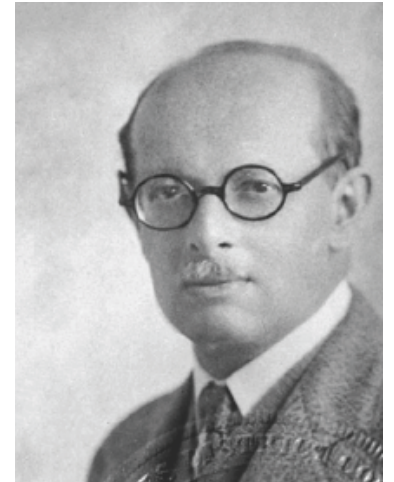


EL TRANSISTOR MOSFET

* Las siglas **MOSFET** corresponden a la descripción de su estructura:

METAL OXIDE SEMICONDUCTOR FIELD EFFECT TRANSISTOR
TRANSISTOR DE EFECTO DE CAMPO METAL OXIDO SEMICONDUCTOR.

* En 1930 el físico austrohúngaro **Julius Edgar Lilienfeld** desarrolló en forma teórica la estructura y funcionamiento de los **transistores de efecto de campo**, e inclusive introdujo patentes, pero no fue posible fabricar este dispositivo hasta varias décadas después, en los laboratorios de la Bell Telephone Company, por los mismos desarrolladores del transistor bipolar.



* En 1959, Dawon Kahng y Martin M. Atalla, también en los Laboratorios Bell, inventaron el transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor MOSFET, (también llamado IGFET), como un avance y mejora sobre el diseño del transistor FET patentado.

COMPARACIÓN ENTRE LOS MOSFET Y LOS BJT

- * El funcionamiento de los FETs se basa en el movimiento de un solo tipo de portadores, mientras que en los BJT participan los dos tipos de portadores en cada configuración.
- * Con la tecnología actual, el MOSFET es el elemento fundamental en la fabricación de los circuitos integrados. Su proceso de fabricación es más simple, pudiéndose colocar más de 200 millones en un chip.
- * Con los MOSFETs es posible implementar circuitos integrados sin necesidad de otros componentes, como resistencias o condensadores.
- * El MOSFET se utiliza tanto en circuitos integrados digitales como analógicos, e inclusive se implementan chips con ambos tipos de circuitos, denominados circuitos híbridos.

El BJT tiene aplicaciones específicas, generalmente de mayor potencia.

ESTRUCTURA DEL MOSFET TIPO ENRIQUECIMIENTO CANAL N (N-CHANNEL ENHANCEMENT TYPE MOSFET)

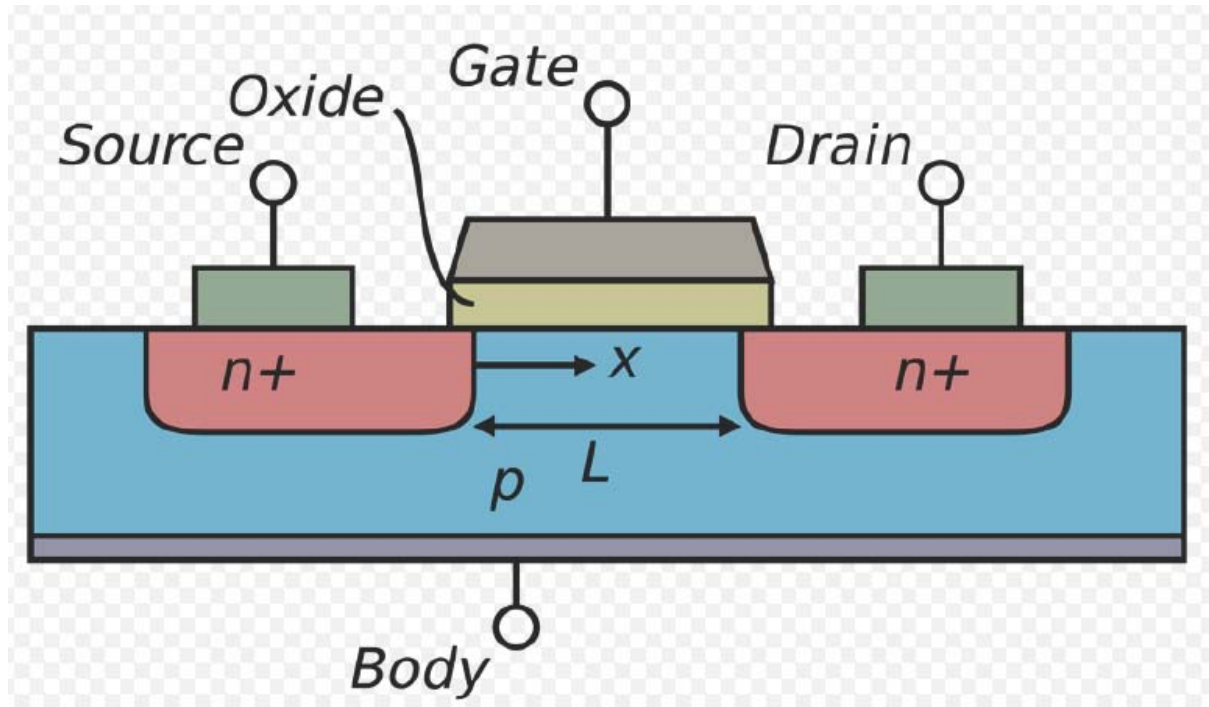
* Se fabrica sobre un sustrato tipo p (Body, B).

* Se difunden dos regiones n+, altamente dopadas: Source y Drain.

* Se "hace crecer" una capa fina (entre 2nm y 50nm) de dióxido de Silicio (SiO₂), que es un aislante, cubriendo el área entre Source y Drain,

la cual, al depositarse metal sobre ella, define el terminal Gate (G).

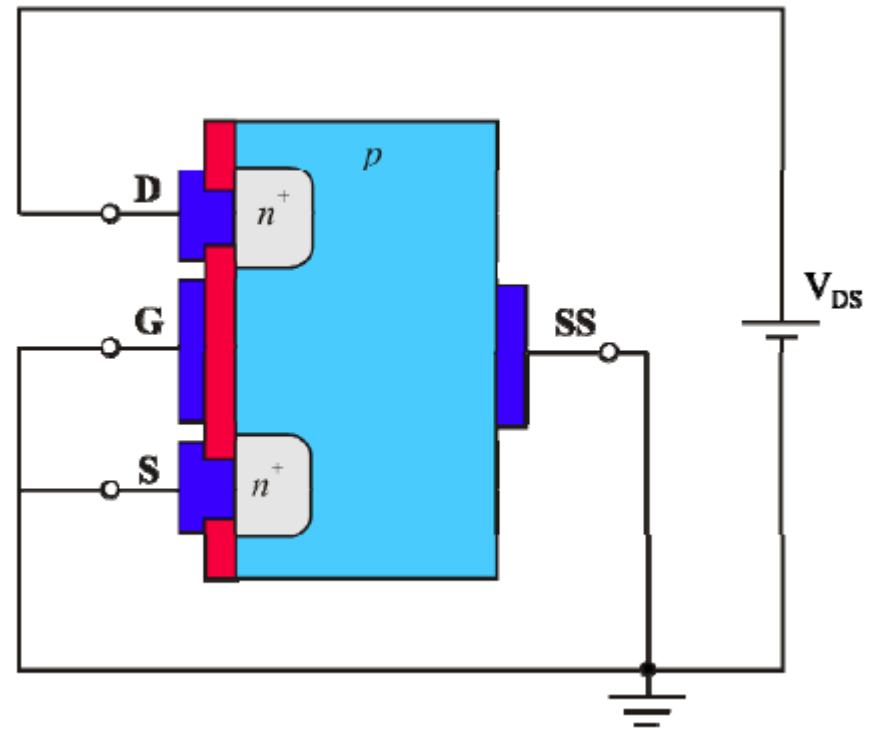
* Se deposita metal para crear los otros tres terminales (S), (D) y (B).



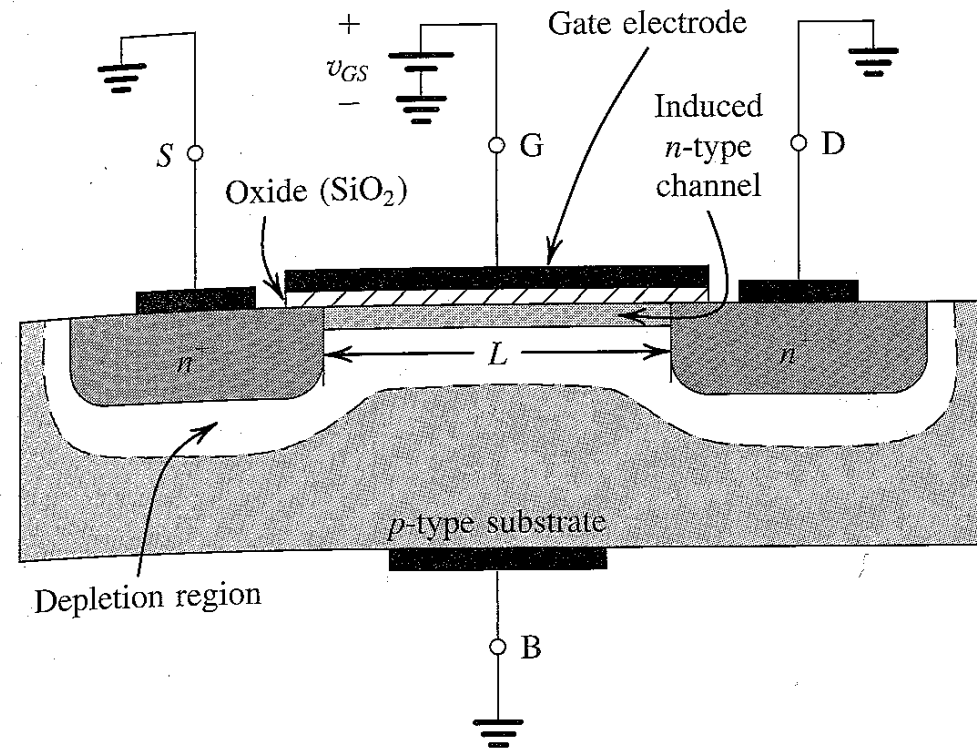
FUNCIONAMIENTO DEL MOSFET TIPO ENRIQUECIMIENTO CANAL N

* **Hay dos junturas PN:** Una entre el Drain y el sustrato y otra entre el Source el sustrato, que en principio permanecen **polarizadas en inverso**, por lo que no entran en el funcionamiento del dispositivo.

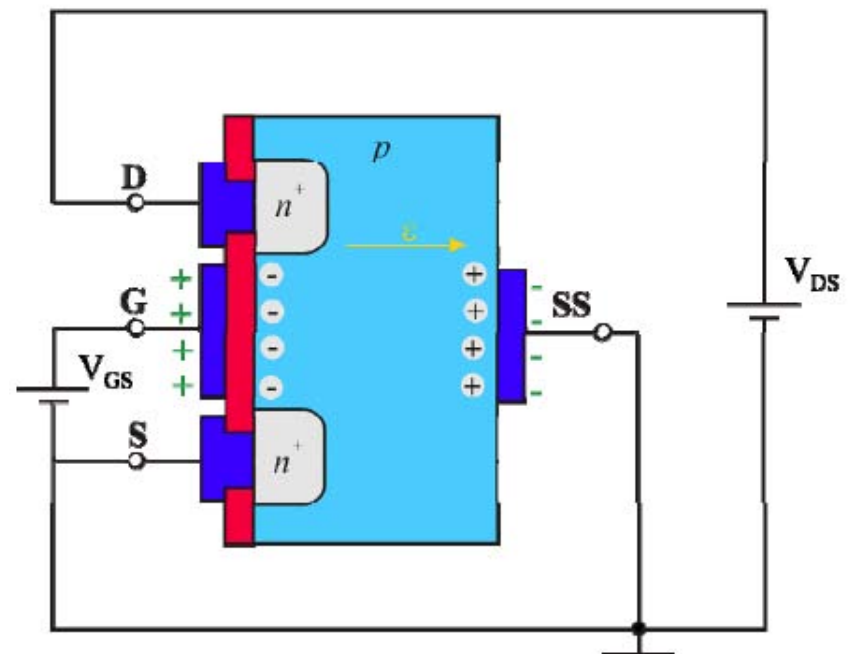
* **Sin voltaje en Gate:** Entre Drain y Source hay dos diodos espalda contra espalda. No hay circulación de corriente aunque se aplique voltaje entre Drain y Source. La resistencia es del orden de $10^{12}\Omega$.



* **Se aplica voltaje entre Gate y Source:** Los huecos de la región P son repelidos hacia abajo, quedando una región de vaciamiento, dejando al descubierto iones aceptores. El voltaje de Gate positivo atrae electrones de las regiones n+, creando un **canal tipo n**.



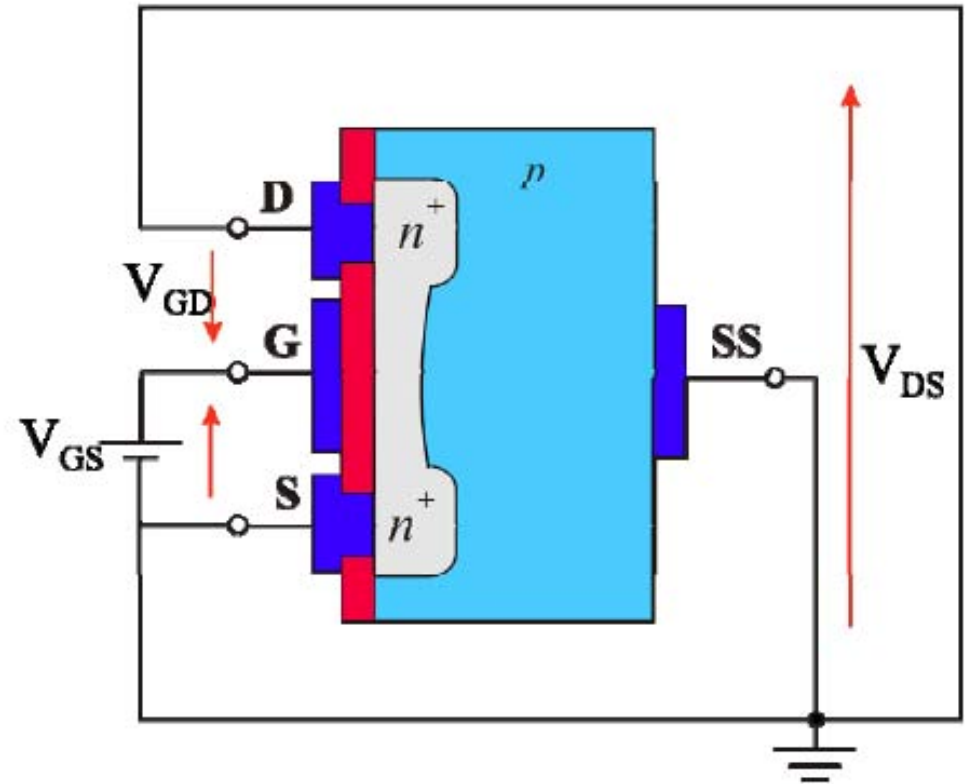
* **Canal tipo n:** Se crea invirtiendo la capa superior del sustrato de tipo p a tipo n. Se llama también **capa de inversión**.



* **Voltaje de umbral (threshold) V_{th} :** Voltaje V_{GS} para el cual se forma el canal. Su valor se controla durante la fabricación (0,5 a 1 o 2 V).

* **El campo eléctrico:** El terminal Gate y la región del canal forman un condensador, con la capa de óxido como dieléctrico. Existe carga positiva en el Gate y carga negativa en el canal, por lo que se desarrolla un campo eléctrico vertical.

Éste es el campo eléctrico que: Controla la cantidad de carga en el canal, determina la conductividad del canal y por lo tanto determina la corriente que circulará por el canal cuando se aplique voltaje entre Drain y Source. **Es en definitiva el campo eléctrico que da su nombre a los Transistores de Efecto de Campo, FETs.**



* **Voltaje V_{DS} pequeño:** Cuando V_{GS} es mayor que V_{th} y se aplica un voltaje de pequeña magnitud (50 mV) entre Drain y Source, los electrones circulan de Source a Drain, por lo tanto la corriente va de Drain a Source.

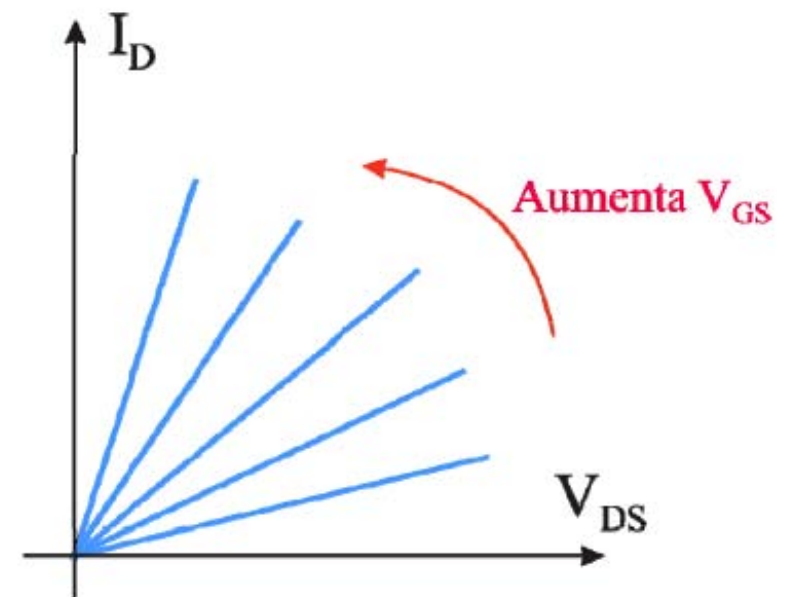
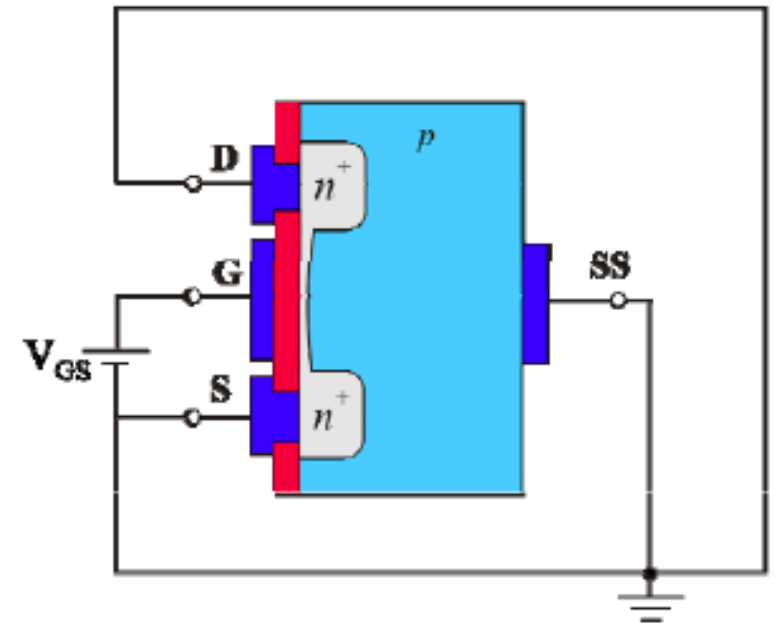
*La magnitud de la corriente depende de la densidad de electrones en el canal, que depende de V_{GS} .

*La conductancia del canal es proporcional al voltaje $V_{GS} - V_{th}$

*La corriente i_D es proporcional al voltaje $V_{GS} - V_{th}$ y al voltaje V_{DS} .

*El dispositivo opera como una resistencia cuyo valor está controlado por V_{GS} .

Debido a la estructura $I_D = I_S$

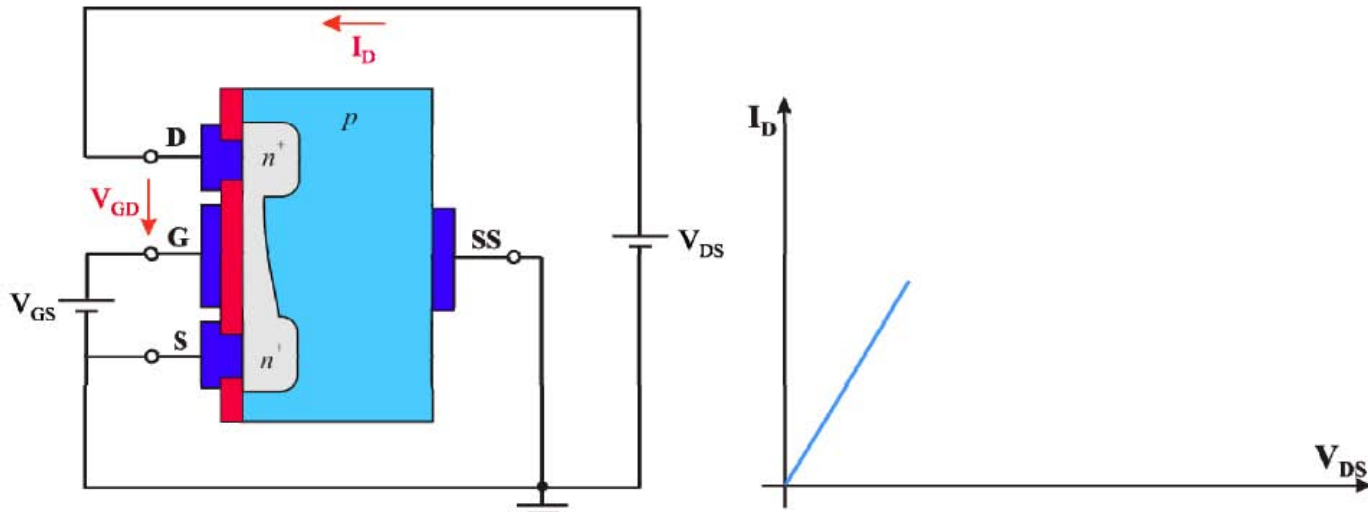
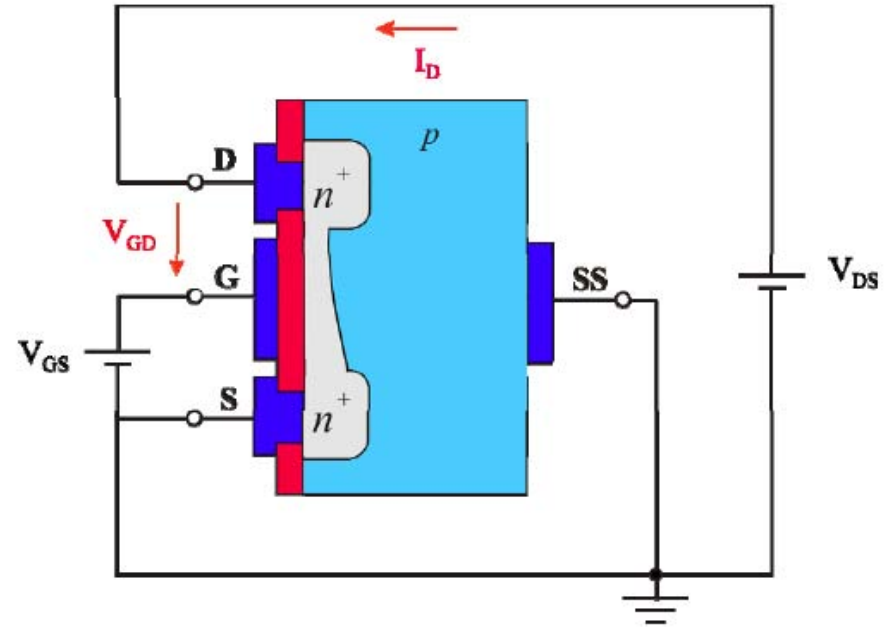


*** Funcionamiento al aumentar v_{DS} :**

En el lado S el voltaje es v_{GS}

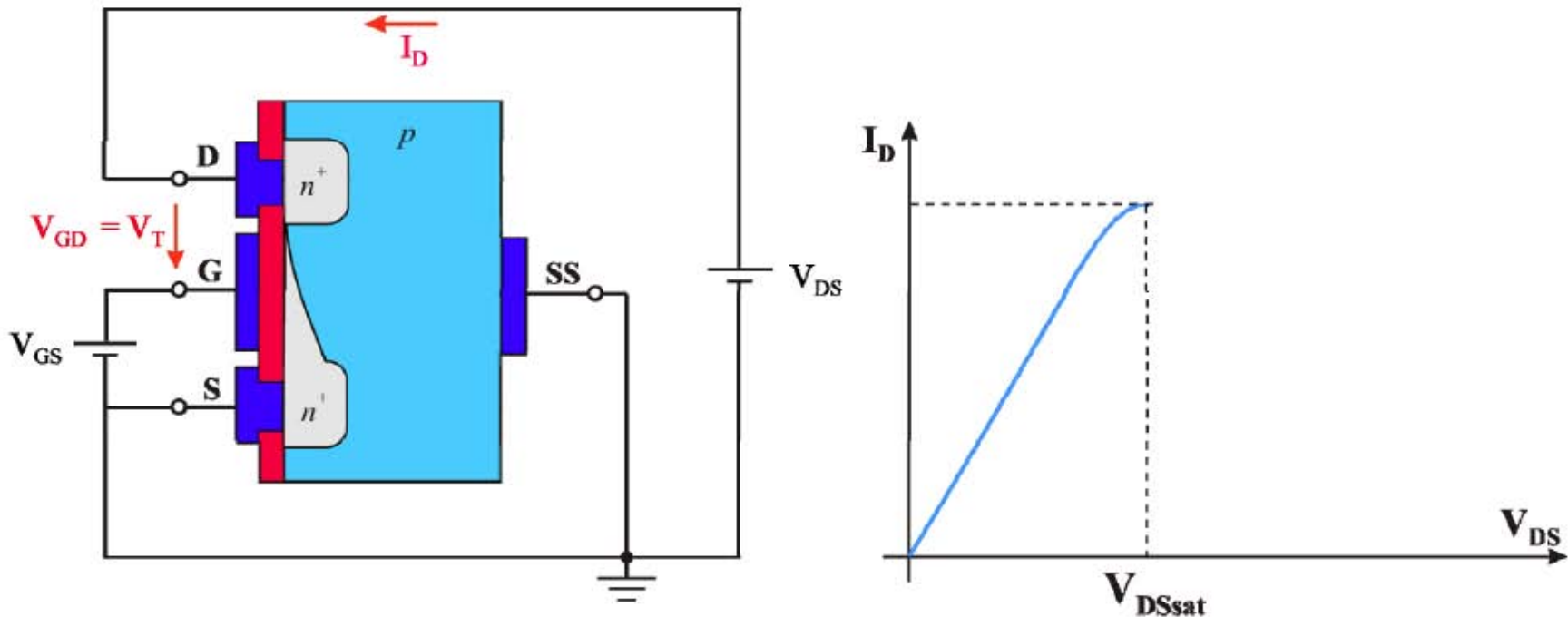
En el lado D el voltaje v_{DS} está dado por $v_{DS} = v_{GS} - v_{GD}$

Al ir aumentando v_{DS} , v_{GD} va disminuyendo: **El canal se estrecha del lado de Drain.**

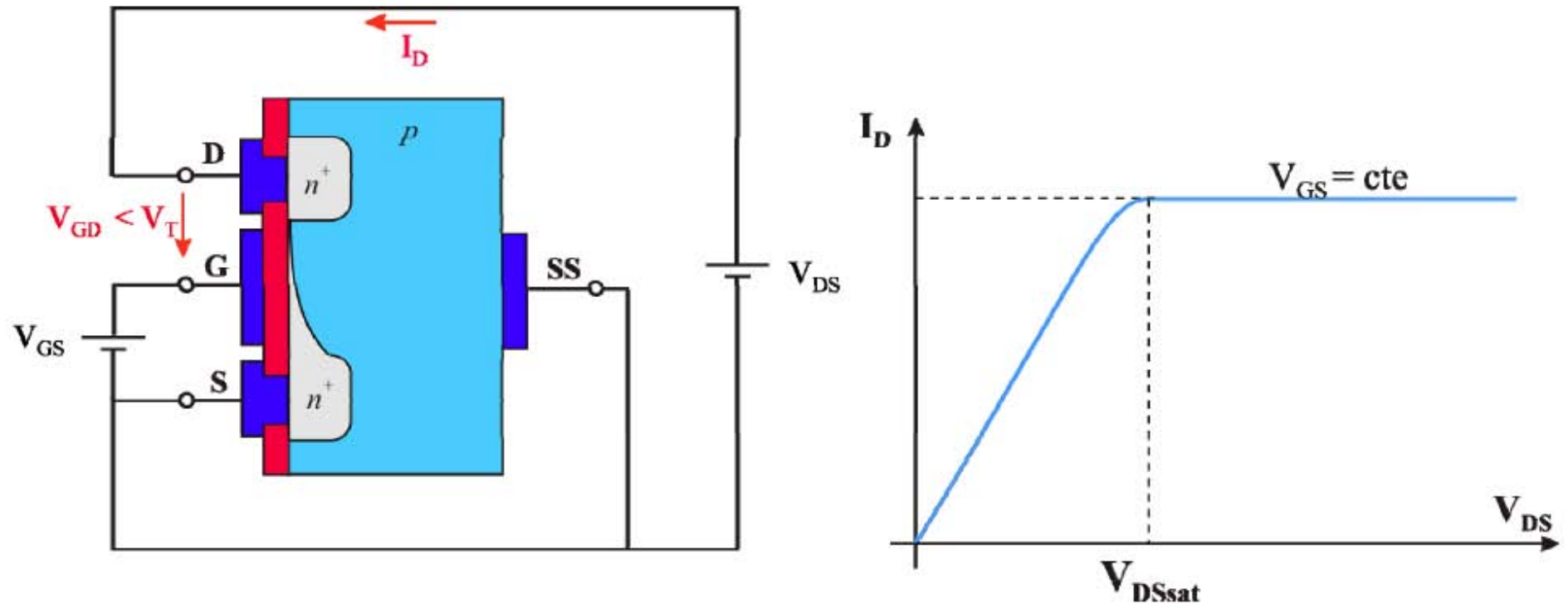


- * Cuando $V_{GS} - V_{DS} = V_{th}$, el canal prácticamente **desaparece**.
- * Este fenómeno se identifica como **pinch-off**
- * El valor de V_{DS} para el que ocurre este fenómeno se denomina V_{DSsat}
- * V_{DSsat} depende del valor de V_{GS} existente:

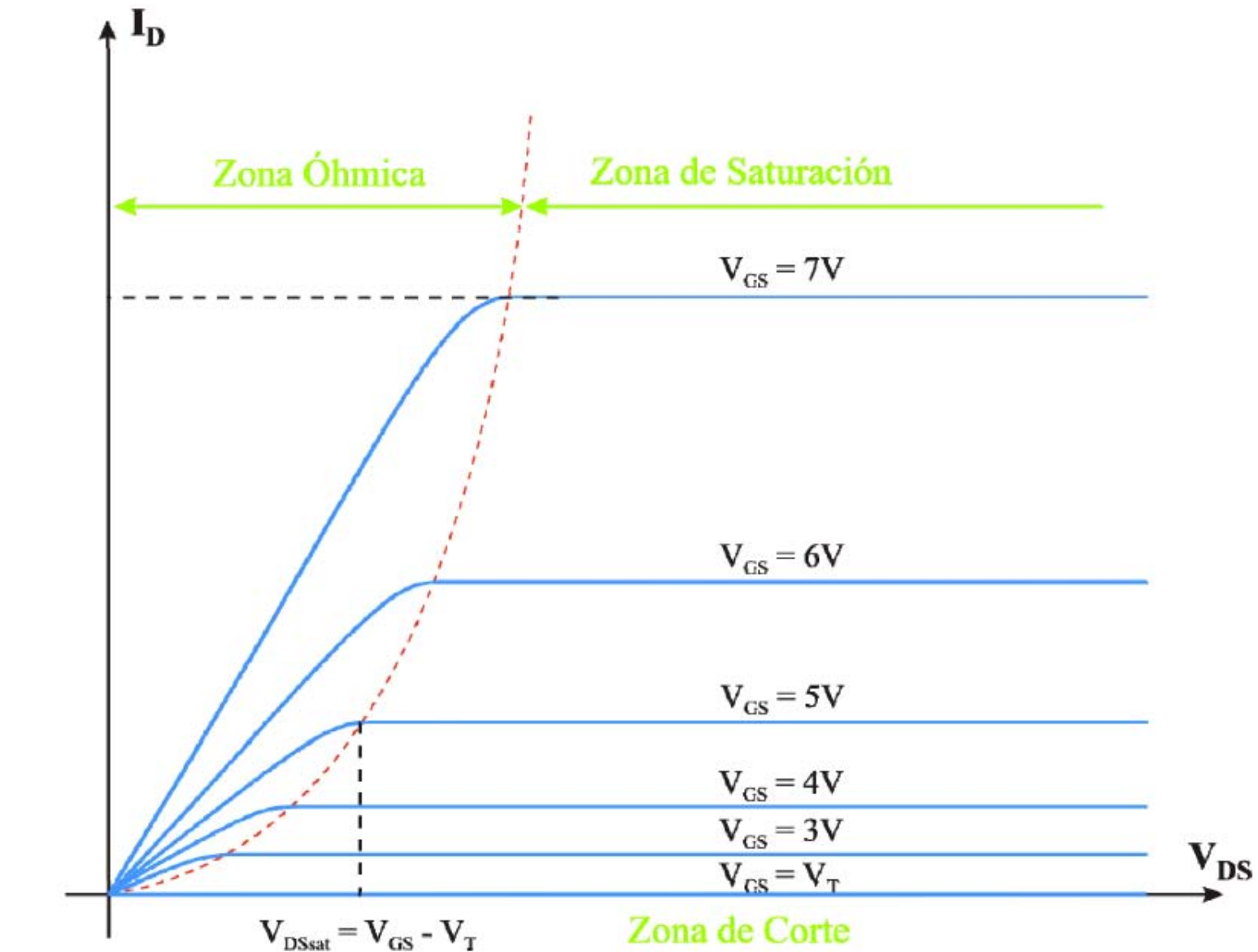
$$V_{DSsat} = V_{GS} - V_T$$



Al aumentar más V_{DS} manteniendo V_{GS} constante, la corriente I_D no aumenta y el dispositivo entra en la **zona de saturación**.



CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UN MOSFET CANAL N DE ENRIQUECIMIENTO



ECUACIONES CORRIENTE-VOLTAJE PARA EL MOSFET DE ENRIQUECIMIENTO

* Para la región óhmica o región de triodo se cumple que $V_{GS} > V_{th}$ $V_{DS} < V_{GS} - V_{th}$
 $V_{GD} > V_{th}$

La relación entre la corriente i_D , el voltaje v_{GS} y el voltaje v_{DS} es:

$$i_D = (\mu_n C_{ox}) \left(\frac{W}{L} \right) \left[(v_{GS} - V_t) v_{DS} - \frac{1}{2} v_{DS}^2 \right]$$

Donde:

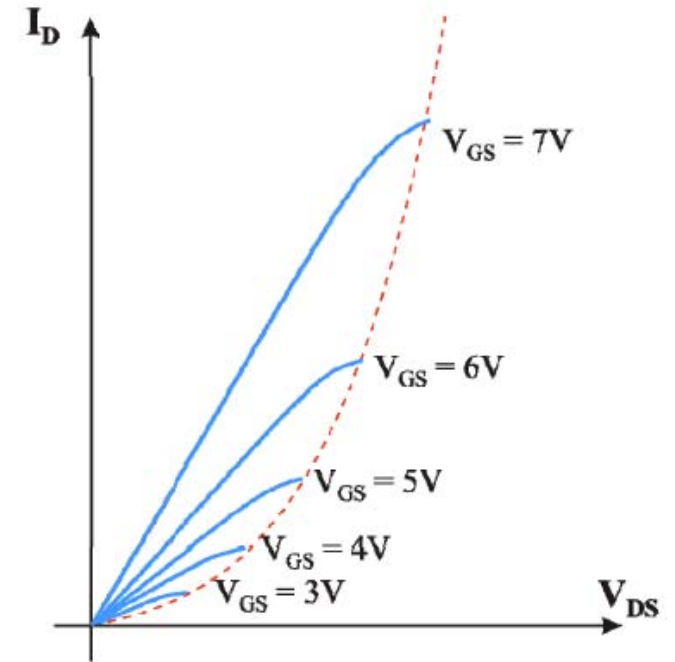
μ_n : movilidad electrones en el canal.

C_{ox} : Capacitancia por unidad de área del condensador de placas paralelas con la capa de óxido como dieléctrico.

W : Ancho del canal L : Longitud del canal

La resistencia del dispositivo es:

$$r_{DS} \equiv \left. \frac{v_{DS}}{i_D} \right|_{\substack{v_{DS} \text{ small} \\ v_{GS} = V_{GS}}} = \left[k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t) \right]^{-1}$$

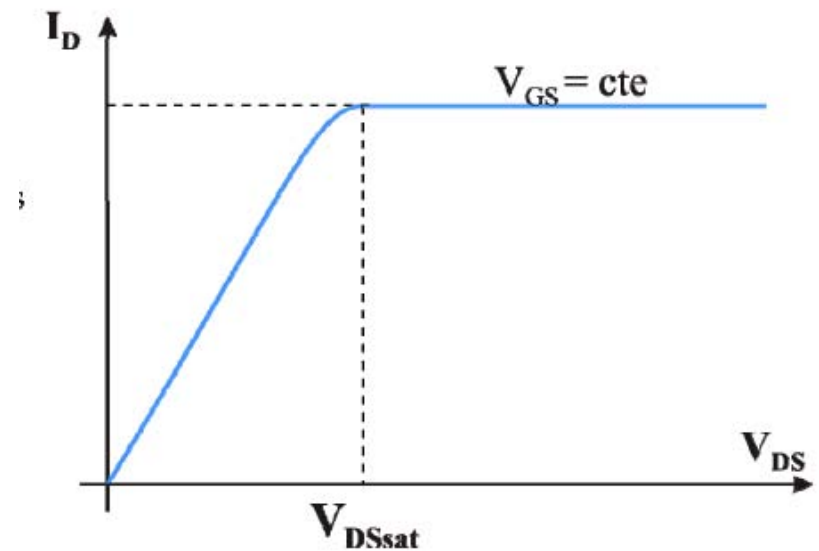


* Para la región de saturación se cumple $V_{GS} \geq V_{th}$ $V_{DS} \geq V_{GS} - V_{th}$
 $V_{GD} < V_{th}$

Sustituyendo V_{DS} por $V_{DS} = V_{GS} - V_{th}$ en la ecuación de la región de triodo se obtiene:

$$i_D = \frac{1}{2} (\mu_n C_{ox}) \left(\frac{W}{L} \right) (v_{GS} - V_t)^2$$

$\mu_n C_{ox}$: Constante determinada por la tecnología utilizada para fabricar el MOSFET: **Parámetro de transconductancia del proceso**



(W/L): Relación de aspecto del MOSFET: El diseñador selecciona este parámetro para definir la característica i-v del MOSFET. Al avanzar la tecnología de fabricación se van reduciendo W y L.

FORMA DE PRESENTACIÓN DE LAS ECUACIONES DEL MOSFET DE ENRIQUECIMIENTO

De la ecuación que define el umbral $V_{DS} = V_{GS} - V_{th} = V_{OV}$

Se define $k'_n = \mu_n C_{ox}$

Para la región triodo $V_{GS} > V_{th}$ $V_{DS} < V_{GS} - V_{th}$ $V_{GD} > V_{th}$

$$i_D = k'_n \frac{W}{L} \left[(v_{GS} - V_t) v_{DS} - \frac{1}{2} v_{DS}^2 \right]$$

Para la región de saturación $V_{GS} \geq V_{th}$ $V_{DS} \geq V_{GS} - V_{th}$ $V_{GD} < V_{th}$

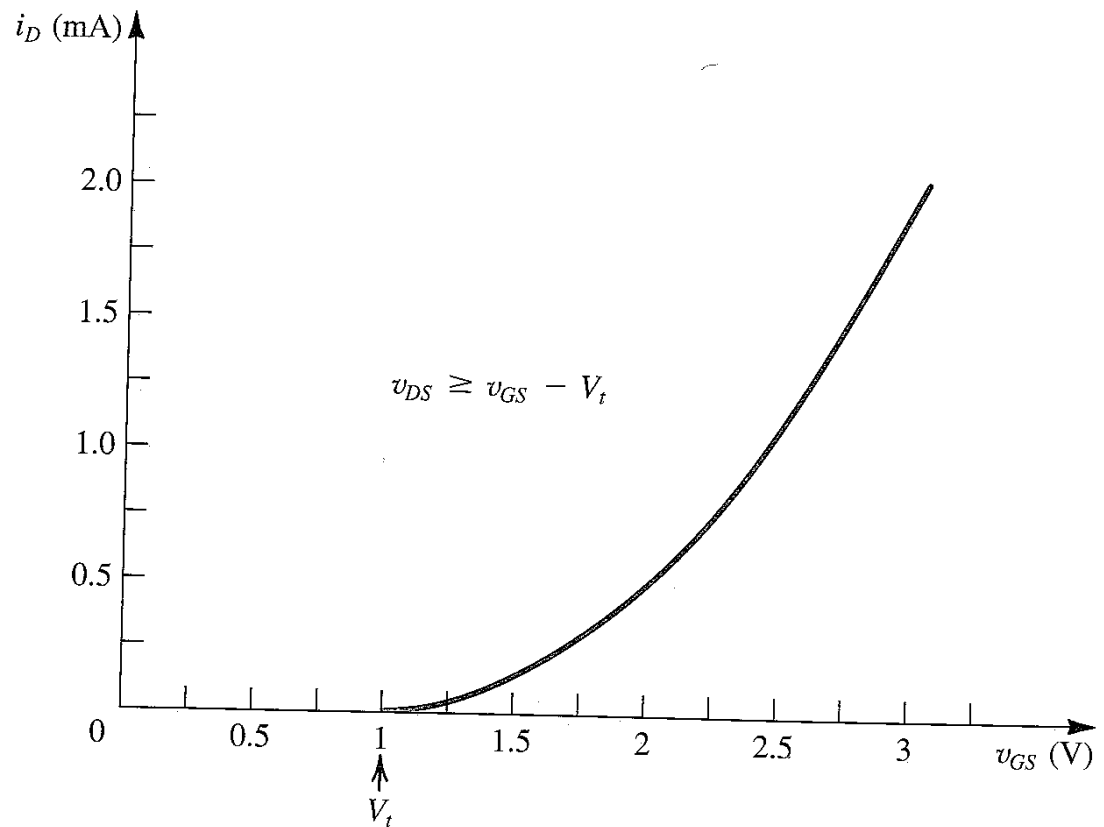
$$i_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)^2$$

CARACTERÍSTICA DE TRANSFERENCIA i_D VS. V_{GS} DEL MOSFET DE ENRIQUECIMIENTO

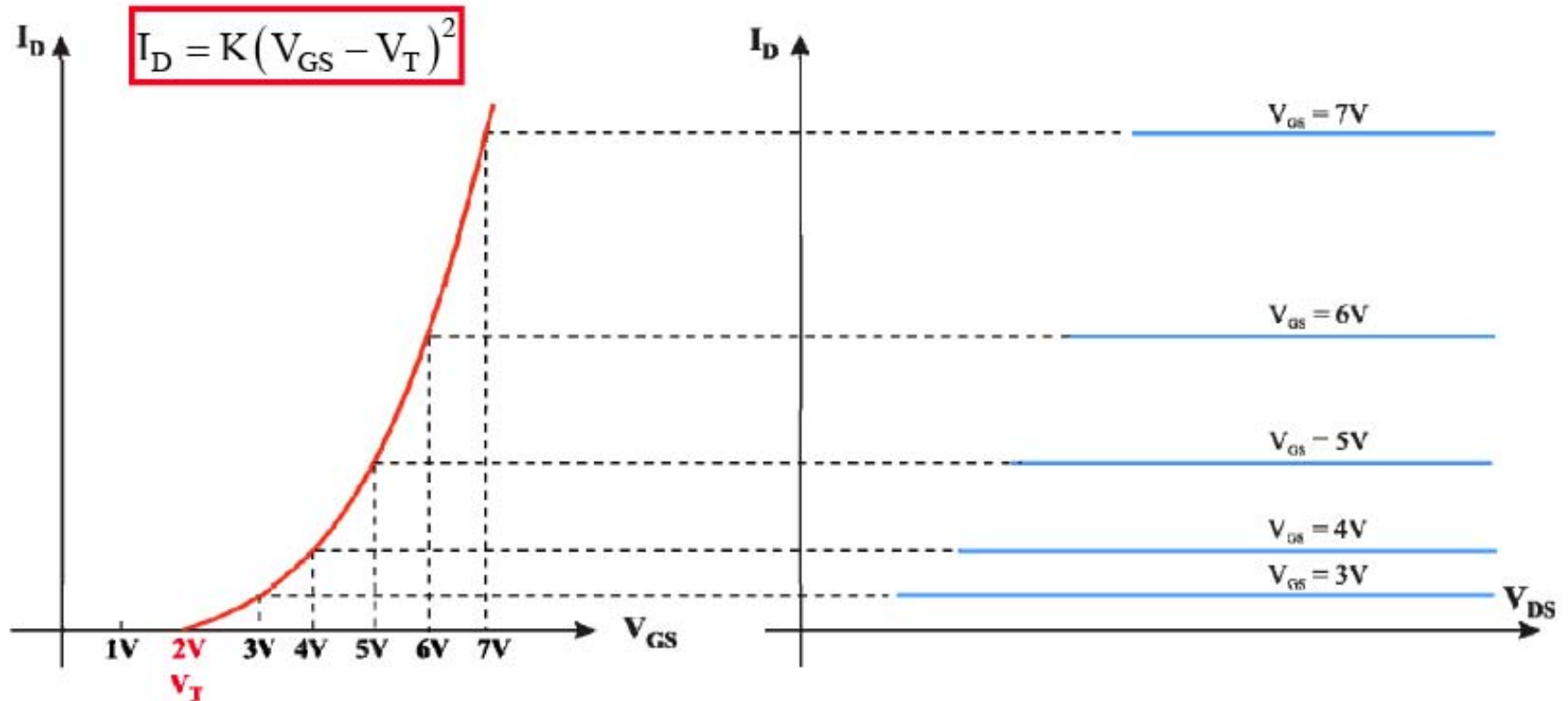
De la ecuación en la zona de saturación puede realizarse la gráfica de la corriente i_D vs. el voltaje v_{GS} en el límite entre las regiones.

$$i_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)^2$$

En la región de saturación el MOSFET se comporta como una fuente de corriente cuyo valor está controlado por v_{GS} .

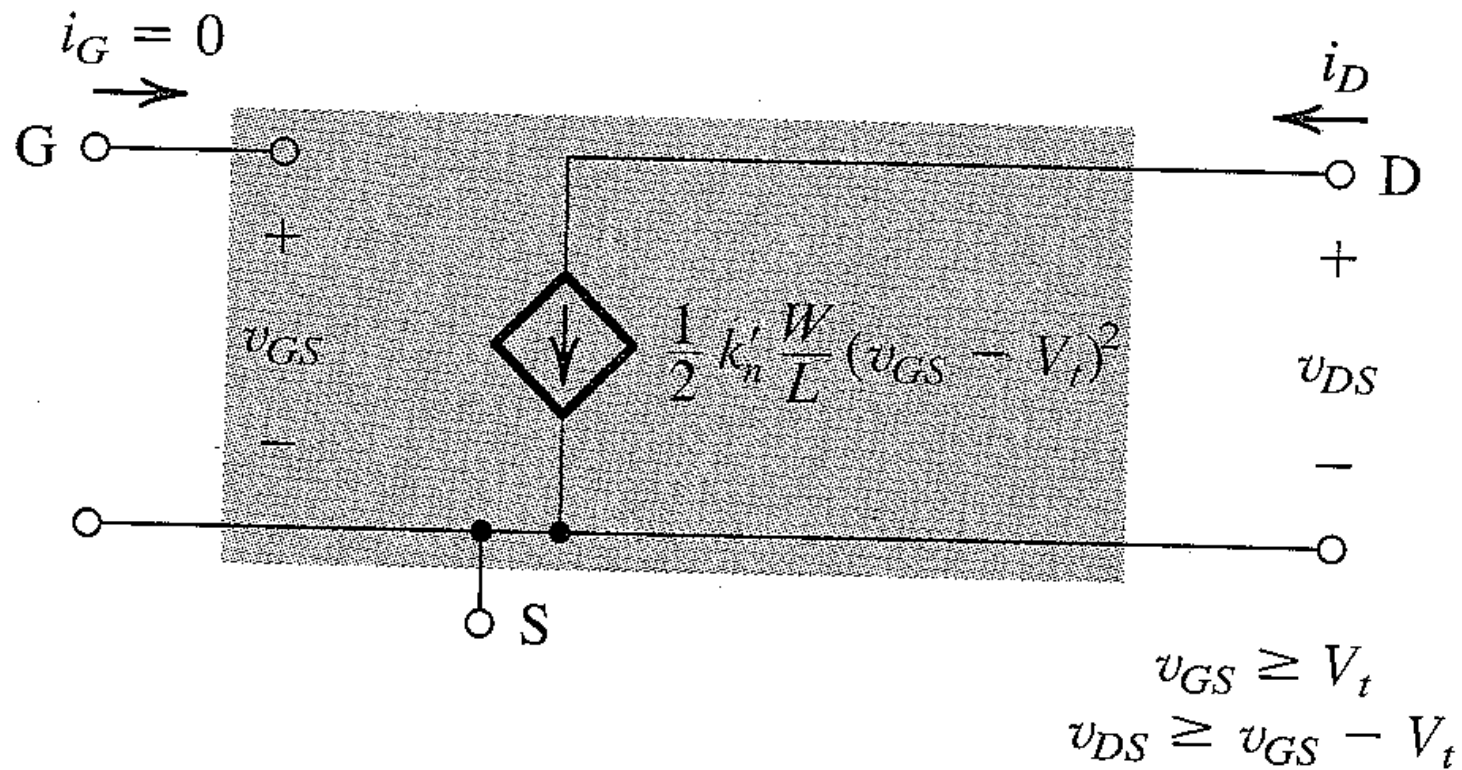


CARACTERÍSTICAS COMPLETAS DEL MOSFET TIPO N DE ENRIQUECIMIENTO



El MOSFET se comporta como una fuente de corriente cuyo valor está controlado por v_{GS}

REPRESENTACIÓN CIRCUITAL DE LA OPERACIÓN DEL MOSFET EN LA REGIÓN DE SATURACIÓN: CIRCUITO EQUIVALENTE DE GRAN SEÑAL



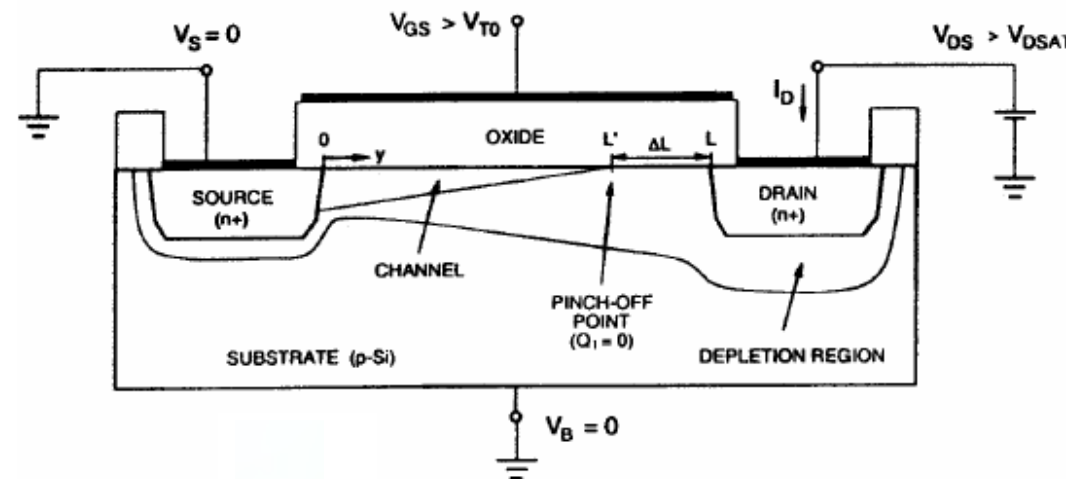
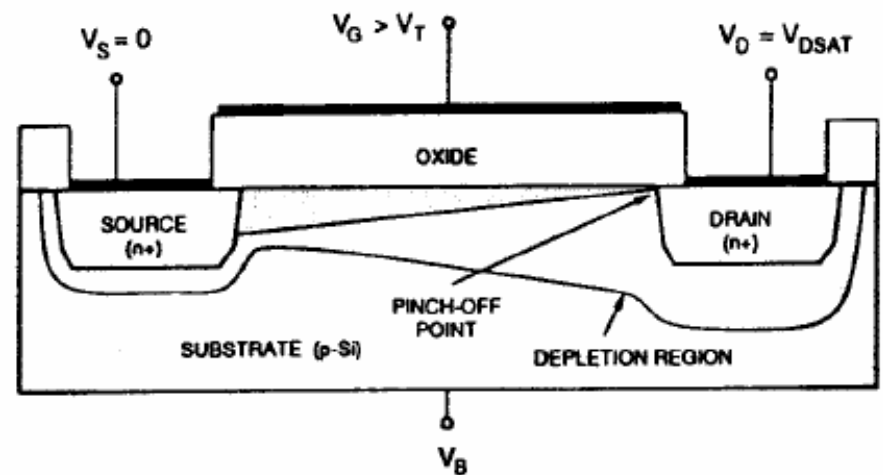
RESISTENCIA EN LA REGIÓN DE SATURACIÓN

* En la práctica, al aumentar v_{DS} se ve afectado el punto de pinch-off. La longitud del canal se reduce (**modulación de la longitud del canal**).

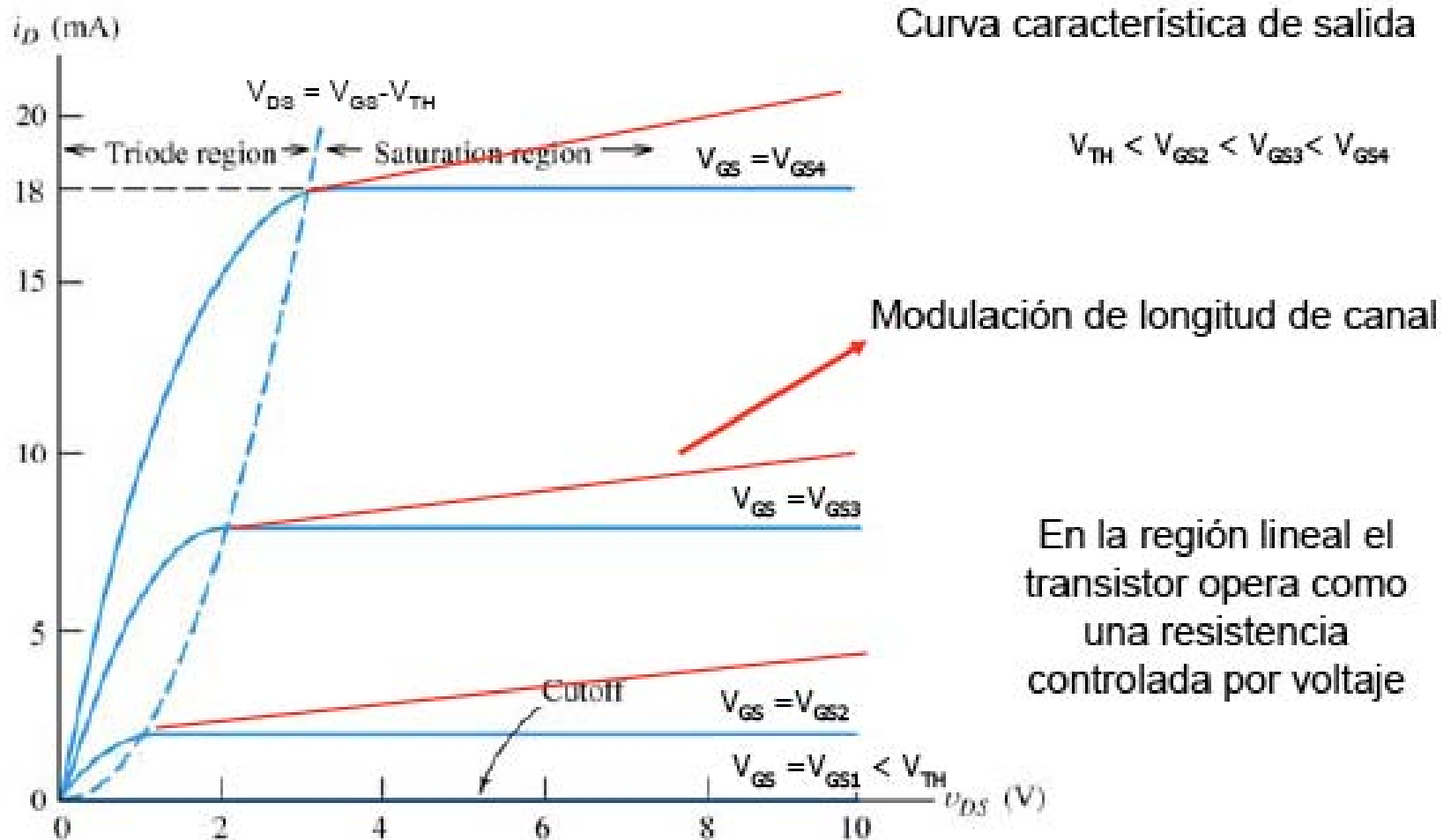
* La corriente i_D es inversamente proporcional a la longitud del canal y aumenta.

$$i_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)^2 (1 + \lambda v_{DS})$$

λ es un parámetro que depende de la tecnología utilizada y es inversamente proporcional a la longitud del canal.



CARACTERÍSTICAS REALES DE SALIDA DE UN MOSFET TIPO ENRIQUECIMIENTO CONSIDERANDO LA MODULACIÓN DEL CANAL



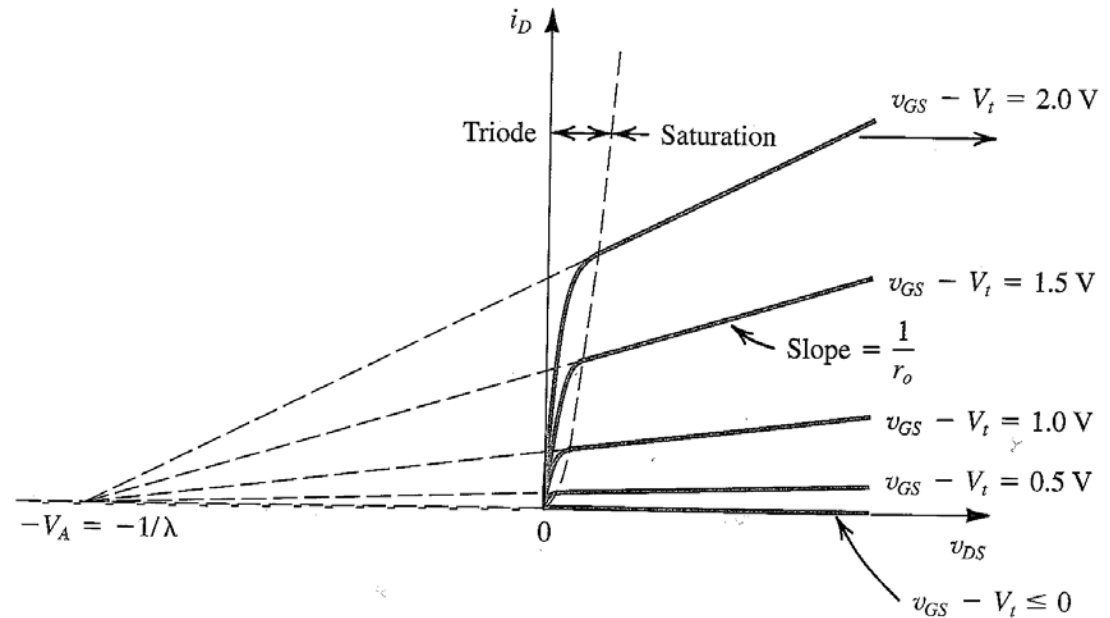
EXTRAPOLACIÓN DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DEL MOSFET

La intersección de la extrapolación de las curvas ocurre en $V_A = 1/\lambda$.

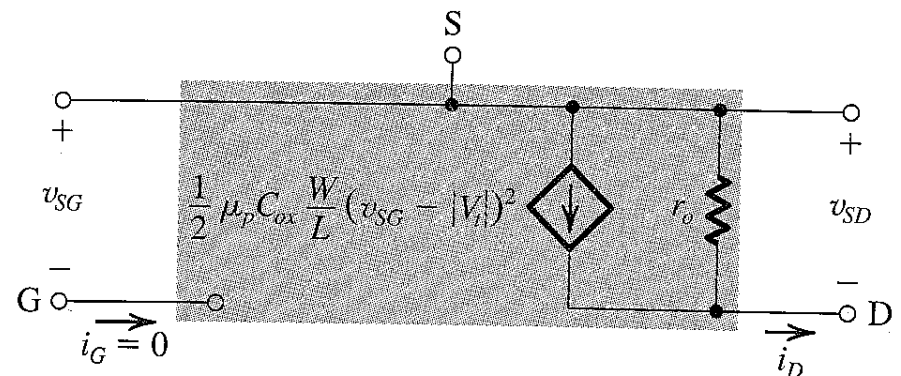
La resistencia de salida es

$$r_o \equiv \left[\frac{\partial i_D}{\partial v_{DS}} \right]_{v_{GS} \text{ constant}}^{-1}$$

$$r_o = \left[\lambda \frac{k'_n}{2} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 \right]^{-1} = \frac{1}{\lambda I_D} = \frac{V_A}{I_D}$$



El modelo de gran señal queda:



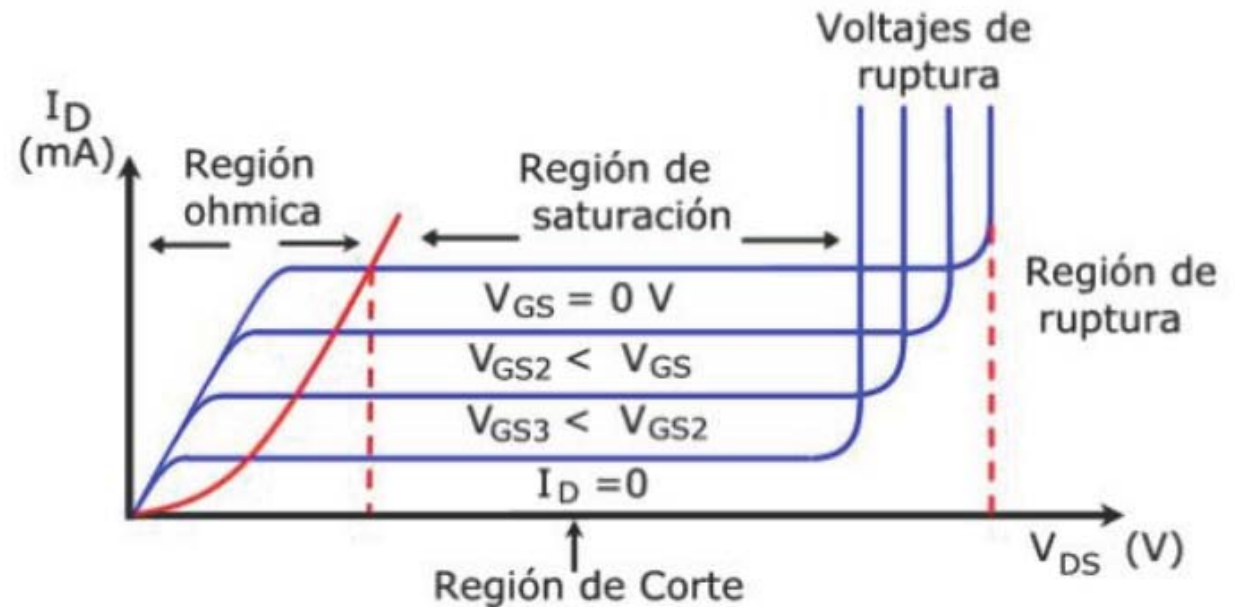
REGIÓN DE RUPTURA

Razones:

*A voltajes v_{GS} elevados se perfora el dieléctrico y se daña el dispositivo. Como la impedancia de entrada es elevada, cargas estáticas pequeñas pueden producir valores altos de v_{GS} . Se protege con diodos.

* En MOS con canales cortos ocurre **punch-through** cuando al aumentar v_{DS} el canal desaparece e i_D aumenta. No es destructivo.

* A medida que aumenta V_D se llega al voltaje de avalancha de la juntura PN (50 a 100V) y la corriente aumenta rápidamente.



EL EFECTO SUSTRATO

- * Usualmente el Sustrato se conecta al Source, por lo que se usa el modelo simplificado de tres terminales.
- * En circuitos integrados el sustrato es común a varios dispositivos.
- * Para mantener la condición de corte de la juntura PN el sustrato se conecta a la fuente más negativa para NMOS y a la más positiva para PMOS. Esto aumenta la región de vaciamiento y reduce la profundidad del canal. Para reponer el canal hay que aumentar v_{GS} .
- * El efecto se puede representar como un cambio en V_{th} al variar V_{SB}

$$V_t = V_{t0} + \gamma [\sqrt{2\phi_f + V_{SB}} - \sqrt{2\phi_f}]$$

Donde: V_{th0} : Voltaje V_{th} para $V_{SB} = 0$

ϕ_f = Parámetro físico ($2\phi_f \approx 0,6V$)

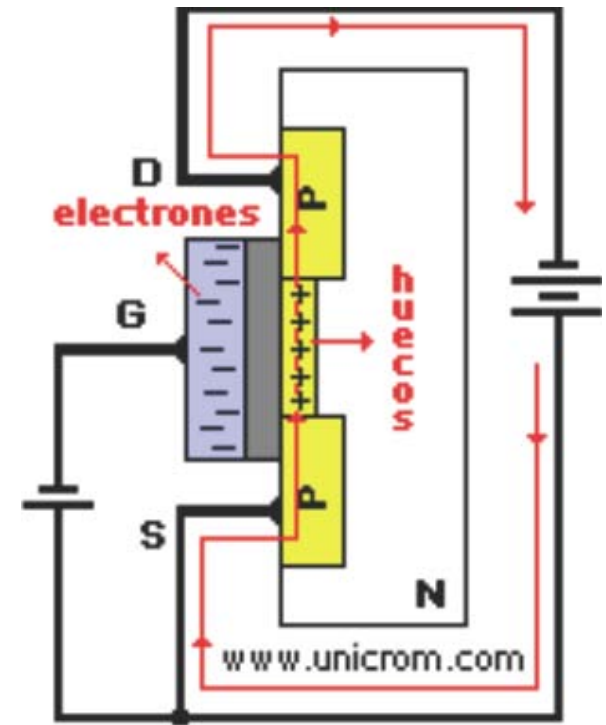
γ = Parámetro del proceso de fabricación. Parámetro del efecto sustrato

* El terminal B actúa como otro G del MOSFET.

$$\gamma = \frac{\sqrt{2qN_A\epsilon_s}}{C_{ox}}$$

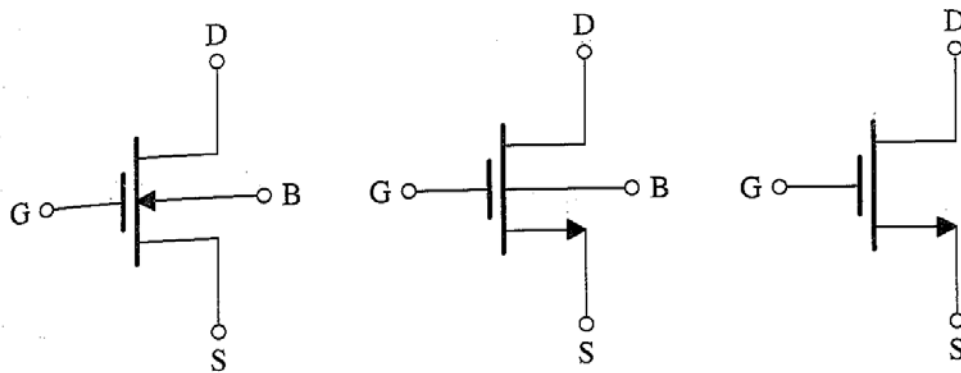
MOSFET DE ENRIQUECIMIENTO CANAL P

- * Los portadores son los huecos.
- * Los voltajes V_{GS} y V_{DS} son negativos.
- * Las ecuaciones para la región triodo y la región de saturación son las mismas.
- * Inicialmente los PMOS dominaban el mercado, pero luego se desarrollaron NMOS más pequeños y más rápidos, que necesitan voltajes de fuente menores.
- * Los PMOS están presentes en la estructura de MOSFET complementarios o **CMOS**, que es la tecnología dominante hoy en día.

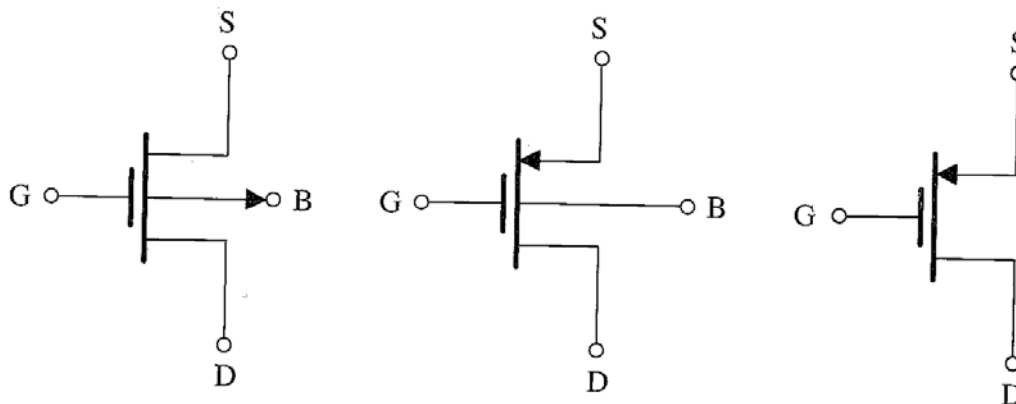


SÍMBOLOS CIRCUITALES

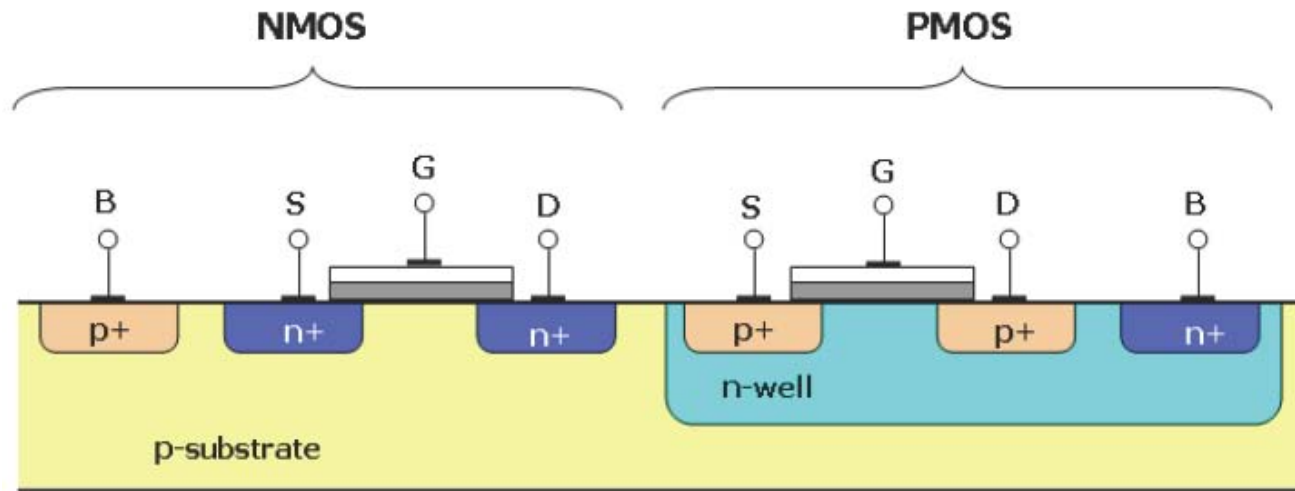
Para el NMOS de enriquecimiento (MOSTET canal N)



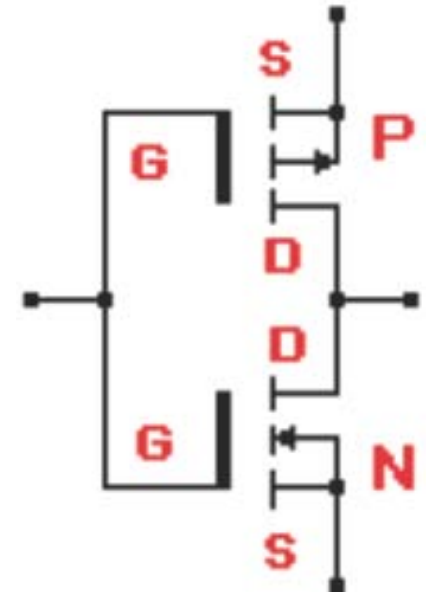
Para el PMOS de enriquecimiento (MOSTET canal P)



MOSFET COMPLEMENTARIOS O CMOS

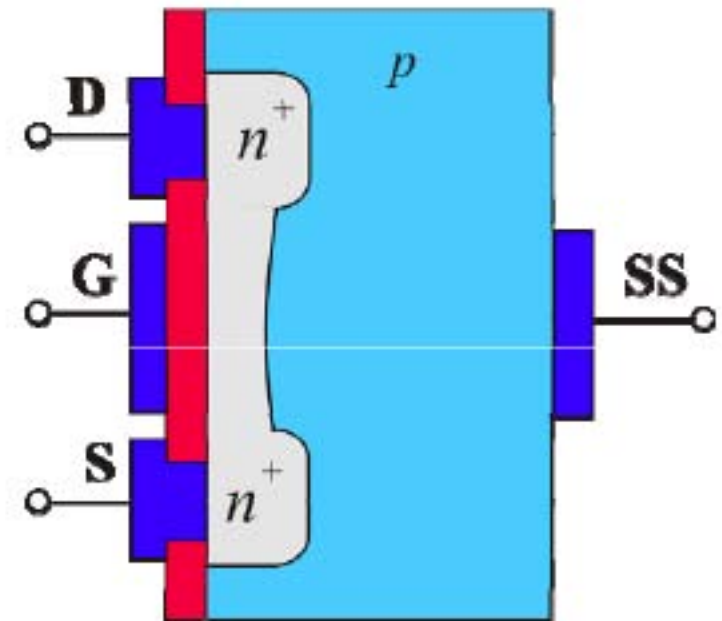


- * Esta tecnología se usa en circuitos integrados, tanto analógicos como digitales.
- * El NMOS se implementa directamente sobre el sustrato P.
- * Para el PMOS se fabrica una región N.
- * Se incluye un aislamiento entre los dos dispositivos.

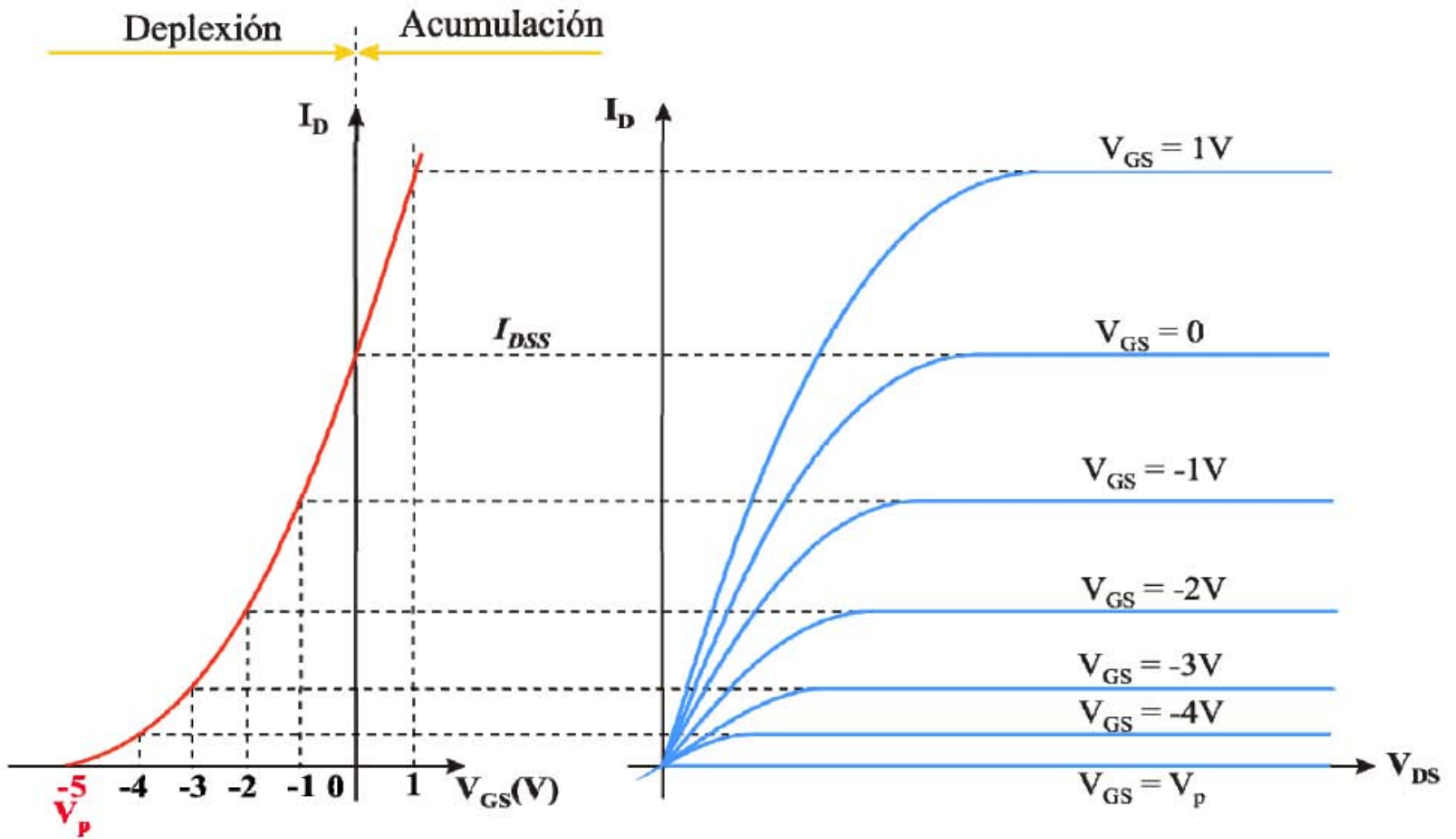


MOSFET DE VACIAMIENTO O EMPOBRECIMIENTO (DEPLETION)

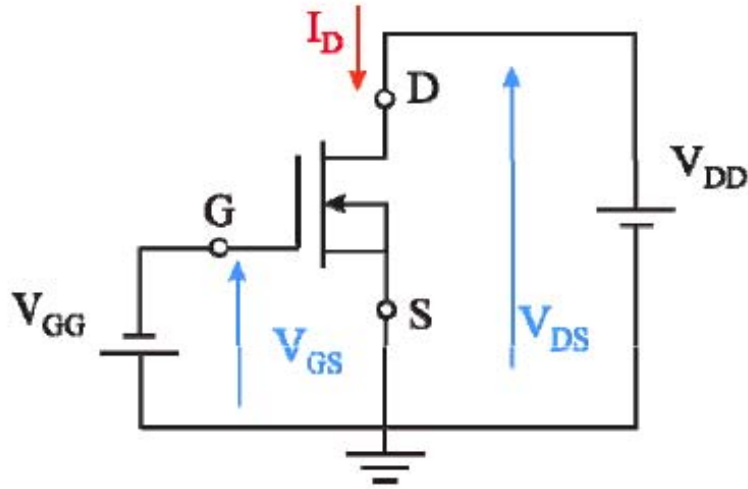
- * Tiene un canal implantado durante la fabricación.
- * Si se aplica v_{DS} hay circulación de corriente aún con $v_{GS}=0$.
- * Para v_{GS} positivos aumenta el canal y circula una i_D mayor.
- * Para v_{GS} negativos disminuye el canal y la conductividad decrece. El MOS trabaja en el modo de vaciamiento.
- * Cuando v_{GS} llega al valor en el que se han eliminado los portadores del canal, la corriente i_D es cero aunque todavía haya v_{DS} aplicado. Dicho valor de v_{GS} es el **voltaje de umbral V_{th}**



CURVAS CARACTERÍSTICAS DEL MOSFET DE VACIAMIENTO CANAL P

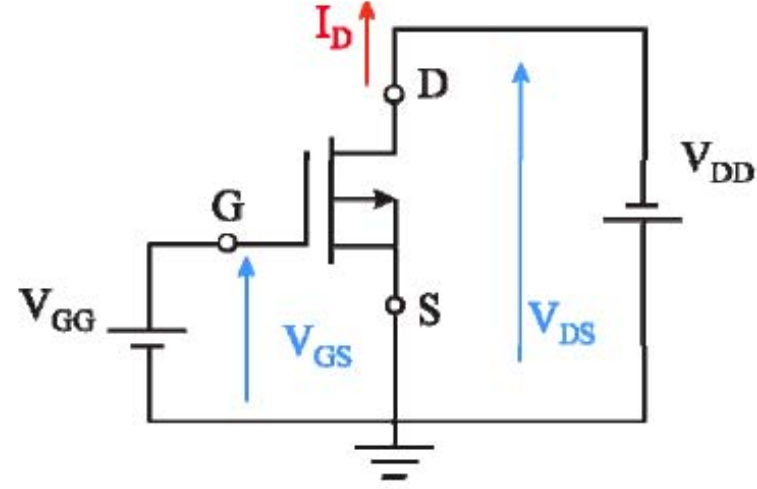


VOLTAJES Y CORRIENTES EN LOS MOSFET DE VACIAMIENTO



Canal n

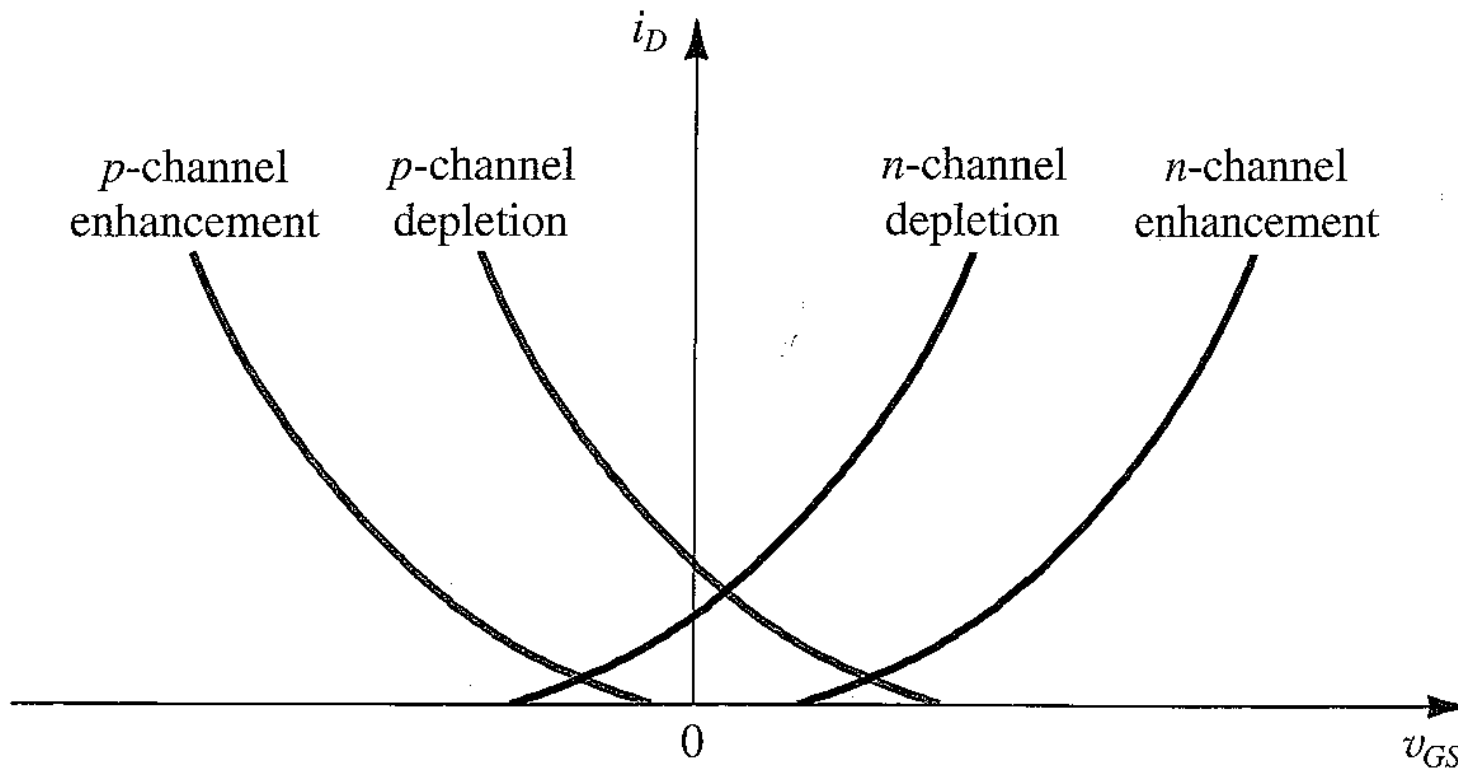
V_{DS} positivo
 V_{GS} negativo o positivo
 I_D positiva (entrante)



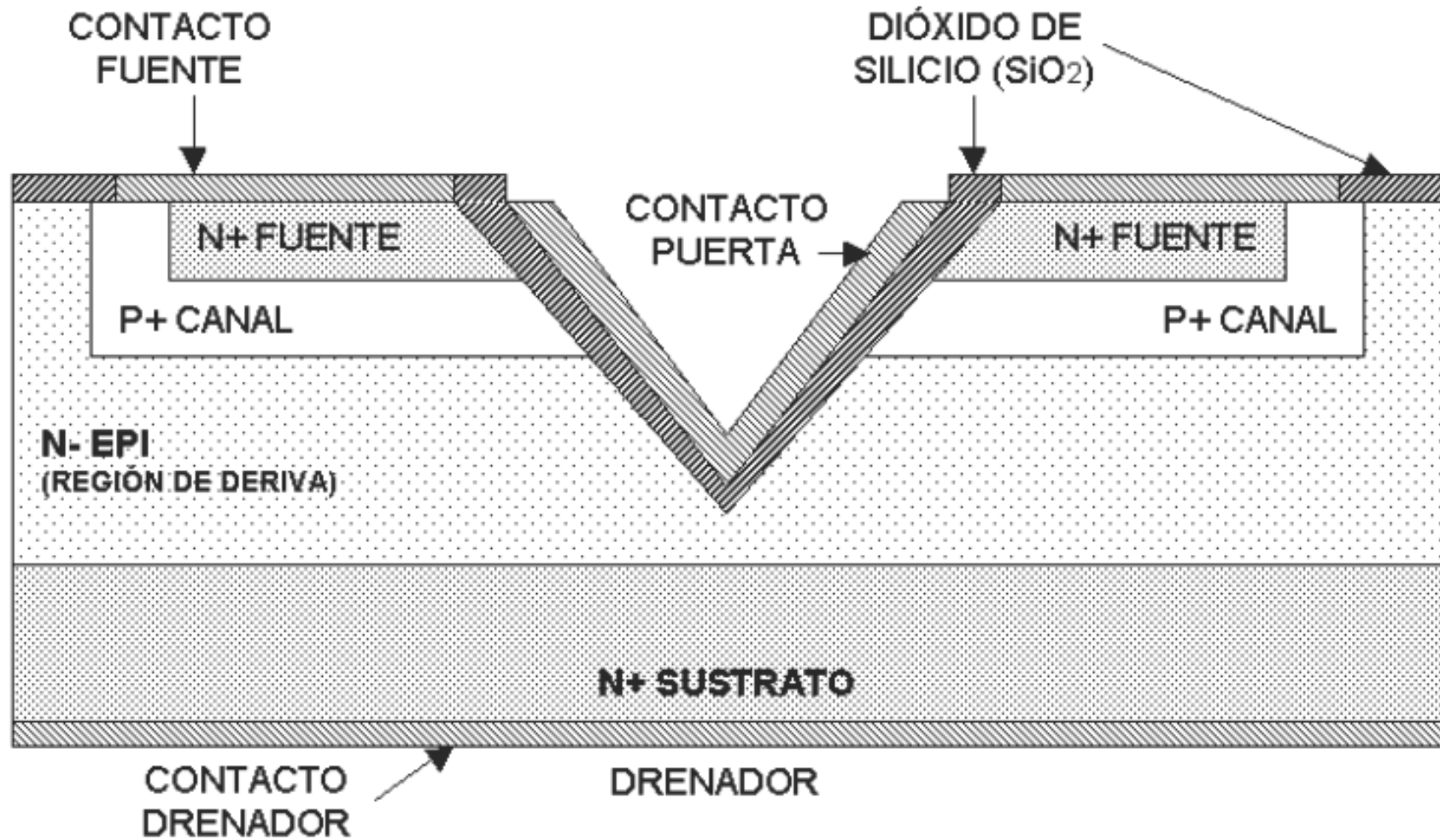
Canal p

V_{DS} negativo
 V_{GS} positivo o negativo
 I_D negativa (saliente)

CURVAS CARACTERÍSTICAS i_D vs V_{GS} PARA MOSFETS DE ENRIQUECIMIENTO Y DE VACIAMIENTO CANAL N Y CANAL P



MOSFET DE POTENCIA



POLARIZACIÓN DE MOSFETS

1.-Determine los valores de las resistencias para que el MOSFET opere a $I_D = 0,4 \text{ mA}$ y $V_D = 0,5\text{V}$. Los parámetros son $V_{th}=0,7\text{V}$, $\mu_n C_{ox}=100\mu\text{A}/\text{V}^2$, $L = 1\mu\text{m}$ $W = 32\mu\text{m}$. Considere $\lambda = 0$.

Dado que $V_D = 0,5\text{V}$ es mayor que V_G , ($V_{GD} < V_{th}$) el MOSFET va a estar en la región de saturación.

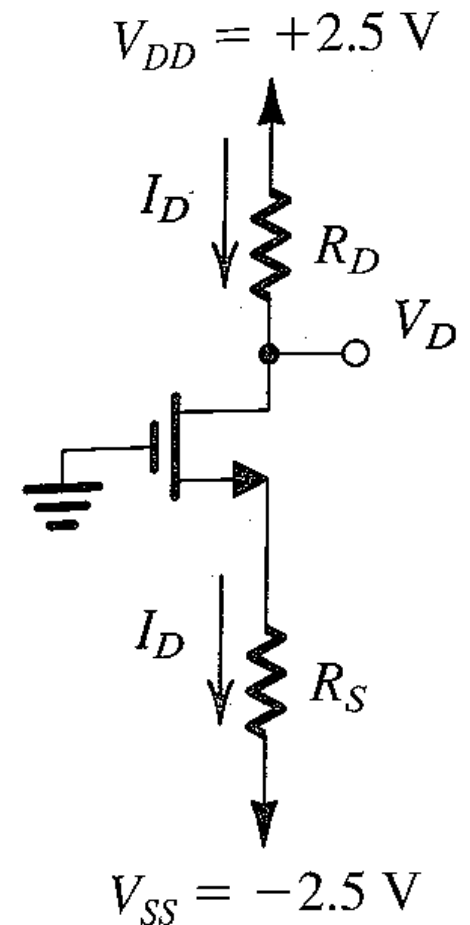
$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 \quad V_{GS} - V_t = V_{OV},$$

Sustituyendo: $400 = \frac{1}{2} \times 100 \times \frac{32}{1} V_{OV}^2$
 $V_{OV} = \pm 0,5 \text{ V}$

$$V_{GS} = V_t + V_{OV} = 0.7 + 0.5 = 1.2 \text{ V} \quad V_S = -1,2\text{V}$$

$$R_S = \frac{V_S - V_{SS}}{I_D} = \frac{-1.2 - (-2.5)}{0.4} = 3.25 \text{ k}\Omega$$

$$R_D = \frac{V_{DD} - V_D}{I_D} = \frac{2.5 - 0.5}{0.4} = 5 \text{ k}\Omega$$



2.-Determine el valor de la resistencia R para que el MOSFET opere a $I_D=80\mu\text{A}$ y determine el valor de V_D . Los parámetros son $V_{th}=0,6\text{V}$, $\mu_n C_{ox}=200\mu\text{A}/\text{V}^2$, $L = 0,8\mu\text{m}$ $W = 4\mu\text{m}$. Considere $\lambda = 0$.

$V_{GD}=0$. Como $V_{GD} < V_{th}$ está en la región de saturación.

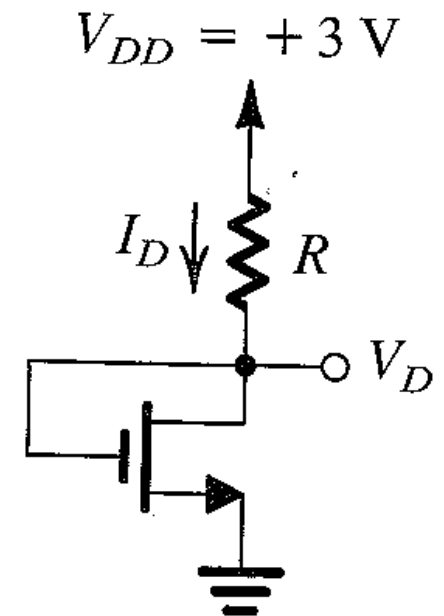
$$I_D = \frac{1}{2}\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 = \frac{1}{2}\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} V_{OV}^2$$

$$V_{OV} = \sqrt{\frac{2I_D}{\mu_n C_{ox} (W/L)}} = \sqrt{\frac{2 \times 80}{200 \times (4/0.8)}} = 0.4 \text{ V}$$

$$V_{GS} = V_t + V_{OV} = 0.6 + 0.4 = 1 \text{ V}$$

$$V_D = V_G = +1 \text{ V}$$

$$R = \frac{V_{DD} - V_D}{I_D} = \frac{3 - 1}{0.080} = 25 \text{ k}\Omega$$



3.-Determine el valor de la resistencia R para que $V_D=0,1V$. ¿Cuál es la resistencia efectiva entre Drain y Source en este punto de operación? Los parámetros son $V_{th}=1V$, $k_n'(W/L) = 1mA/V^2$.

$$V_G=5V \text{ y } V_D=0,1V \quad V_{GD}=4,9V$$

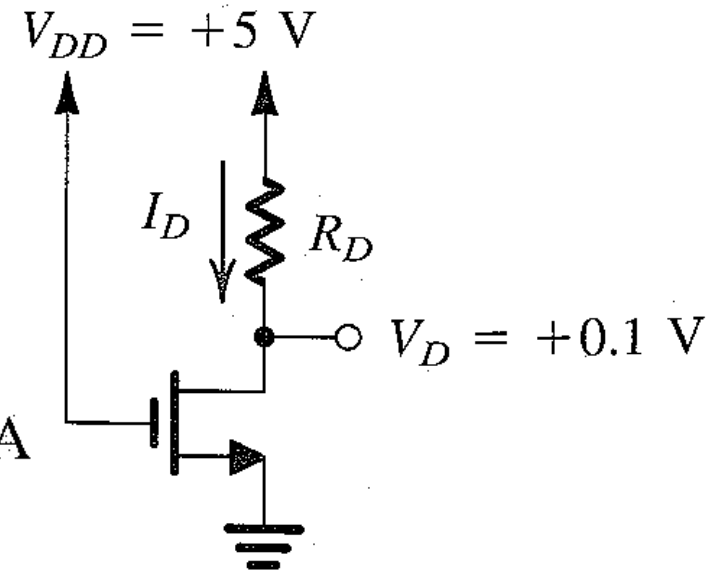
$V_{GD} > V_{th}$ Está en la región de triodo

$$I_D = k_n' \frac{W}{L} \left[(V_{GS} - V_t) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right]$$

$$I_D = 1 \times \left[(5 - 1) \times 0.1 - \frac{1}{2} \times 0.01 \right] = 0.395 \text{ mA}$$

$$R_D = \frac{V_{DD} - V_D}{I_D} = \frac{5 - 0.1}{0.395} = 12.4 \text{ k}\Omega$$

$$r_{DS} = \frac{V_{DS}}{I_D} = \frac{0.1}{0.395} = 253 \Omega$$



Se selecciona 12k Ω

4.-Determine el valor de los voltajes y corrientes. Los parámetros son $V_{th}=1V$, $k_n'(W/L) = 1mA/V^2$.

Voltaje de Thevenin en el Gate:

$$V_G = V_{DD} \frac{R_{G2}}{R_{G2} + R_{G1}} = 10 \times \frac{10}{10 + 10} = +5 V$$

Se comienza suponiendo saturación.

$$V_{GS} = 5 - 6I_D \quad I_D = \frac{1}{2} k_n' \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2$$

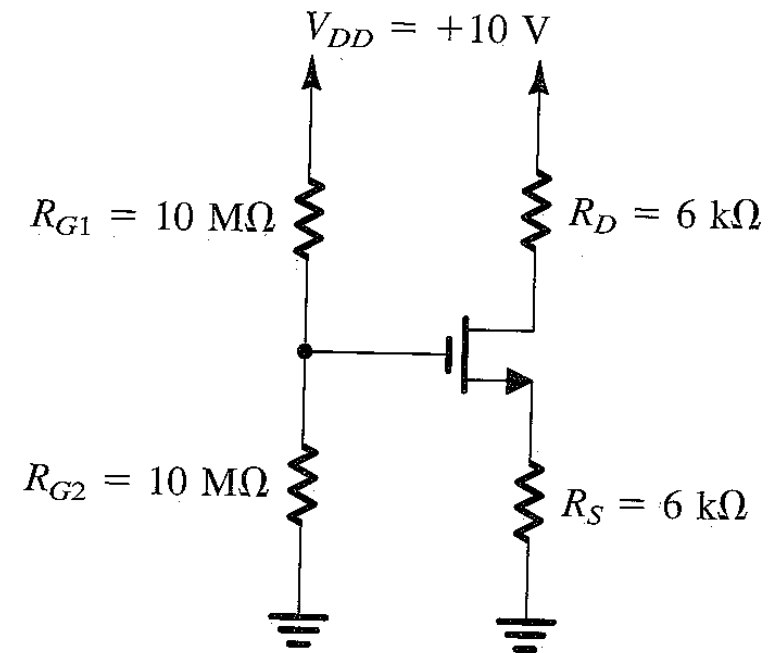
$$18I_D^2 - 25I_D + 8 = 0 \quad \text{Dos valores: } 0,89 \text{ y } 0,5$$

Con 0,89mA $V_{GS} = 5 - 0,89 \times 6 = 5 - 5,34 = -0,34V$; $V_{GS} < V_{th}$ No es válido

Con 0,5mA $V_{GS} = 5 - 0,5 \times 6 = 5 - 3 = 2V$; $V_{GS} > V_{th}$

$V_D = 10 - 6 \times 0,5 = 7V$ $V_{GD} = 5 - 7 = -2V < V_{th} = 1V$ Está en saturación

$V_S = 6 \times 0,5 = 3V$; $V_{DS} = V_D - V_S = 7 - 3 = 4V$



RECTA DE CARGA

