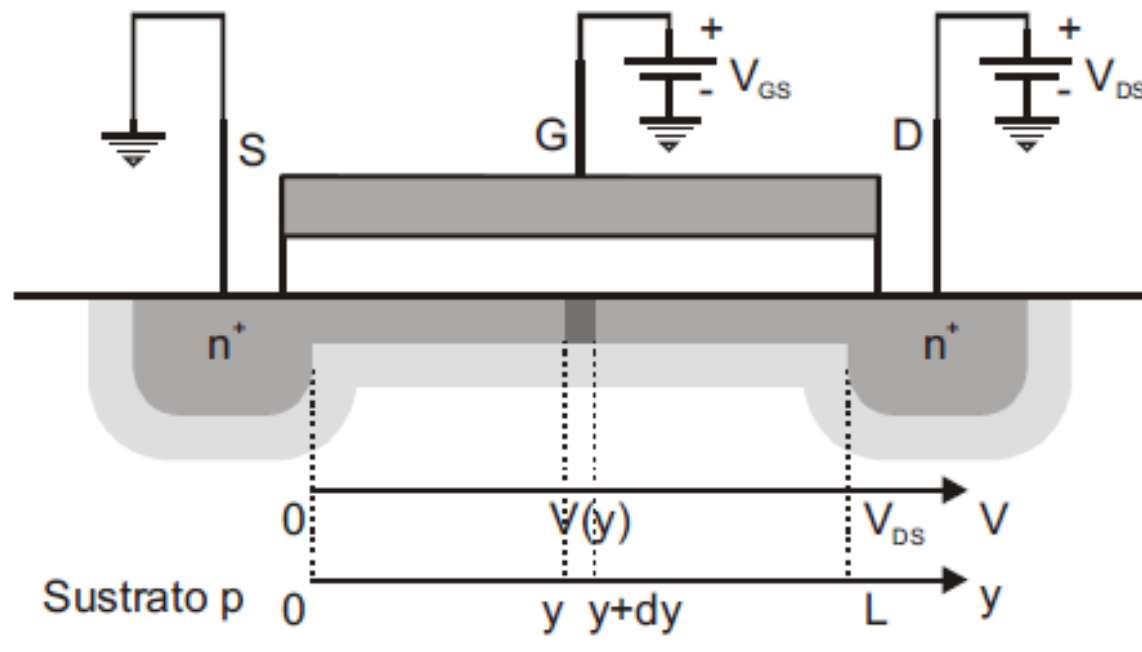
$$v_{DS} = v_{GS} - v_t$$



- En este apartado se va a obtener una relación explícita para la corriente de drenador de la forma

$$I_D = f(V_{DS}, V_{GS})$$

- Consideremos el potencial $V(y)$ en un elemento de canal a distancia “ y ” de la fuente, $V(0) = 0V$, $V(L) = V_{DS}$



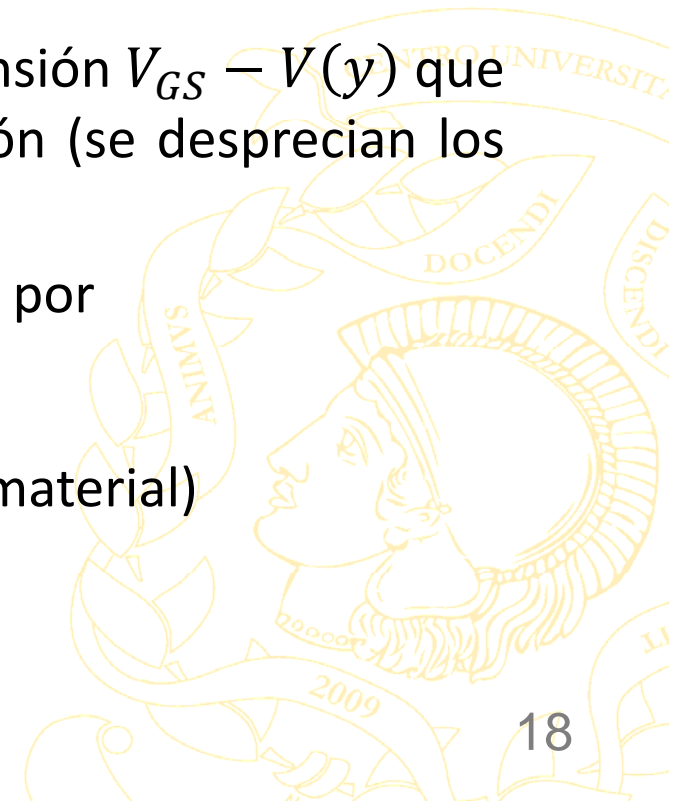
- Si se considera un elemento de canal de longitud dy , la carga en inversión puede expresarse como

$$Q_I(y) = C_{OX}(V_{GS} - V(y) - V_T)$$

- $Q_I(y)$ representa la carga inducida en el canal por unidad de superficie
- C_{OX} Capacitancia por unidad de área de compuerta
- En esta aproximación se considera que la parte de tensión $V_{GS} - V(y)$ que supera a V_T se utiliza para crear la carga en inversión (se desprecian los efectos del aumento de la carga de deplexión)
- La resistencia de este elemento de canal vendrá dada por

$$dR = \rho dy = \frac{dy}{W\mu_n Q_I(y)} \quad (\rho \text{ resistividad del material})$$

Donde W es la profundidad del dispositivo
Introducción



- La diferencia de potencial en los extremos del elemento de canal considerado será

$$dV = I_D dR = \frac{I_D dy}{W \mu_n Q_I(y)}$$

- Donde I_D es la corriente que atraviesa el canal considerada constante en todo el dispositivo
- Integrando a lo largo del canal se tiene

$$\int_0^L I_D dy = \int_0^{V_{DS}} W \mu_n Q_I(y) dV$$

$$\int_0^L I_D dy = \int_0^{V_{DS}} W \mu_n C_{OX} (V_{GS} - V - V_T) dV$$



- Tras operar y despejar el valor de I_D

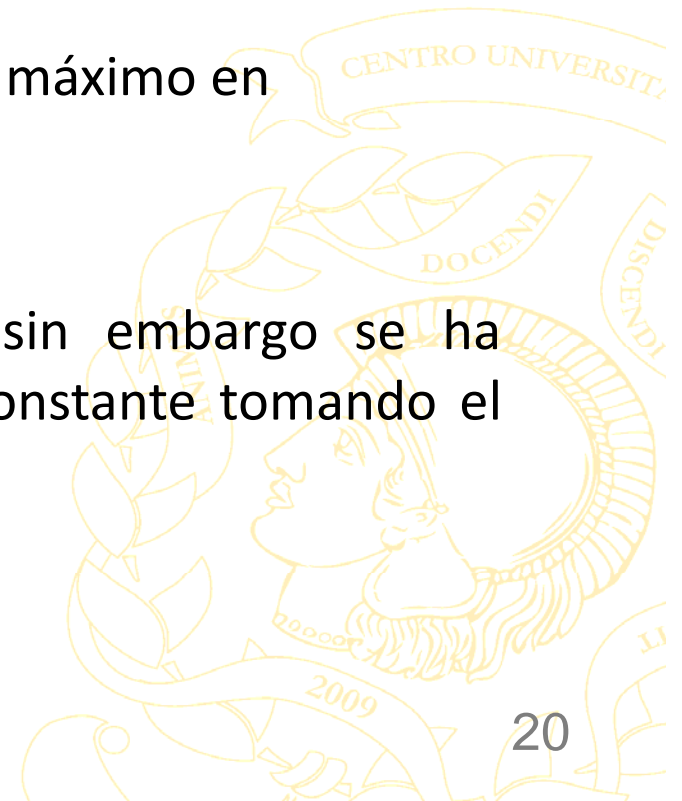
$$I_D = \frac{k' W}{2 L} [2(V_{GS} - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2]$$

$$k' = \mu_n C_{OX} = \mu_n \frac{\epsilon_{OX}}{t_{OX}}$$

- La función obtenida es una parábola que presenta un máximo en

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

- A partir de ese punto la corriente disminuiría, sin embargo se ha comentado con anterioridad que I_{DS} se mantiene constante tomando el valor del máximo de la misma



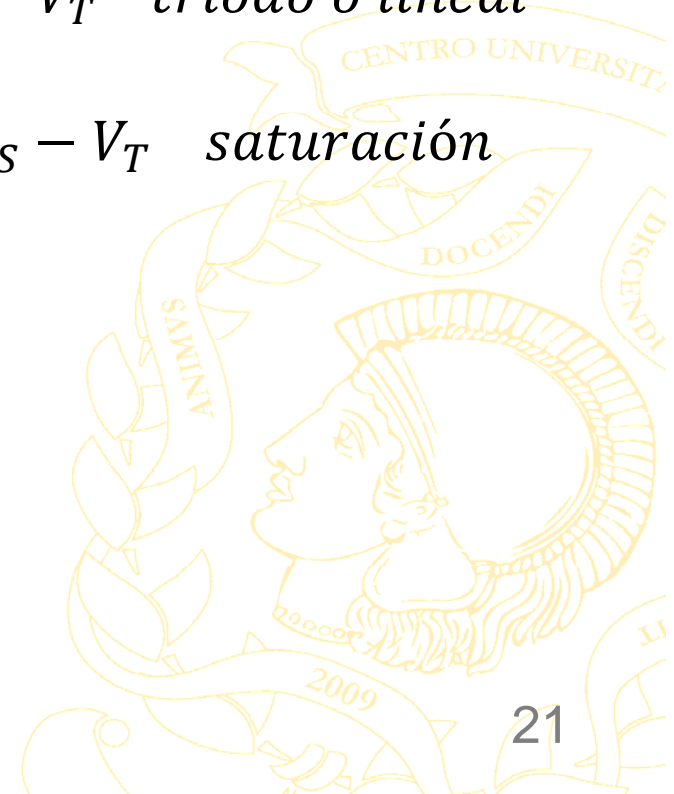
Cuadro resumen de las regiones de operación de un n-MOSFET

$$I_{DS} = \begin{cases} 0 \\ \frac{k' W}{2 L} [2(V_{GS} - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2] \\ \frac{k' W}{2 L} (V_{GS} - V_T)^2 \end{cases}$$

$V_{GS} < V_T$ corte

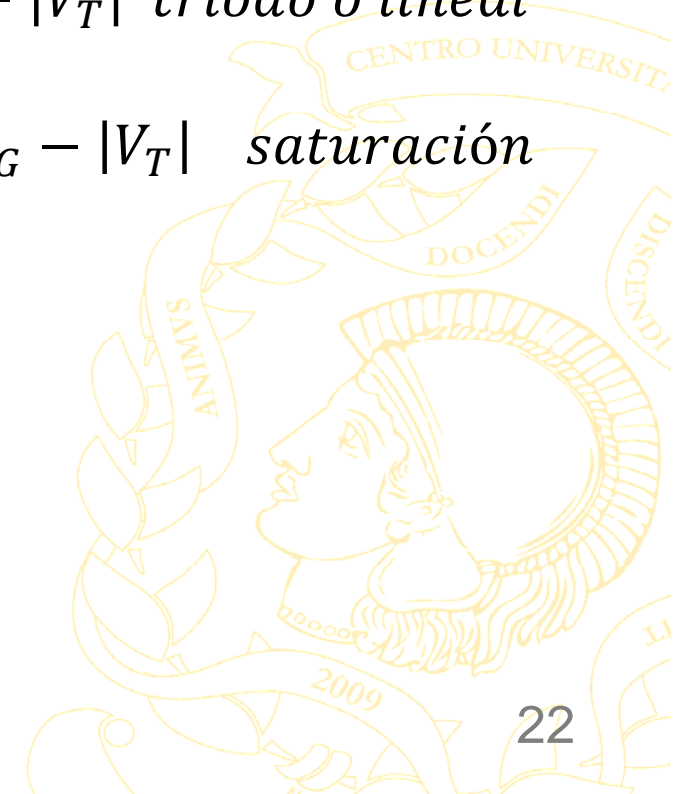
$V_{DS} < V_{GS} - V_T$ triodo o lineal

$V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$ saturación



Cuadro resumen de las regiones de operación de un p-MOSFET

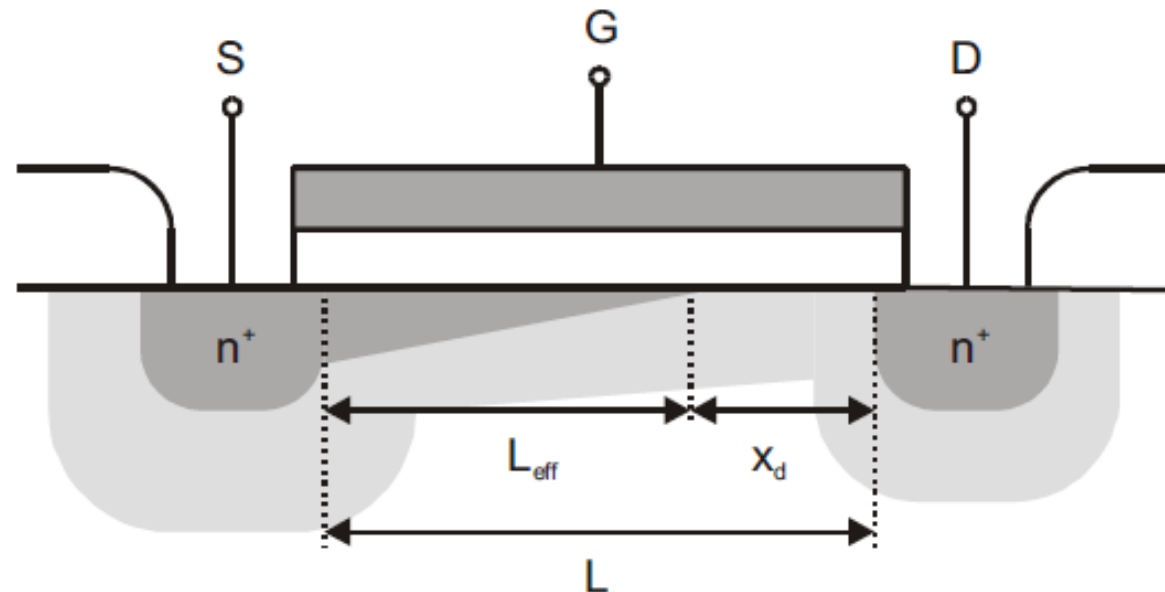
$$I_{DS} = \begin{cases} 0 & V_{SG} < |V_T| \quad \text{corte} \\ \frac{k' W}{2 L} [2(V_{SG} - |V_T|)V_{SD} - V_{SD}^2] & V_{SD} < V_{SG} - |V_T| \quad \text{triado o lineal} \\ \frac{k' W}{2 L} (V_{SG} - |V_T|)^2 & V_{SD} \geq V_{SG} - |V_T| \quad \text{saturación} \end{cases}$$



EFECTO DE MODULACIÓN DE LA LONGITUD DEL CANAL. EFECTO EARLY

- Cuando el MOSFET trabaja en saturación, la longitud efectiva del canal varía con la tensión V_{DS}
- $L_{eff} = L - x_d$ es la longitud real del canal

$$I_D = \frac{k'}{2} \frac{W}{L_{eff}} (V_{GS} - V_T)^2$$



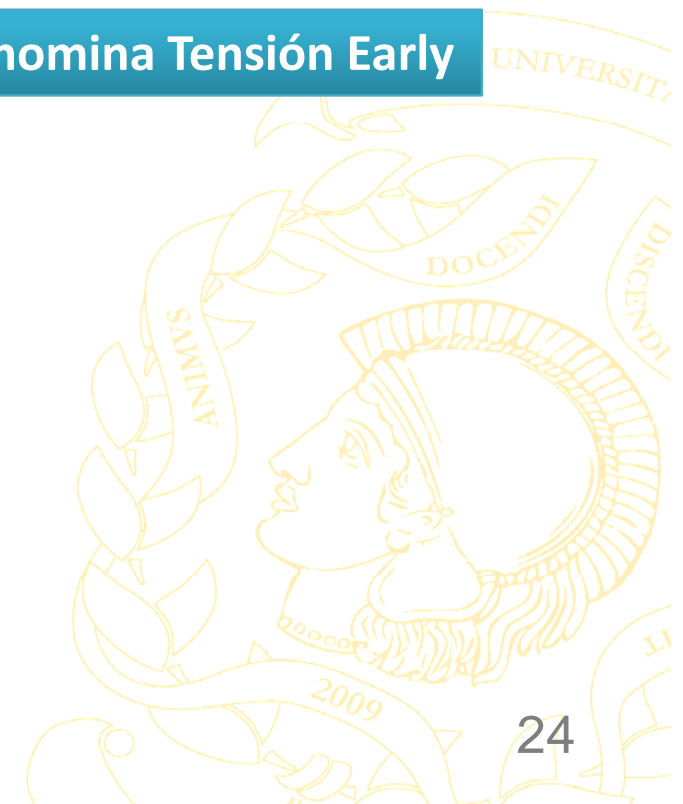
- Cálculo de la variación de la corriente en saturación I_D con V_{DS}

$$\frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} = -\frac{k' W}{2 L_{eff}^2} (V_{GS} - V_T)^2 \frac{dL_{eff}}{dV_{DS}}$$

$$\frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} = \frac{I_D}{L_{eff}} \frac{dx_d}{dV_{DS}}$$

$$\frac{I_D}{\left(\frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}}\right)} = L_{eff} \left(\frac{dx_d}{dV_{DS}}\right)^{-1} = V_A = \frac{1}{\lambda}$$

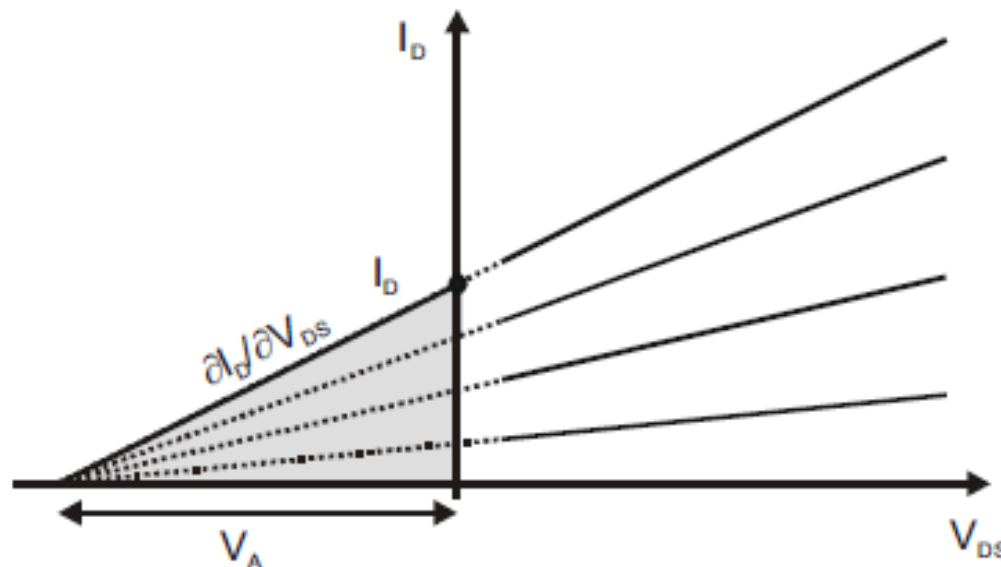
V_A se denomina Tensión Early



- De esta forma, para el MOSFET operando en saturación se puede escribir

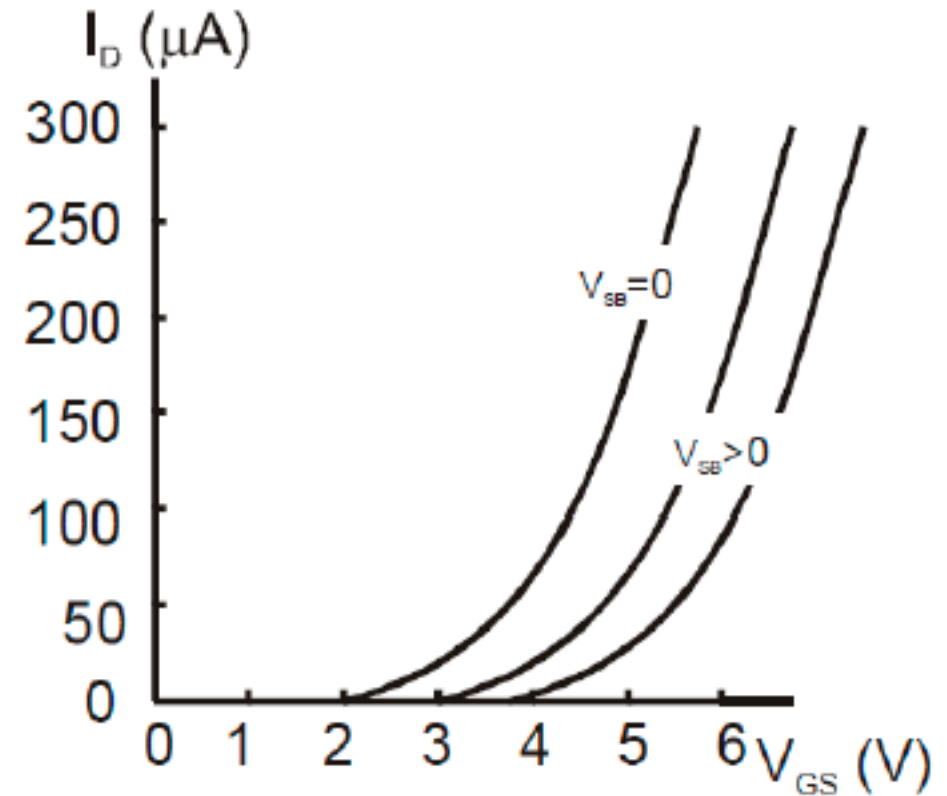
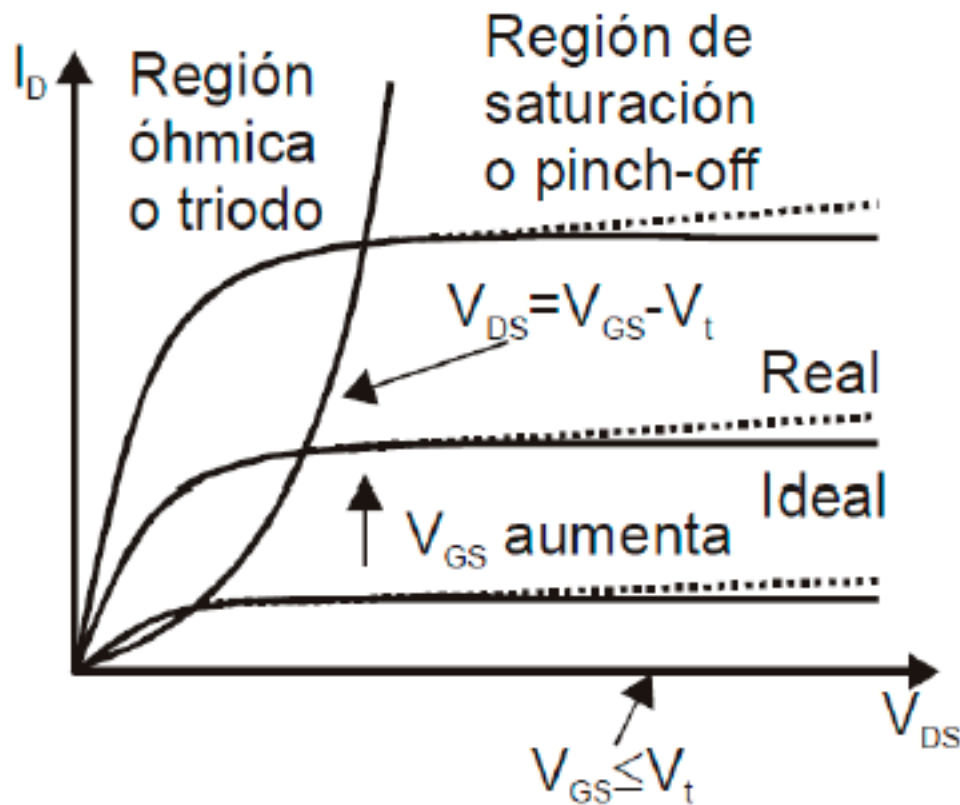
$$I_D = \frac{k'}{2} \frac{W}{L} (V_{GS} - |V_T|)^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

- La tensión Early es independiente de I_D
- Constituye la base común para todos los triángulos contruidos a partir de la extrapolación de las curvas $I_D - V_{DS}$ en saturación



CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UN MOSFET DE CANAL n (n-MOS) DE ENRIQUECIMIENTO

- Curvas $I_D - V_{DS}$ con $V_{GS} = \text{cte}$ y curvas $I_D - V_{GS}$ con $V_{DS} = \text{cte}$



EL MOSFET EN GRAN SEÑAL

EFECTO BODY

- Hasta ahora se ha considerado que el contacto de sustrato se encontraba cortocircuitado con el de fuente
- Si se aplica una tensión negativa entre sustrato y fuente ($V_{SB} > 0$) se produce un aumento de la región de carga espacial. Recordemos que la unión fuente-sustrato está polarizada en inversa.
- La carga en deflexión se ve modificada, reduciendo la anchura del canal.
- Esto equivale a un aumento de la tensión umbral necesaria para que se produzca la conducción





$$I_D = \frac{k' W}{2 L} (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS}) \quad r_o = \frac{V_A}{I_D} = \frac{1}{\lambda I_D}$$

$$I_D = \frac{k' W}{2 L} [2(V_{GS} - V_T) V_{DS} - V_{DS}^2]$$

