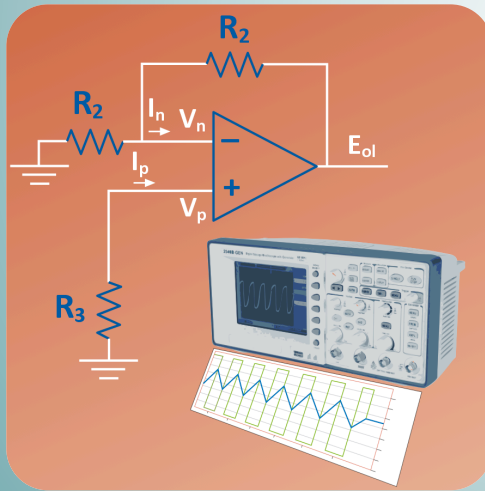


Electrónica Básica

Tema B.1.

El Transistor MOS: Estructura Física y Modelos de Circuito



Gustavo A. Ruiz Robredo

Juan A. Michell Martín

DPTO. DE ELECTRÓNICA Y COMPUTADORES

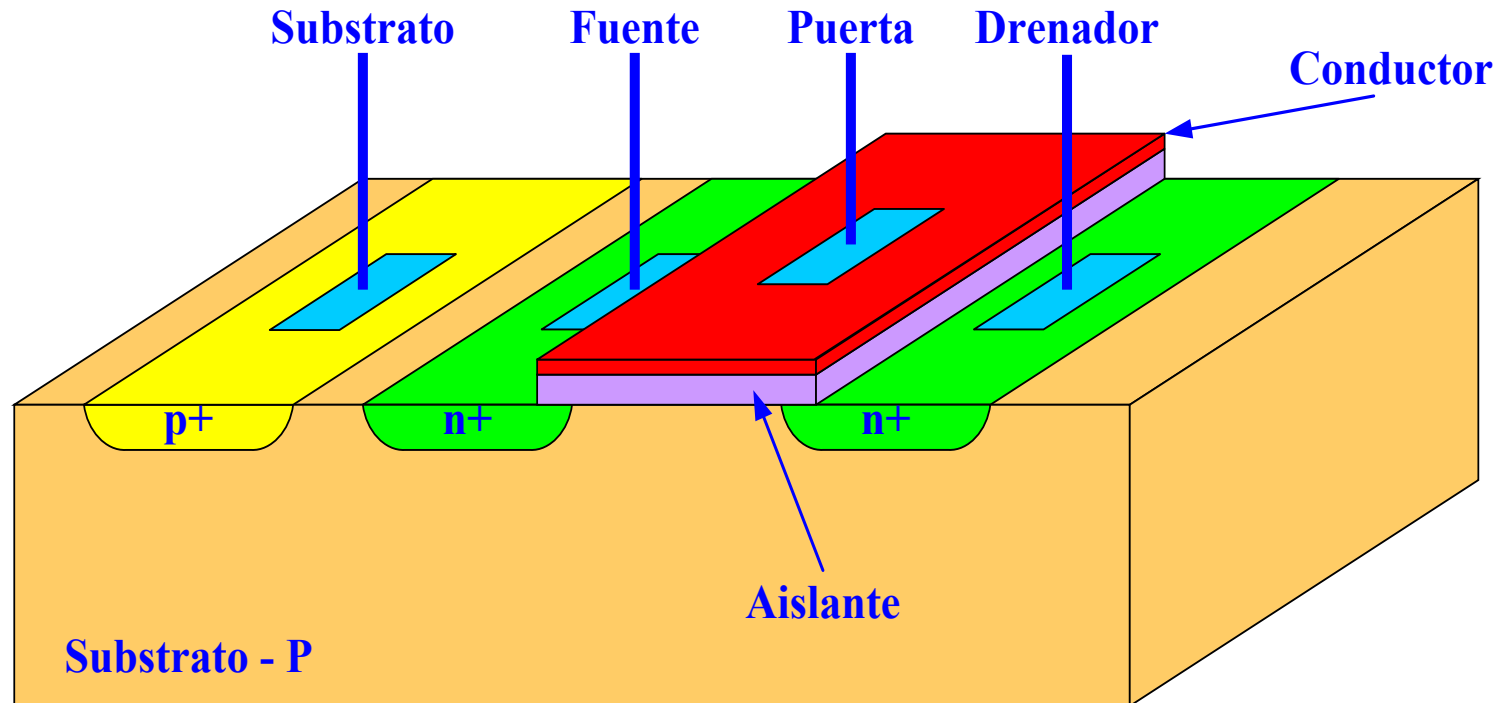
Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/)



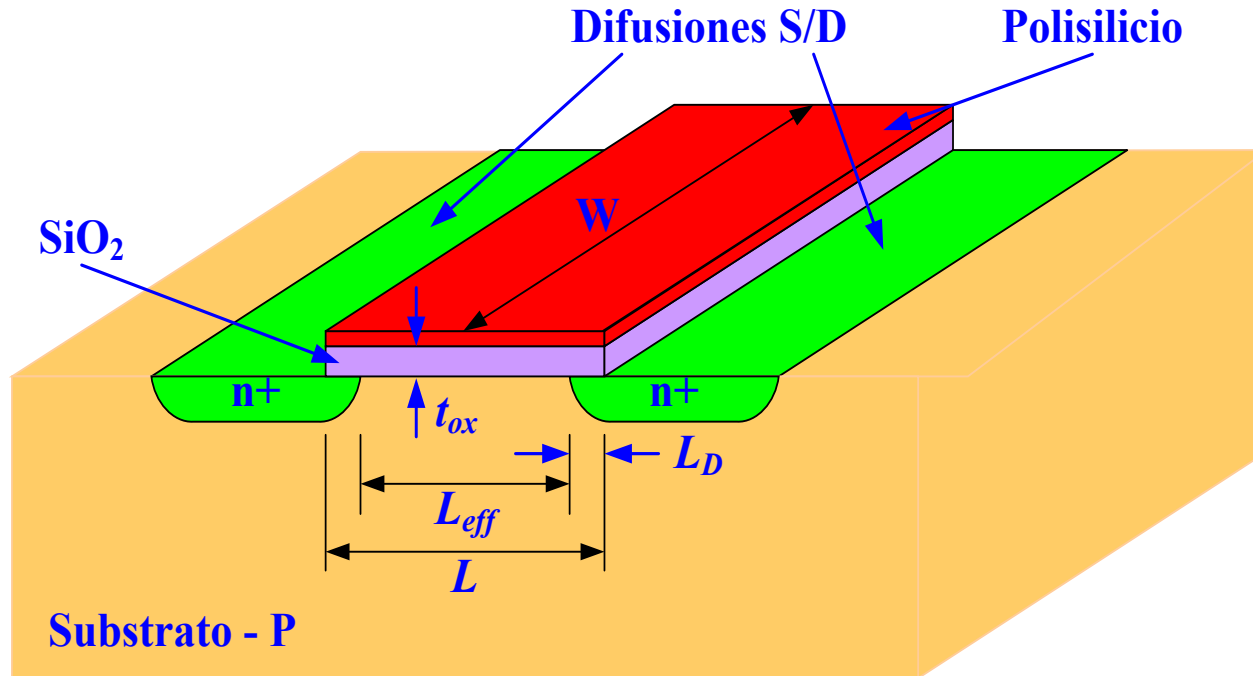
Estructura del Transistor NMOS

- Transistor NMOS de enriquecimiento:



Transistor NMOS

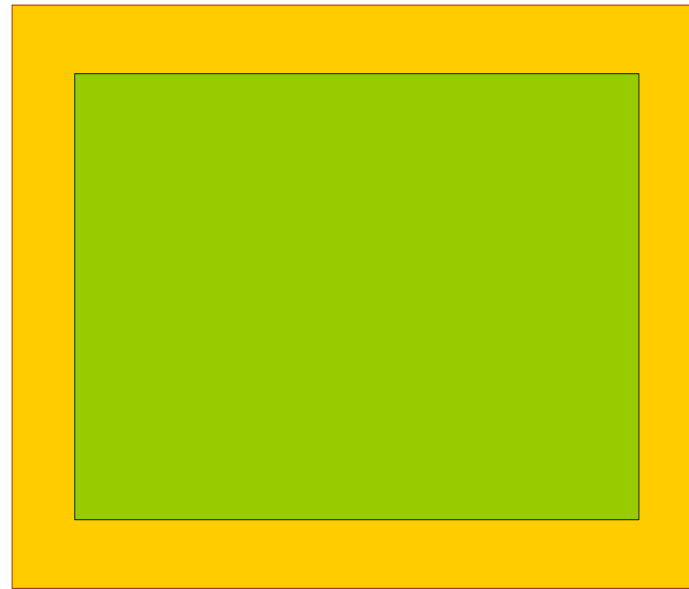
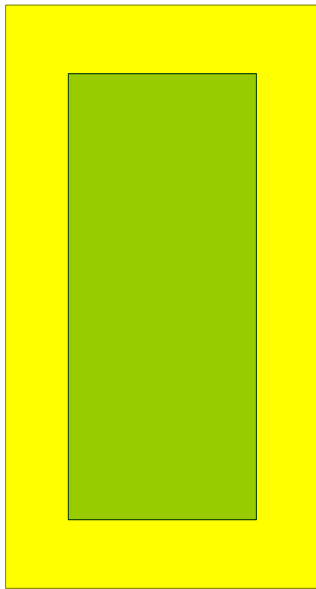
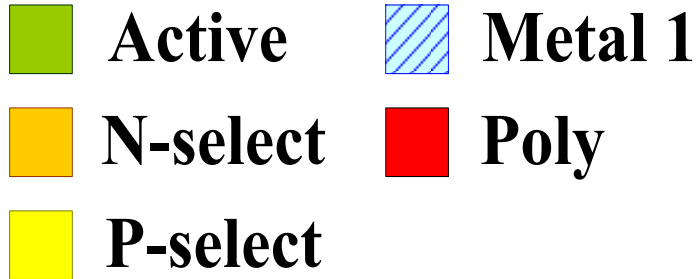
- Características físicas



$$L_{eff} = L - 2L_D \quad , \quad C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}}$$

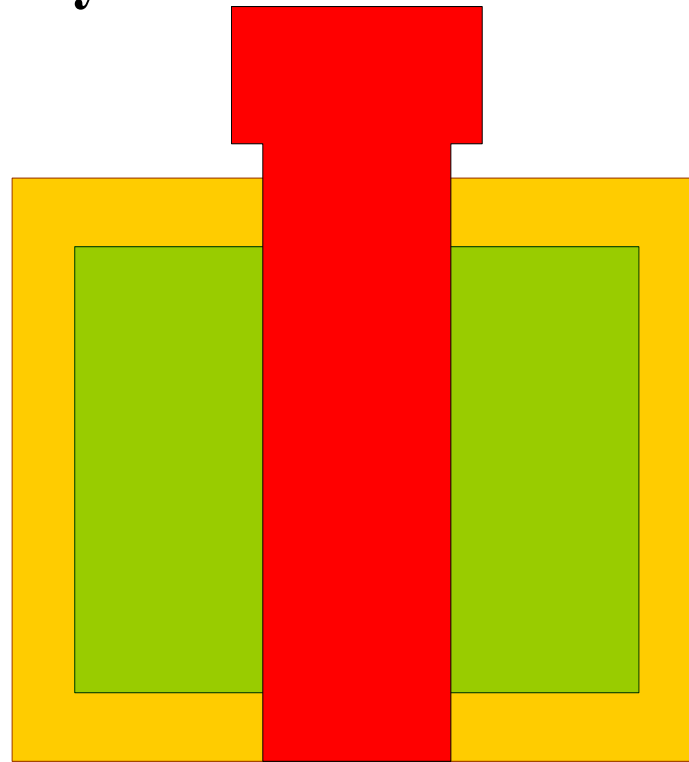
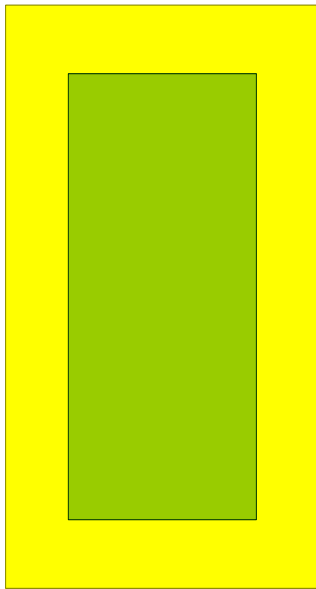
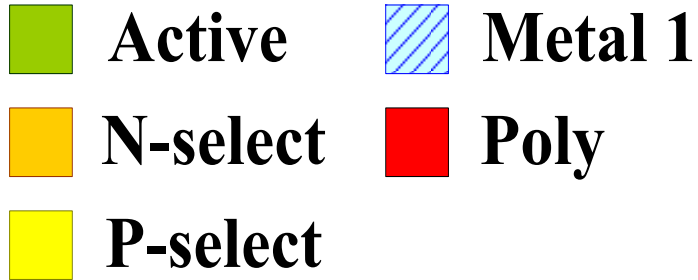
Transistor NMOS

- *Layout*



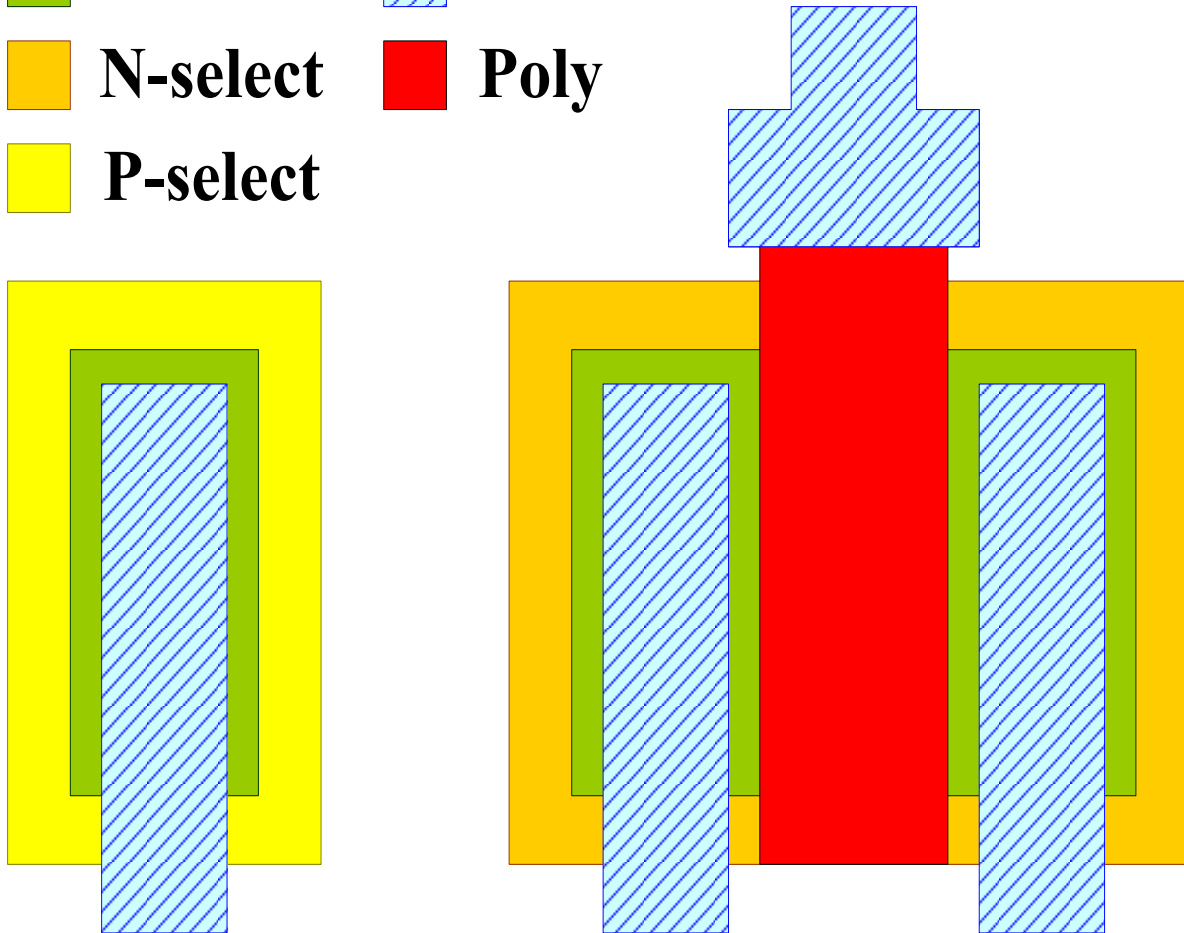
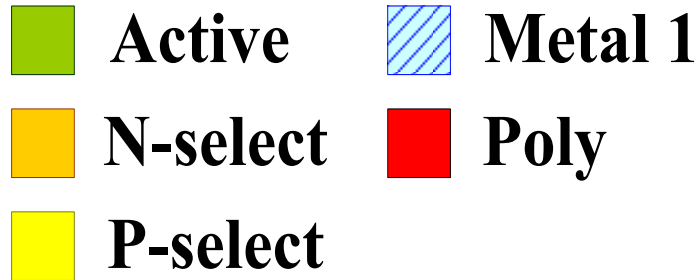
Transistor NMOS

- *Layout*



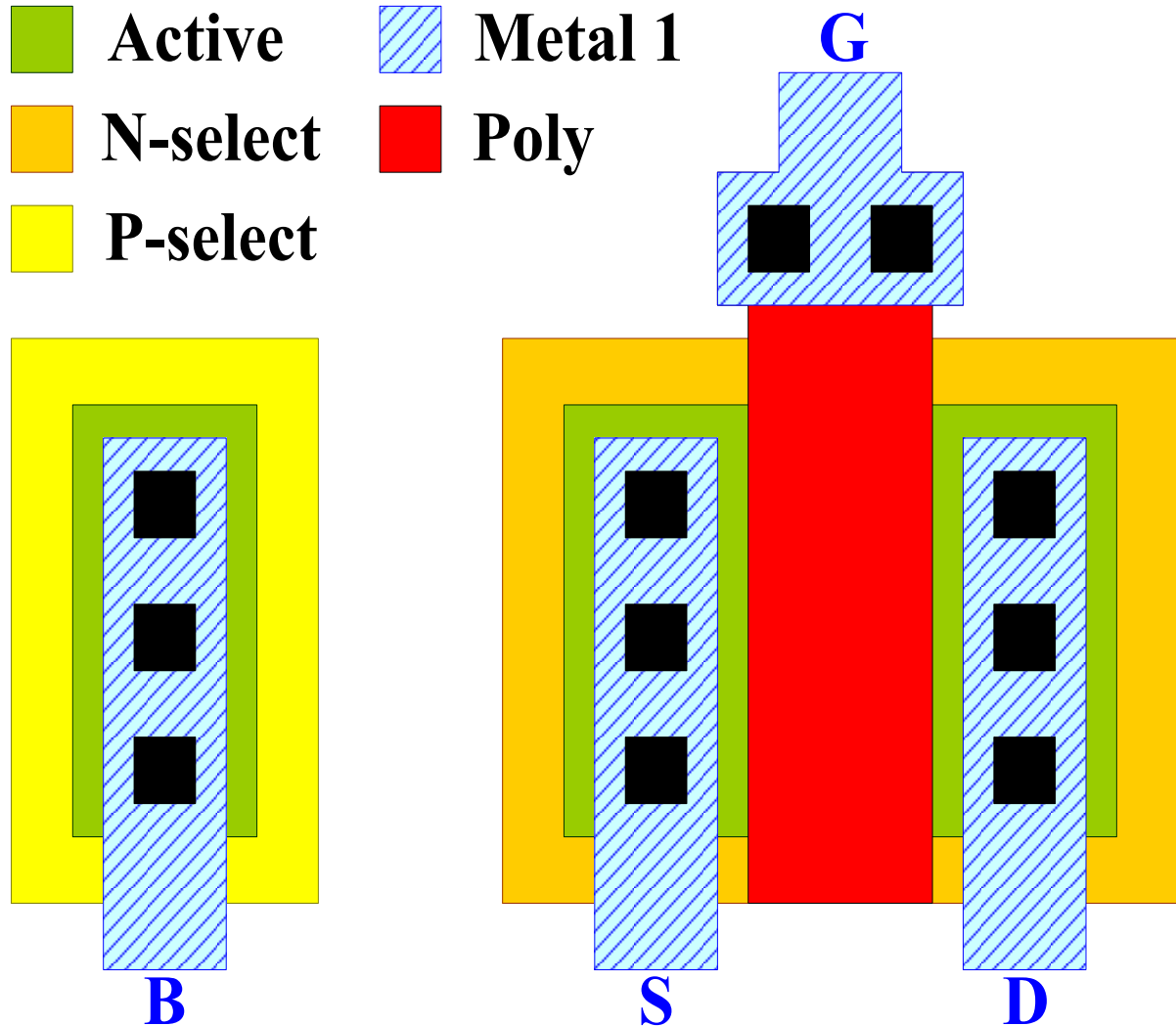
Transistor NMOS

- *Layout*



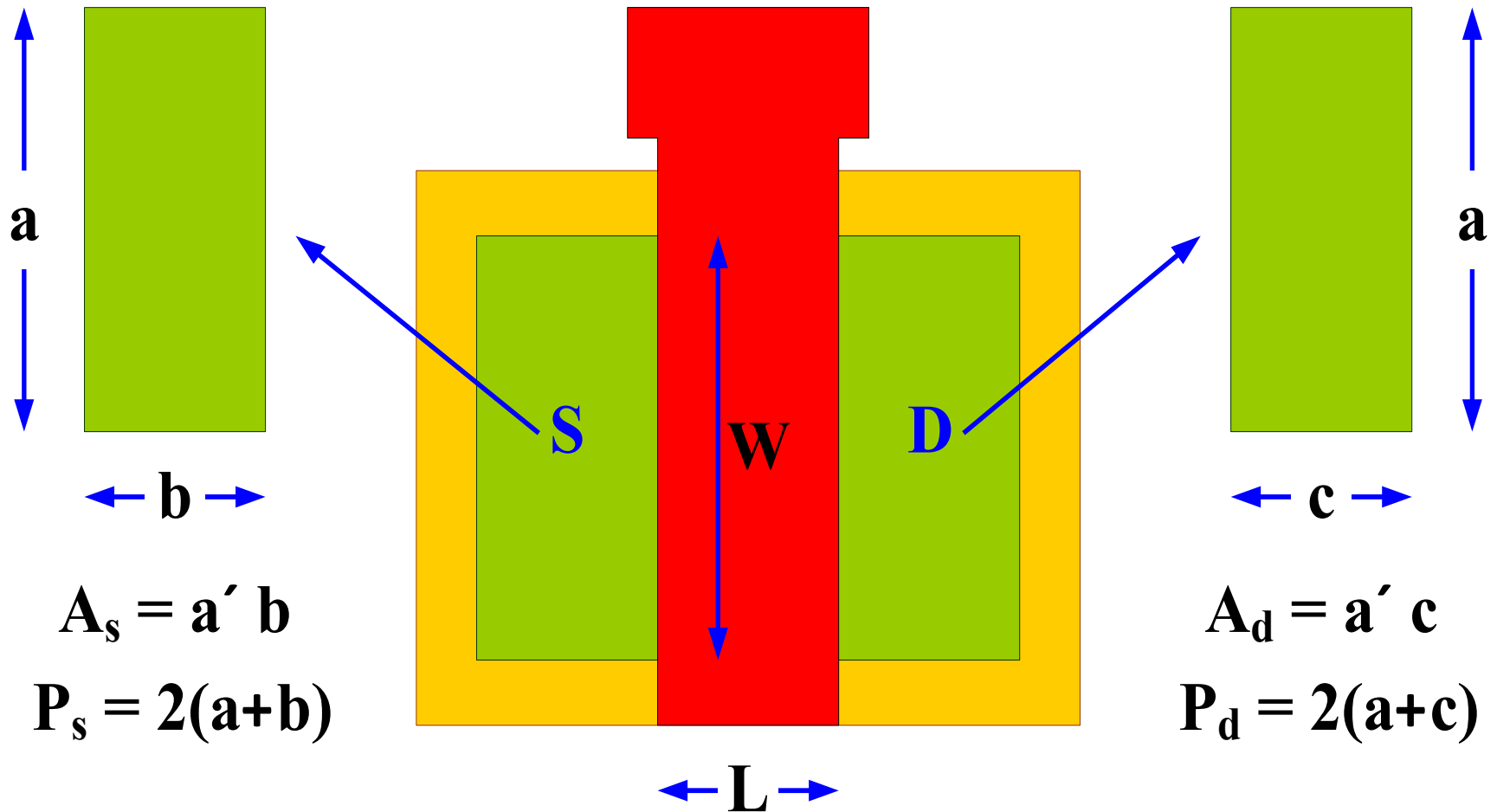
Transistor NMOS

- Layout*



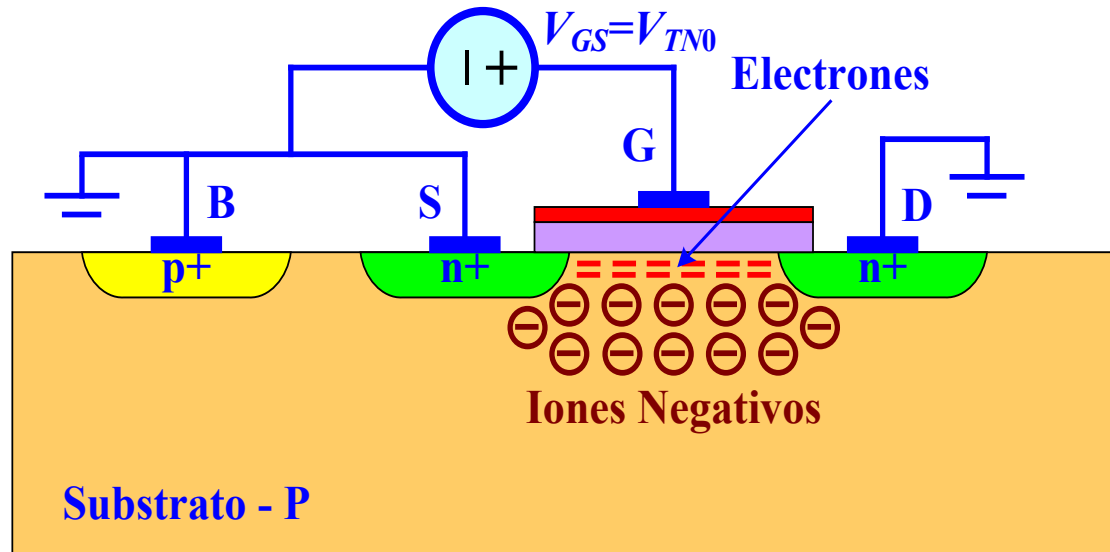
Transistor NMOS

- *Layout* simplificado



Tensión Umbral Intrínseca: V_{TN0}

- Formación del canal: $V_{GS} = V_{TN0}$ ($V_{SB} = 0$).

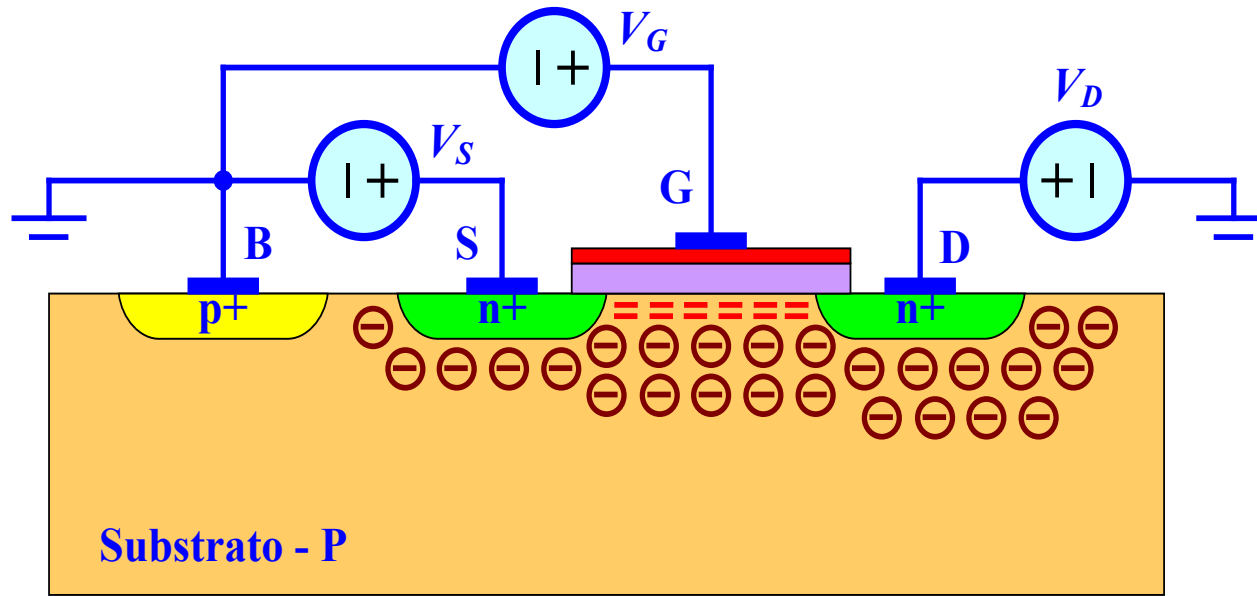


$$V_{TN0} = V_{FBN} + 2\Phi_F + \frac{\sqrt{2q\epsilon_{si}N_{A(SUB)}2\Phi_F}}{C_{ox}}$$

$$\Phi_F = \frac{KT}{q} \ln \frac{N_{A(SUB)}}{n_i}$$

Tensión Umbral Generalizada: V_{TN}

- Efecto substrato (*body*):

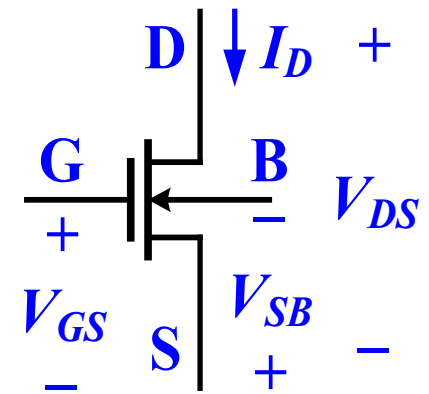
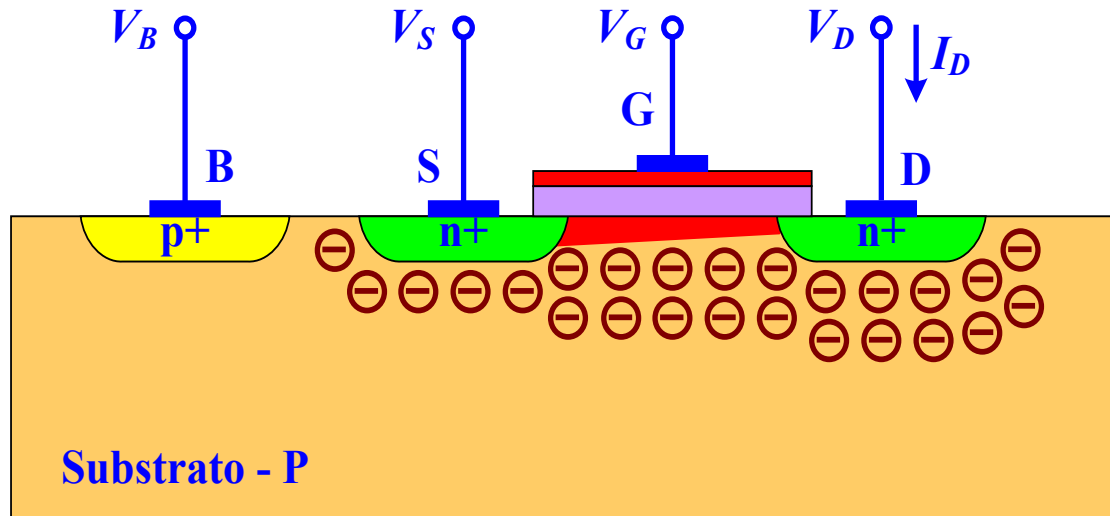


$$V_{TN} = V_{TN0} + \gamma_n \left(\sqrt{2\Phi_F + V_{SB}} - \sqrt{2\Phi_F} \right) \quad \wedge \quad V_{SB} \geq 0$$

$$\gamma_n = \frac{\sqrt{2q\epsilon_{si}N_{A(SUB)}}}{C_{ox}}$$

Modelo de Gran Señal: Región Lineal

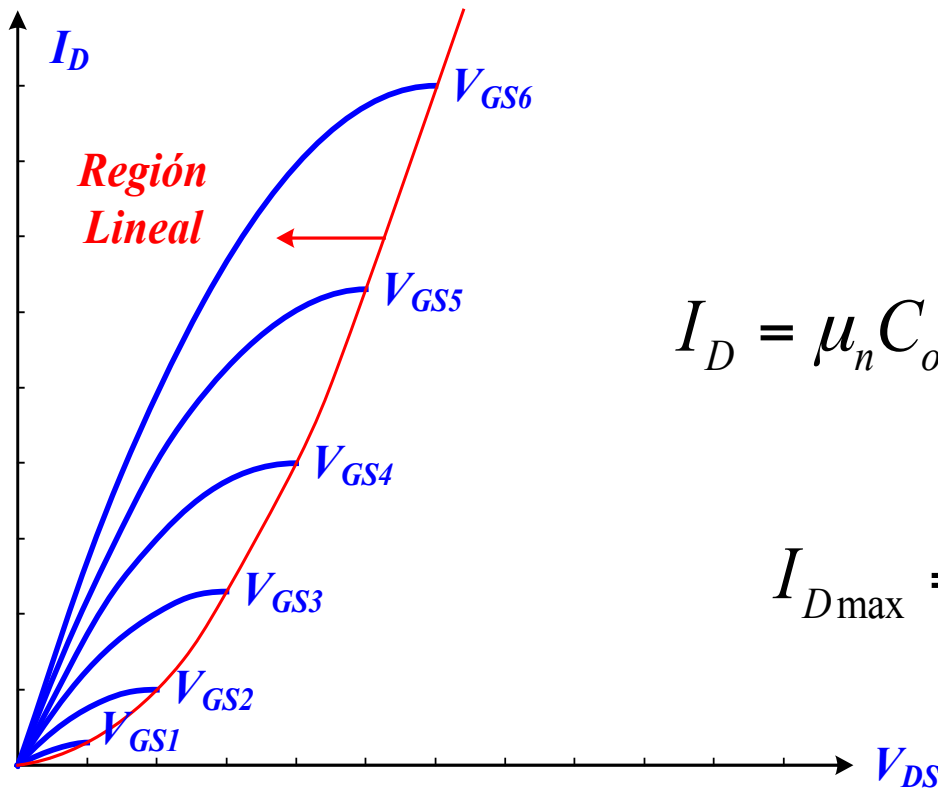
- Canal formado en toda la superficie



$$V_{SB} \geq 0 \quad \wedge \quad V_{GS} \geq V_{TN} > 0 \quad \wedge \quad V_{GS} - V_{TN} \geq V_{DS} \geq 0$$

Características I-V: Región Lineal

- Modelo Idealizado:



$$\begin{cases} V_{GS} \geq V_{TN} \\ V_{GS} - V_{TN} \geq V_{DS} \end{cases}$$

$$I_D = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left[(V_{GS} - V_{TN}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$$

$$I_{D\max} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TN})^2$$

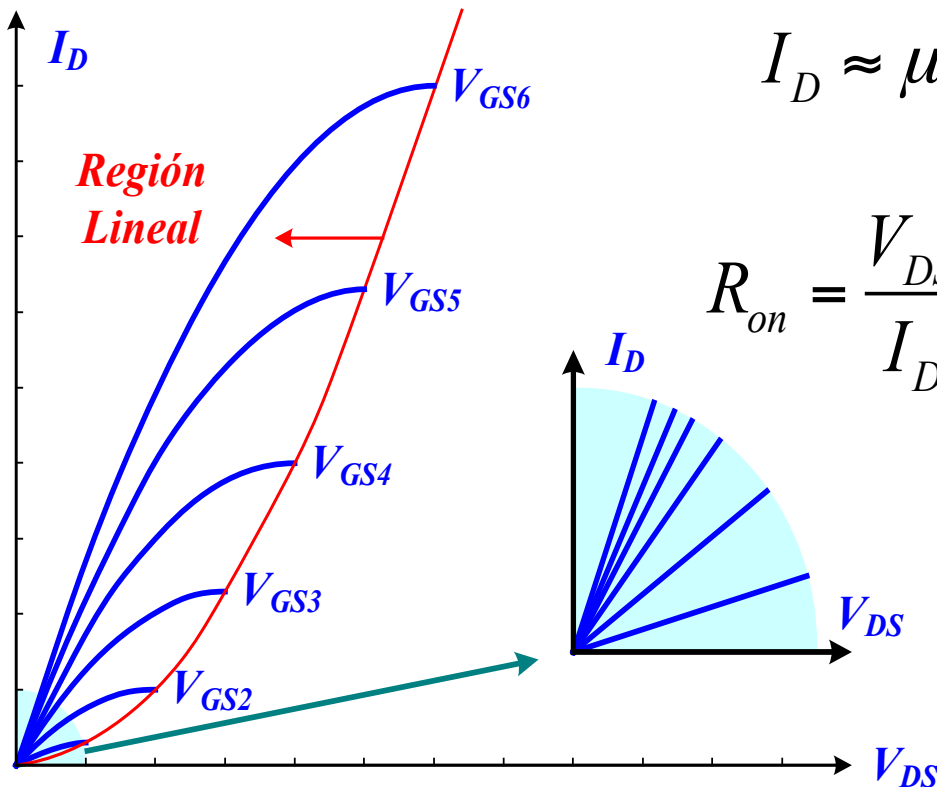
Características I-V: Región Lineal

- Resistencia controlada por tensión:

$$V_{GS} \geq V_{TN} \quad \wedge \quad 2(V_{GS} - V_{TN}) \gg V_{DS}$$

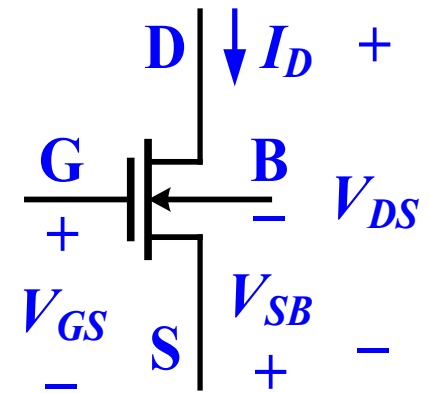
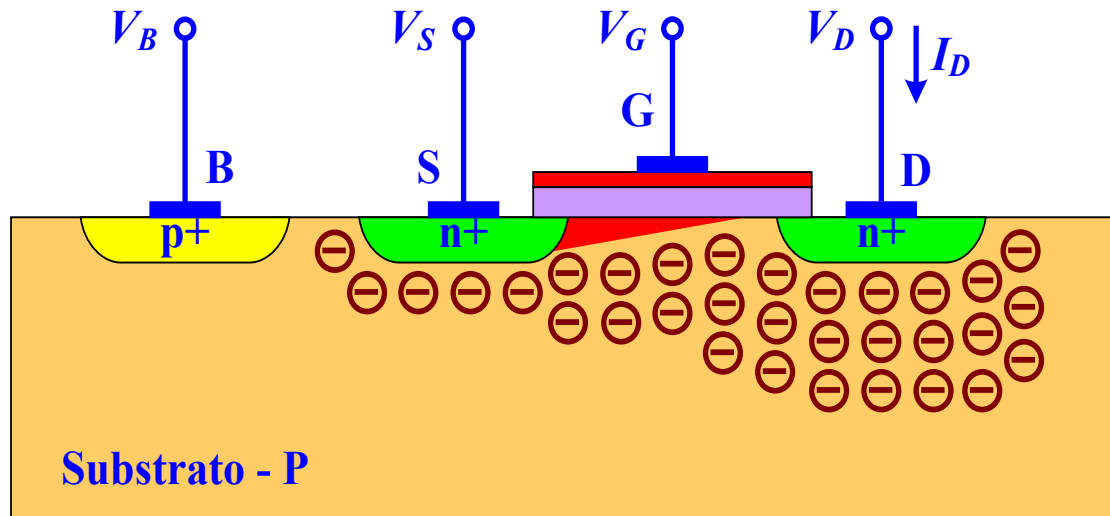
$$I_D \approx \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TN}) V_{DS}$$

$$R_{on} = \frac{V_{DS}}{I_D} = \frac{1}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TN})}$$



Modelo de Gran Señal: Región de Saturación

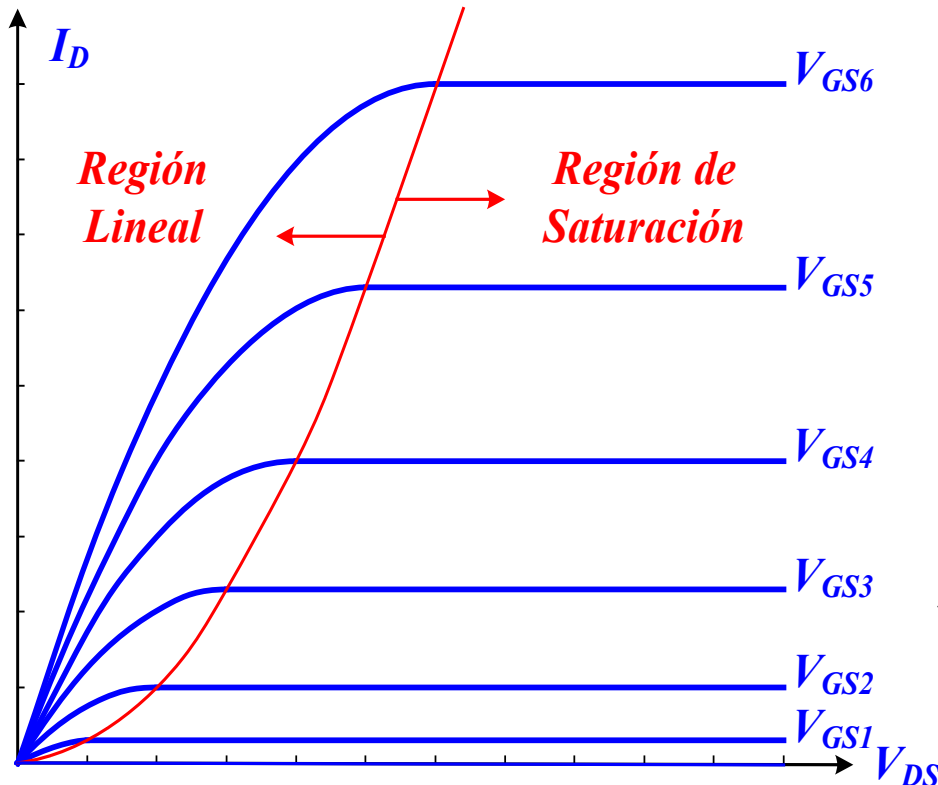
- Canal parcialmente formado en la superficie:



$$V_{SB} \geq 0 \quad \wedge \quad V_{GS} \geq V_{TN} > 0 \quad \wedge \quad V_{DS} \geq V_{GS} - V_{TN} \geq 0$$

Características I-V: Región de Saturación

- Modelo Idealizado:

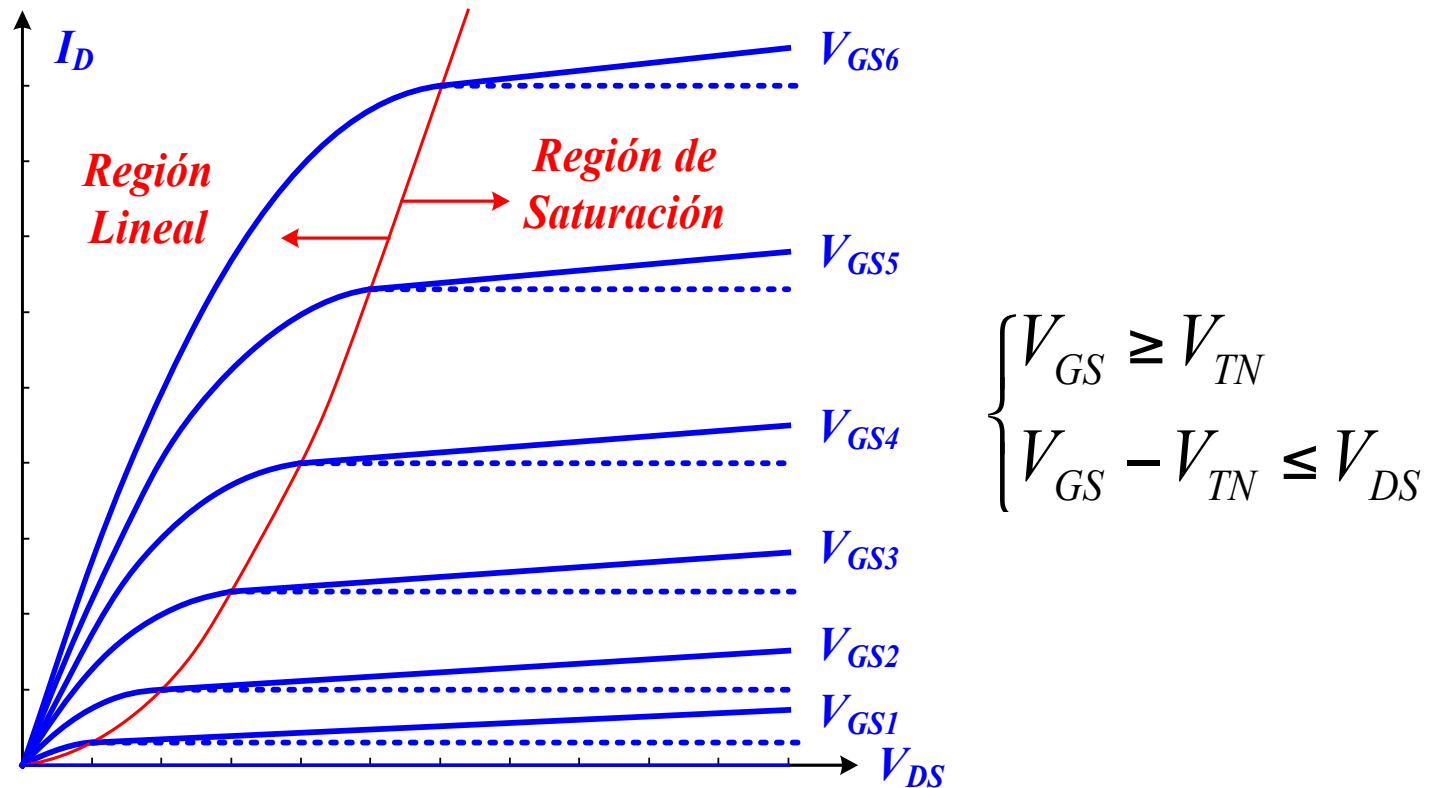


$$\begin{cases} V_{GS} \geq V_{TN} \\ V_{GS} - V_{TN} \leq V_{DS} \end{cases}$$

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

Características I-V: Región de Saturación

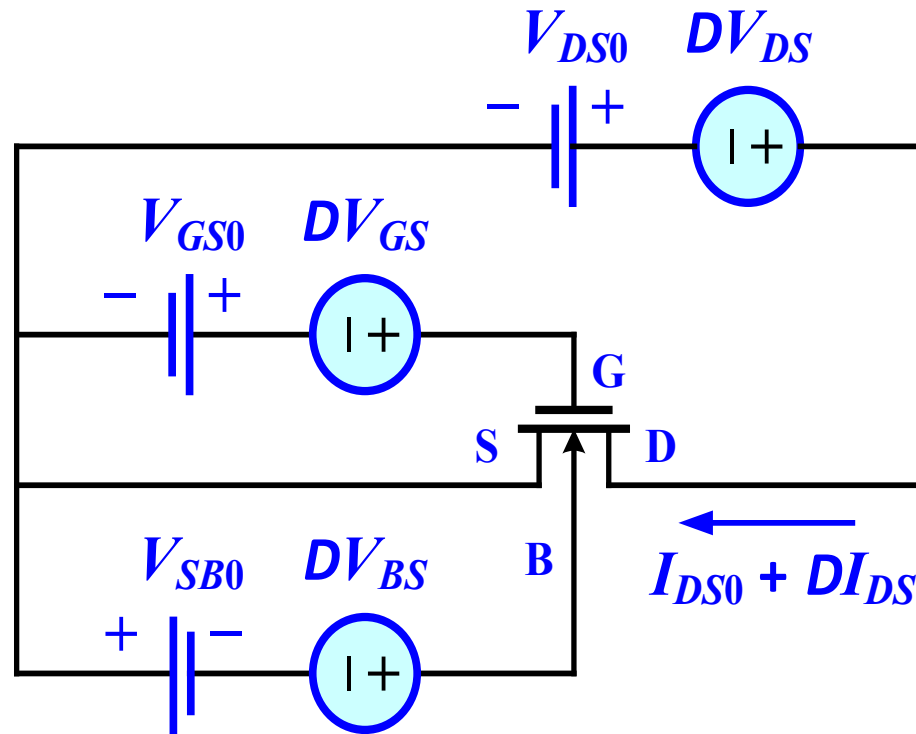
- Modulación de la longitud del canal:



$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TN})^2 (1 + \lambda_n V_{DS})$$

Modelo de Pequeña Señal en Baja Frecuencia

- Transistor NMOS polarizado, sometido a variaciones de tensión de pequeña señal.



Modelo de Pequeña Señal en Baja Frecuencia

- Aproximación de las variaciones de corriente:

$$\Delta I_{DS} \approx g_m \Delta V_{GS} + g_{mb} \Delta V_{BS} + g_{ds} \Delta V_{DS}$$

- Transconductancia:

$$g_m \equiv \left. \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}} \right|_{V_{BS}, V_{DS}}$$

- Transconductancia de substrato

$$g_{mb} \equiv \left. \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{BS}} \right|_{V_{GS}, V_{DS}}$$

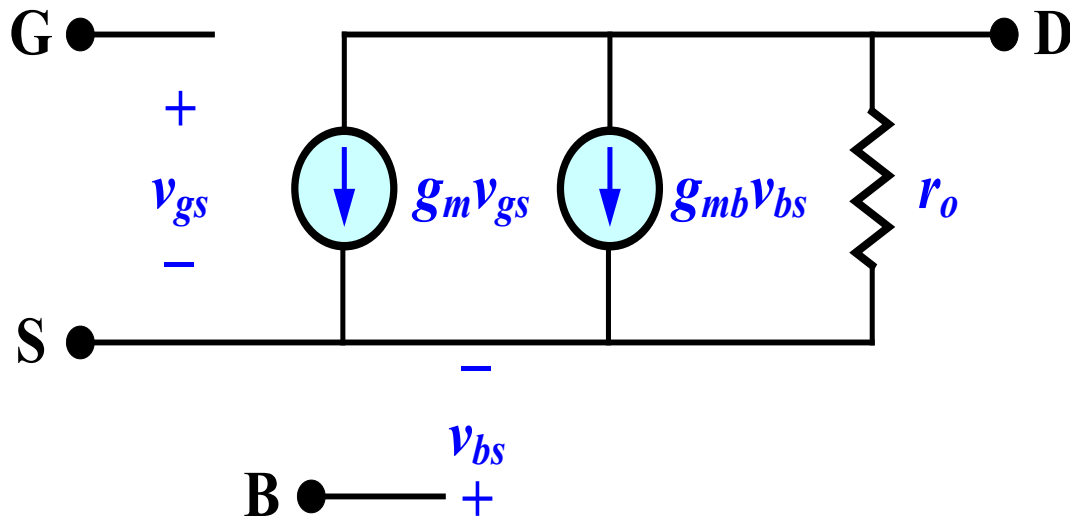
- Conductancia drenador-fuente:

$$g_{ds} \equiv \left. \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{DS}} \right|_{V_{GS}, V_{BS}}$$

Modelo de Pequeña Señal en Baja Frecuencia

- Circuito equivalente:

$$\Delta I_{DS} = g_m \Delta V_{GS} + g_{mb} \Delta V_{BS} + g_{ds} \Delta V_{DS}$$



$$i_d = g_m v_{gs} + g_{mb} v_{bs} + g_{ds} v_{ds} \quad \wedge \quad r_o = g_{ds}^{-1}$$

Parámetros de Pequeña Señal en Saturación

- Transconductancia:

$$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} = \sqrt{2\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} I_D (1 + \lambda_n V_{DS})}$$

- Modelo idealizado:

$$g_m \cong \sqrt{2\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} I_D}$$

Parámetros de Pequeña Señal en Saturación

- Conductancia de salida:

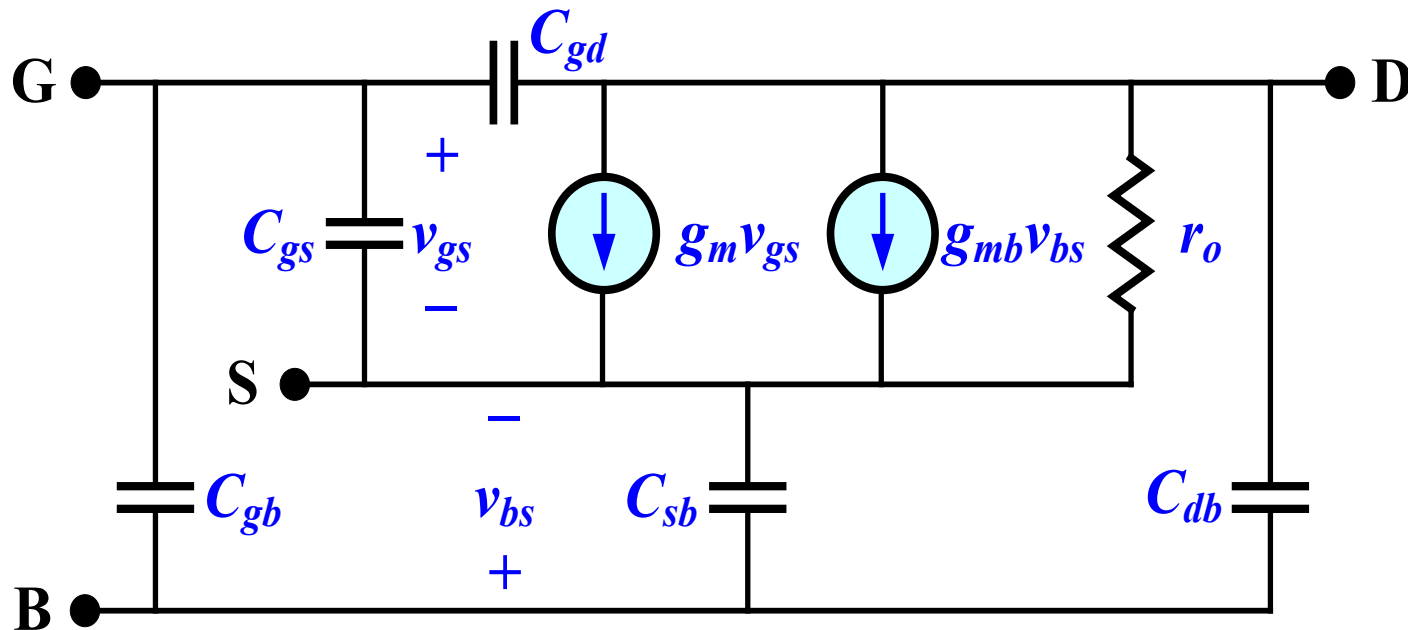
$$g_{ds} = r_o^{-1} = \frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2 \lambda_n \approx \lambda_n I_D$$

- Transconductancia de substrato:

$$g_{mb} = \frac{\partial I_D}{\partial V_{BS}} = \frac{\gamma_n g_m}{2\sqrt{2\Phi_F + V_{SB}}} = \eta_n g_m$$

Modelo de Pequeña Señal en Alta Frecuencia

- Circuito equivalente



Modelo de Pequeña Señal en Alta Frecuencia

- Capacidades en G :

$$C_{g(eff)} = C_{ox} W_{eff} L_{eff}$$

- Región de corte:

$$C_{gb} = C_{g(eff)} + L_{eff} C_{gbo} \quad C_{gs} = W_{eff} C_{gso} \quad C_{gd} = W_{eff} C_{gdo}$$

- Región lineal:

$$C_{gb} = L_{eff} C_{gbo} \quad C_{gs} = \frac{C_{g(eff)}}{2} + W_{eff} C_{gso} \quad C_{gd} = \frac{C_{g(eff)}}{2} + W_{eff} C_{gdo}$$

- Región de saturación

$$C_{gb} = L_{eff} C_{gbo} \quad C_{gs} = \frac{2C_{g(eff)}}{3} + W_{eff} C_{gso} \quad C_{gd} = W_{eff} C_{gdo}$$

Modelo de Pequeña Señal en Alta Frecuencia

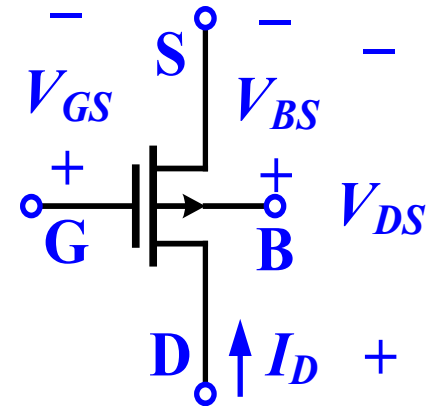
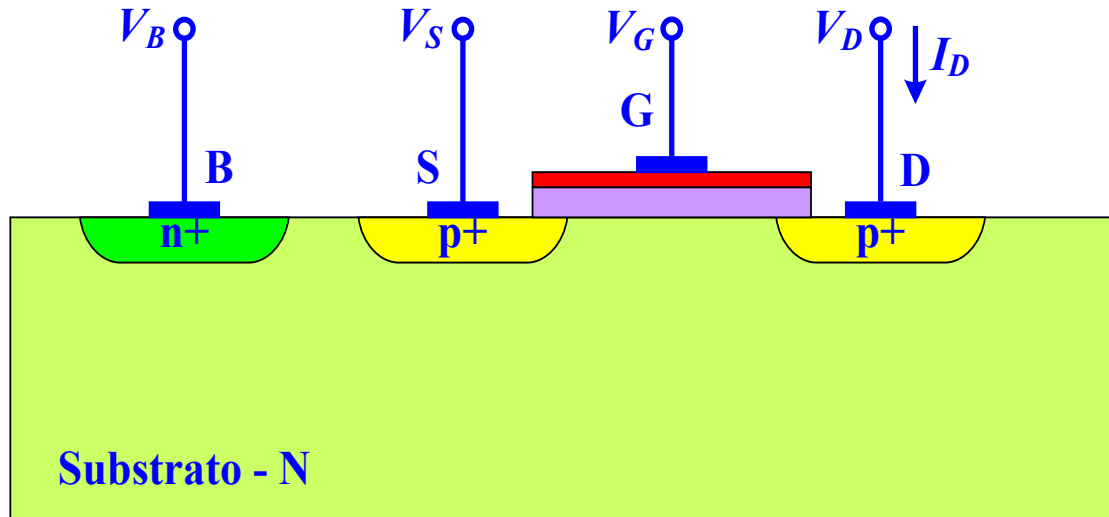
- Capacidades en S y D:

$$C_{sb} = \frac{C_j A_S}{\left(1 + (V_{SB} / \phi_B)\right)^{m_j}} + \frac{C_{jsw} P_S}{\left(1 + (V_{SB} / \phi_B)\right)^{m_{jsw}}}$$

$$C_{db} = \frac{C_j A_D}{\left(1 + (V_{DB} / \phi_B)\right)^{m_j}} + \frac{C_{jsw} P_D}{\left(1 + (V_{DB} / \phi_B)\right)^{m_{jsw}}}$$

Transistor PMOS

- Estructura física y símbolo de circuito.



- Tensión umbral negativa:

$$V_{TP} < 0,$$

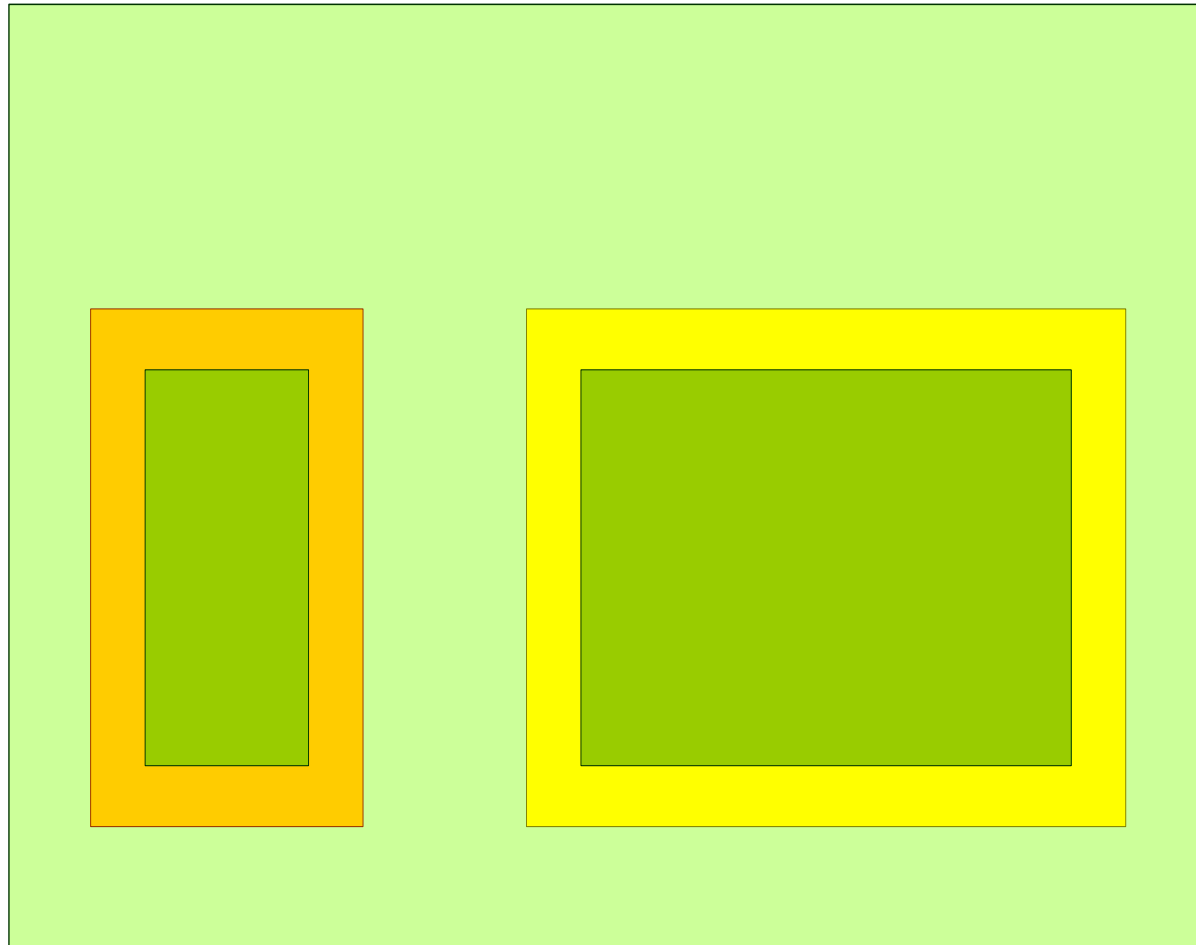
- Tensiones de polarización negativas:

$$V_{SB} \leq 0, \quad V_{GS} \leq 0, \quad V_{DS} \leq 0$$

Transistor PMOS

- Layout*

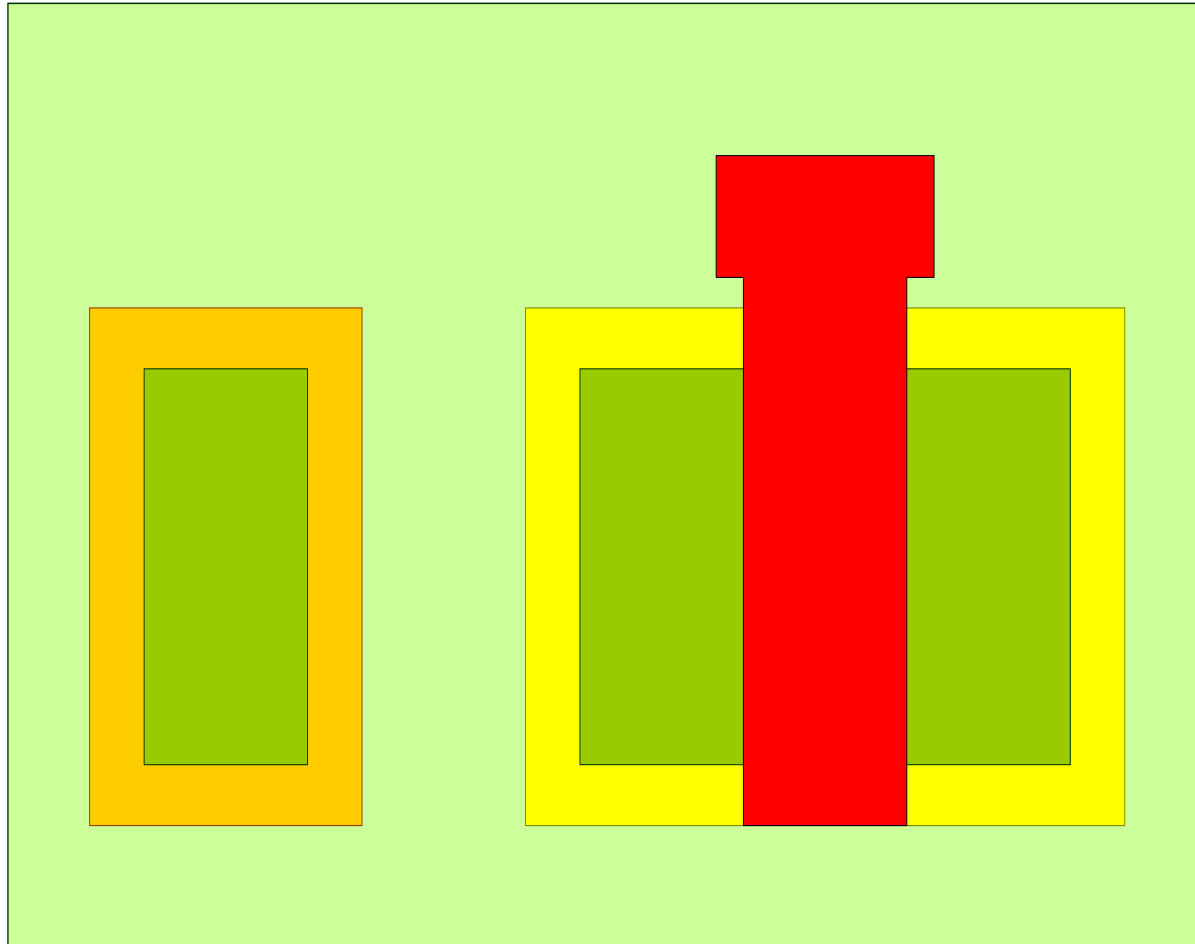
	Pozo-N		Active		Poly
	N-select		P-select		Metal 1



Transistor PMOS

- Layout*

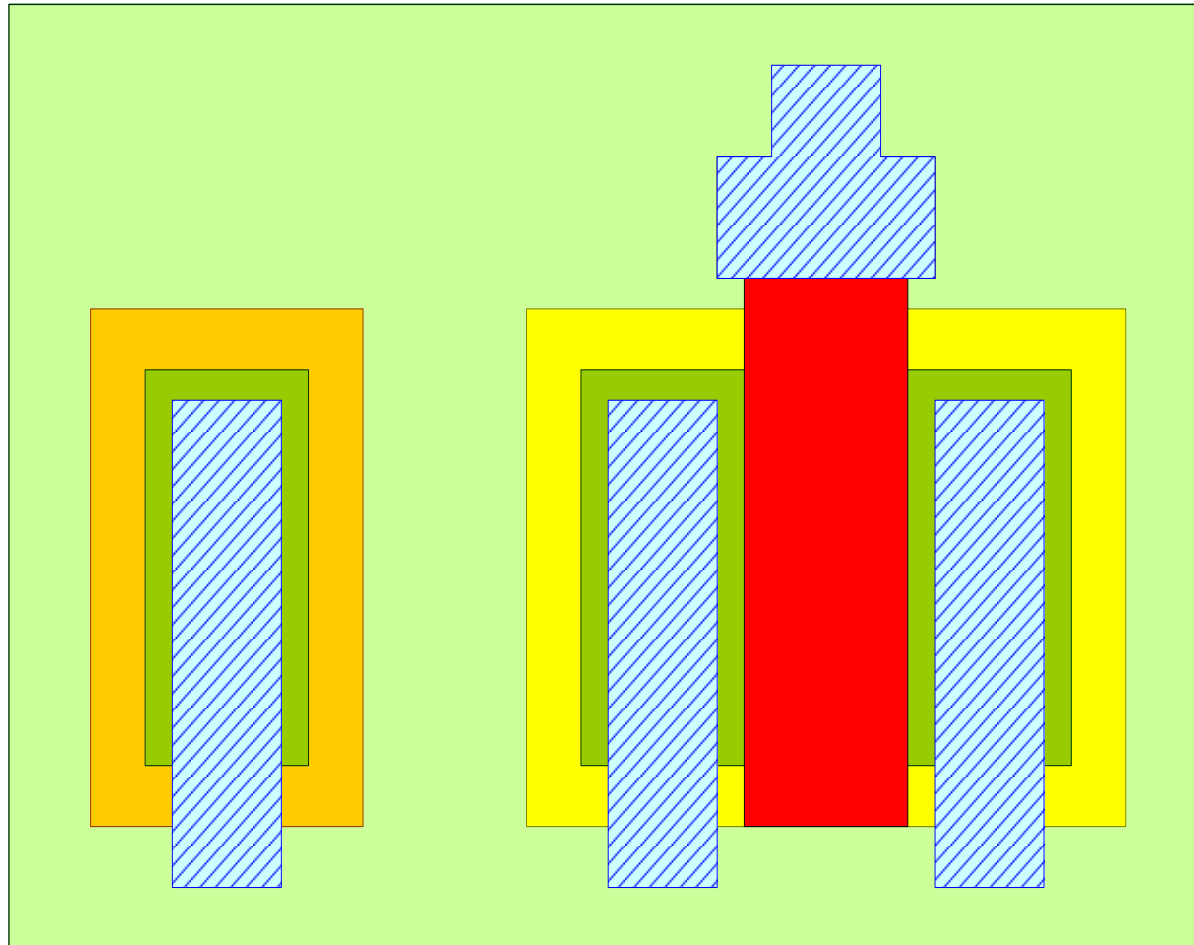
	Pozo-N		Active		Poly
	N-select		P-select		Metal 1



Transistor PMOS

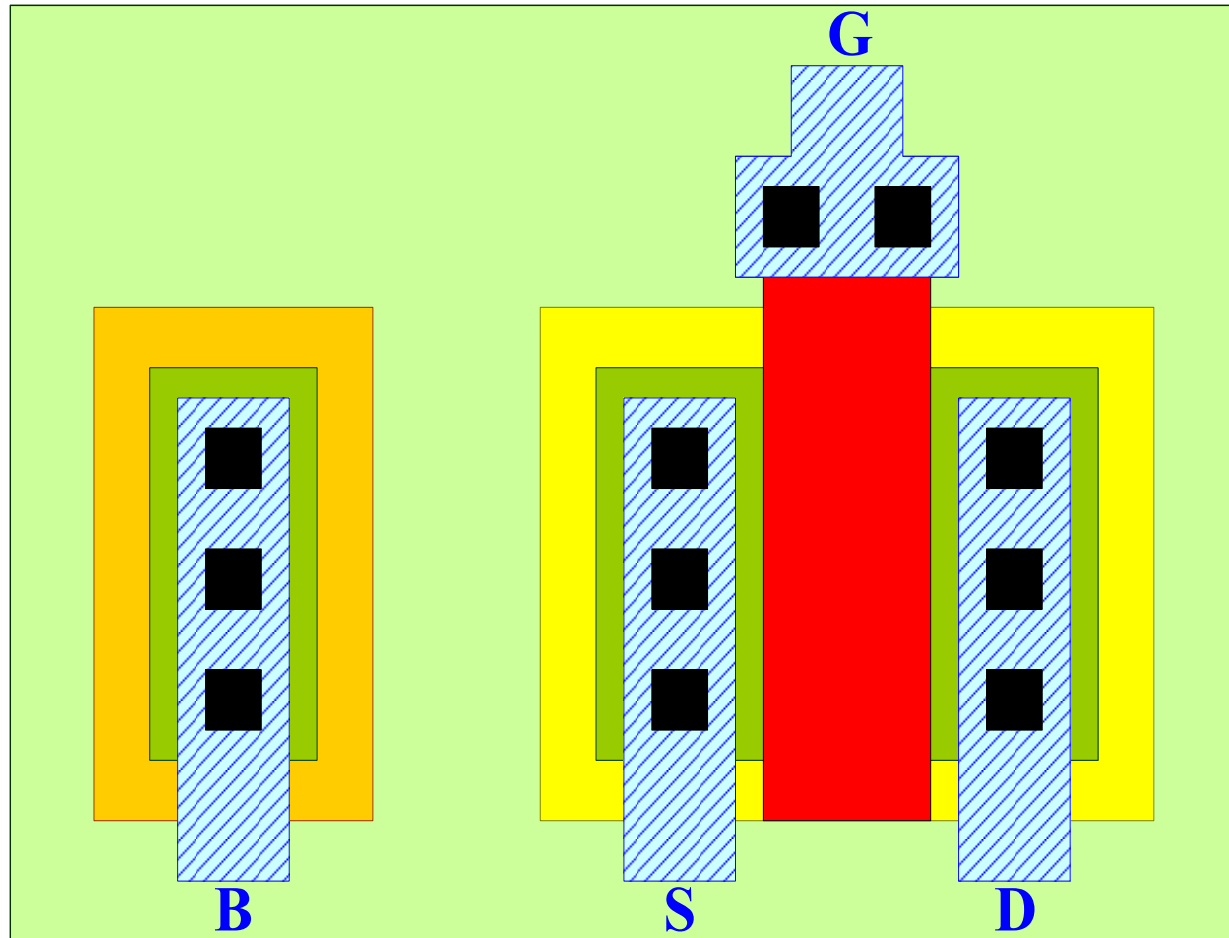
- Layout*

	Pozo-N		Active		Poly
	N-select		P-select		Metal 1



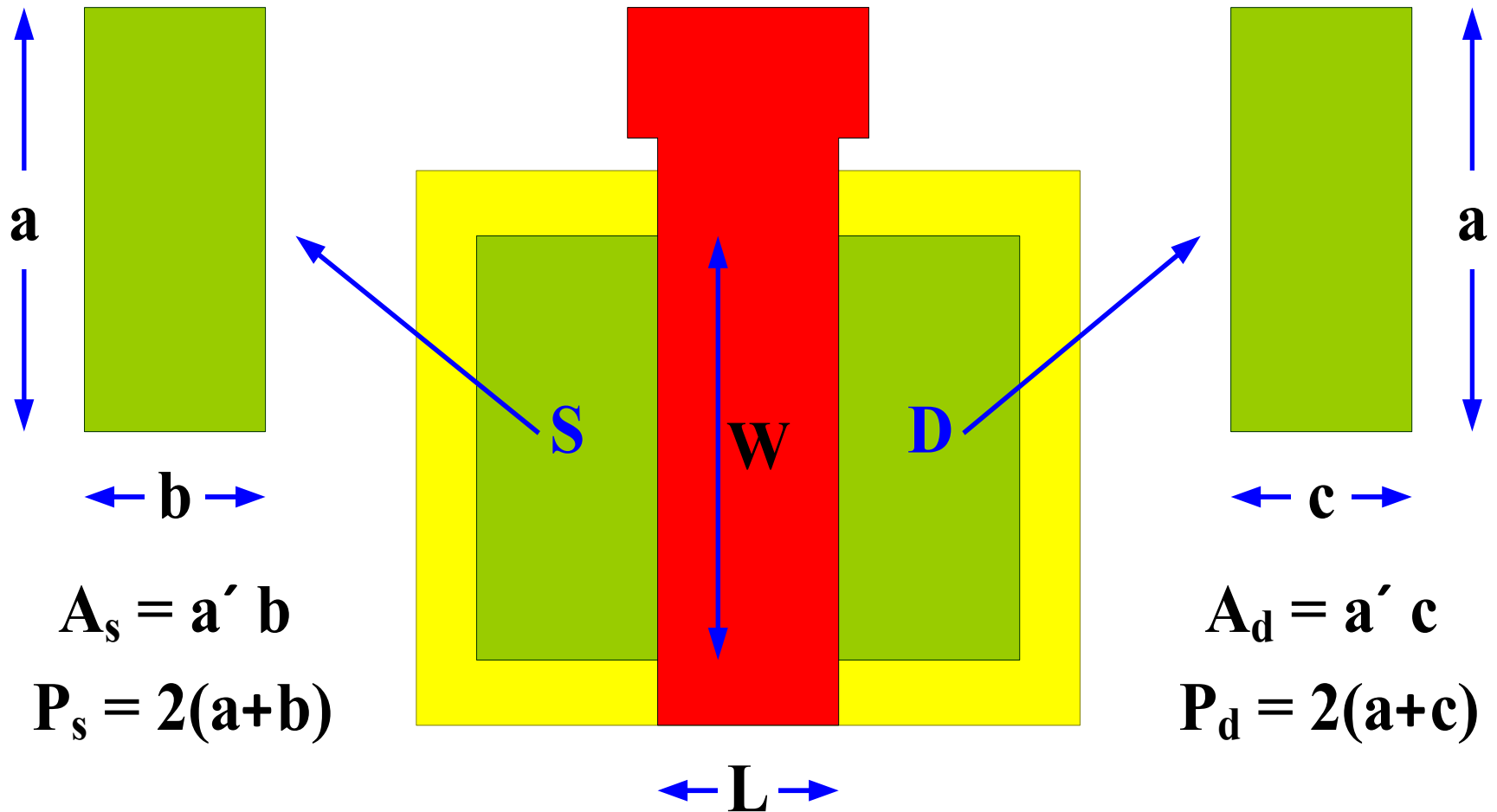
Transistor PMOS

- Layout*
 - Pozo-N
 - N-select
 - Active
 - P-select
 - Poly
 - P-select
 - Metal 1



Transistor PMOS

- *Layout* simplificado



Transistor PMOS: Tensión Umbral

- Tensión umbral intrínseca: V_{TP0} .

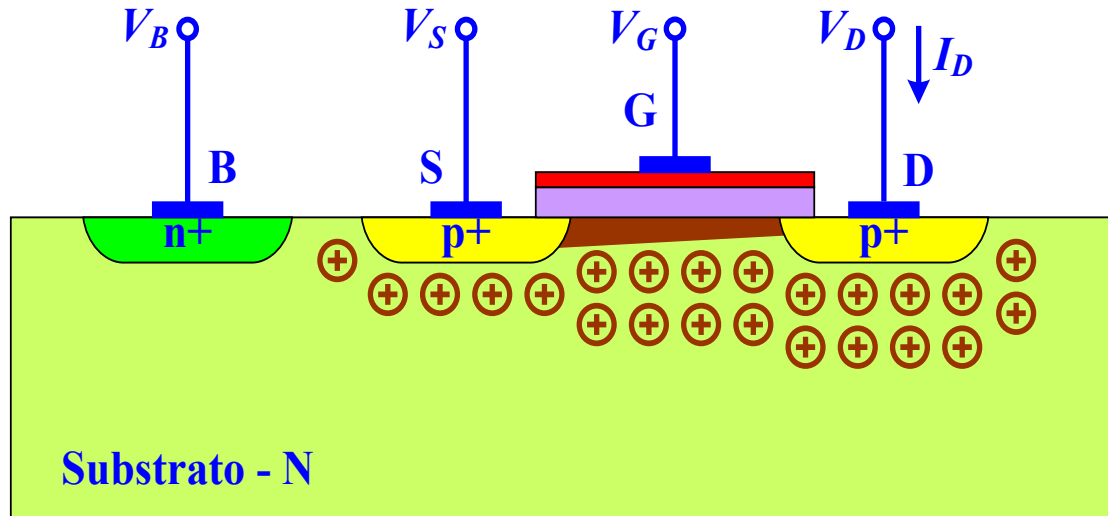
$$V_{TP0} = V_{FBP} - 2|\Phi_F| - \frac{\sqrt{2q\epsilon_{si} N_{D(SUB)}} 2|\Phi_F|}{C_{ox}}$$
$$\Phi_F = -\frac{KT}{q} \ln \frac{N_{D(SUB)}}{n_i}$$

- Tensión umbral generalizada: efecto body.

$$V_{TP} = V_{TP0} - \gamma_p \left(\sqrt{2|\Phi_F| - V_{SB}} - \sqrt{2|\Phi_F|} \right)$$
$$\gamma_p = \frac{\sqrt{2q\epsilon_{si} N_{D(SUB)}}}{C_{ox}}$$

Transistor PMOS: Modelo de Gran señal

- Modelo idealizado en la región lineal:

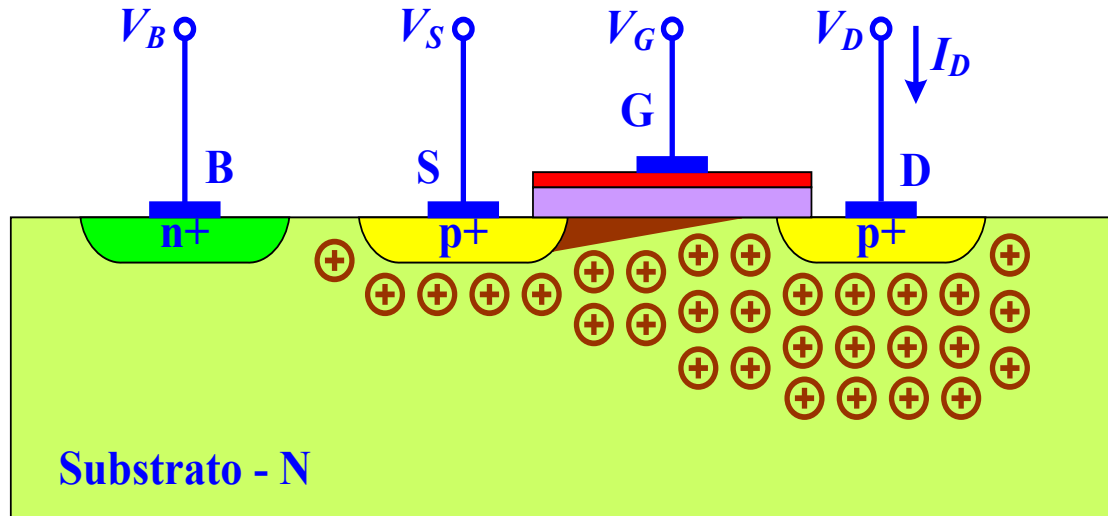


$$V_{GS} \leq V_{TP} \quad , \quad V_{GS} - V_{TP} \leq V_{DS}$$

$$I_D = -\mu_p C_{ox} \frac{W}{L} \left[(V_{GS} - V_{TP}) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right]$$

Transistor PMOS: Modelo de Gran señal

- Modelo idealizado en la región de saturación:

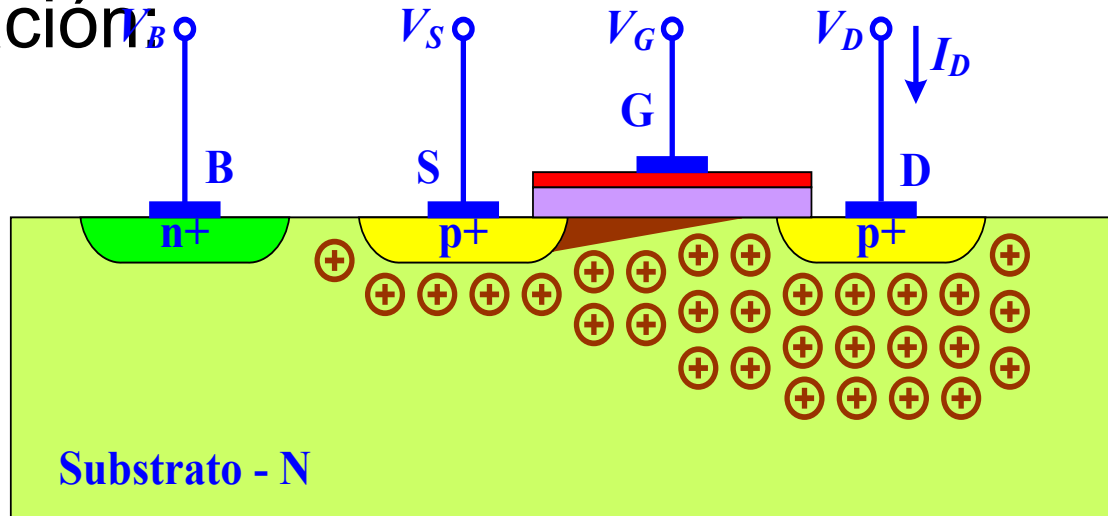


$$V_{GS} \leq V_{TP} \quad , \quad V_{GS} - V_{TP} \geq V_{DS}$$

$$I_D = -\frac{1}{2} \mu_p C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TP})^2$$

Transistor PMOS: Modelo de Gran señal

- Modulación de la longitud del canal en saturación:



$$V_{GS} \leq V_{TP} \quad , \quad V_{GS} - V_{TP} \geq V_{DS}$$

$$I_D = -\frac{1}{2} \mu_p C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TP})^2 (1 - \lambda_p V_{DS})$$

Modelo de Pequeña Señal en Saturación

- Transconductancia (g_m):

$$g_m = \sqrt{2\mu_p C_{ox} \frac{W}{L} |I_D| (1 - \lambda_p V_{DS})}$$

- Modelo idealizado:

$$g_m \approx \sqrt{2\mu_p C_{ox} \frac{W}{L} |I_D|}$$

Modelo de Pequeña Señal en Saturación

- Conductancia de salida (g_o):

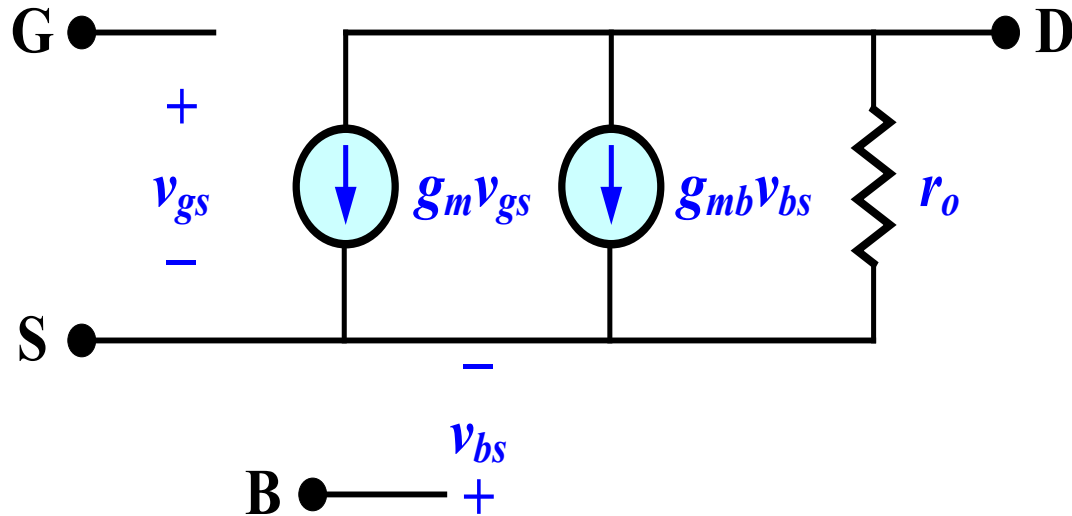
$$g_{ds} = r_o^{-1} = \frac{1}{2} \mu_p C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TP})^2 \lambda_p \approx \lambda_p |I_D|$$

- Transconductancia de efecto substrato (g_{mbs}):

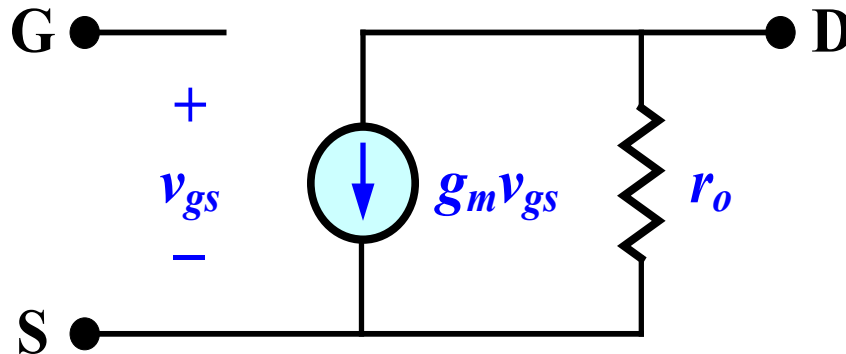
$$g_{mb} = \frac{\gamma_p g_m}{2\sqrt{2|\Phi_F| + |V_{SB}|}} = \eta_p g_m$$

Circuito Equivalente de Pequeña Señal en LF

- Inclusión del efecto substrato:



- Modelo simplificado:



Circuito Equivalente de Pequeña Señal en HF

- Inclusión del efecto substrato:

